

**Le déterminisme régit  
toutes les lois physiques**

***Raisonnements scientifiques  
du XXI<sup>e</sup> siècle***

**Daniel Martin**

# Présentation de l'ouvrage

Mise à jour : 17/08/2020

Ce texte est extrait de l'ouvrage : [Philosophie des sciences, métaphysique du XXI<sup>e</sup> siècle](#). On y trouvera les définitions des termes philosophiques et techniques utilisés, ainsi que des compléments d'explications et des références bibliographiques.

Après des études d'ingénieur et d'astronomie suivies de cinq années d'enseignement-recherche, Daniel Martin a fait une carrière internationale d'informaticien spécialiste des bases de données.

Les philosophes connaissent tous la définition traditionnelle du déterminisme, issue de l'*Essai philosophique sur les probabilités* de Laplace, publié en 1814, qui dit en substance : "*Est déterministe toute évolution de système qui ne dépend que des circonstances initiales*" et sous-entend qu'elle obéit à une loi ; en l'écrivant, l'astronome Laplace avait en tête le mouvement des planètes, parfaitement stable et régi par les lois de Newton.

Par induction, Laplace étendait cette loi à tout système matériel de l'Univers. Il en déduisait alors qu'une intelligence connaissant parfaitement les circonstances d'un système à l'instant  $t$  pourrait prédire son évolution future et reconstituer mentalement son évolution passée aussi loin qu'elle voulait.

Hélas, cette loi est fautive en dehors de l'échelle macroscopique, nous en verrons plusieurs exemples, mais les philosophes traditionnels n'en tiennent pas compte. Ils se contentent d'affirmer que certains phénomènes, par exemple en physique des particules, ne sont pas déterministes parce que leurs évolutions ont des résultats multiples et probabilistes.

Ce livre reprend donc la définition du déterminisme à sa base métaphysique, la causalité, pour montrer comment une définition basée sur la réalité scientifique de la physique montre que toutes ses lois sont déterministes – sauf celles où intervient une dissipation d'énergie comme un frottement, impossible à décrire avec précision.

L'ouvrage approfondit alors la définition du déterminisme, en décrivant ses limites, son opposé *le hasard*, ainsi que les extensions permettant de régir la Mécanique quantique et les phénomènes naturels de complexité quelconque.

Après une étude détaillée de la causalité, il montre comment les théories actuelles de la psychologie cognitive (le modèle informatique du psychisme) justifient les doctrines rationalistes, notamment le rationalisme critique de Karl Popper et l'abandon des croyances en une nécessaire transcendance de l'esprit.

# Table des matières

<b>Origine historique : le déterminisme philosophique</b>	<b>5</b>
Le déterminisme philosophique ne tient pas toujours ses promesses	6
<b>Radioactivité naturelle</b>	<b>7</b>
Conclusions doctrinales	9
<b>Déterminisme scientifique</b>	<b>10</b>
Postulat de causalité - Principe de raison	10
Comprendre et prévoir	11
Le postulat de causalité fait partie des principes de l'entendement	11
Les deux sortes de déductions causales	12
Précisions sur la notion d'évolution utilisée dans ce texte	13
Lois d'évolution et lois descriptives	13
Evolution conservative ou évolution dissipative	13
Le postulat de causalité et le déterminisme promettent l'évolution, pas la prédiction	14
Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)	14
Utilité du déterminisme : comprendre, prévoir, prédire	15
Le caractère déterministe ne doit pas être jugé à l'aide de situations	17
Les deux types fondamentaux d'objets de la physique	18
Lois d'évolution régies par le déterminisme scientifique	19
Portée du déterminisme : locale ou globale	19
<b>Déterminisme statistique</b>	<b>19</b>
Formation de la molécule d'ammoniac en superposition d'états	19
Une superposition d'états est un état particulier de la matière	20
Décohérence	24
Multiplicité des résultats d'évolution	25
Les indéterminations de la Mécanique quantique	28
C'est la mesure qui crée son résultat ; avant il n'existait pas	28
Valeurs propres orthogonales et interférences	29
Processus du choix de l'état décomposé d'une superposition	29
A l'échelle atomique toute mesure perturbe le système mesuré	30
Les deux sortes de changements physiques : transitions et évolutions	30
Définition du déterminisme statistique	30
Lois d'évolution régies par le déterminisme statistique	30
Le déterminisme statistique régit aussi les transitions d'état	31
Structure hiérarchique des lois du déterminisme	32
Lois de transformation	33
Conditions nécessaires pour des résultats prédictibles	33
Déterminisme des processus itératifs	34
<b>Déterminisme étendu</b>	<b>42</b>
Doctrines réalistes modernes	42
Synthèses de plusieurs lois d'évolution	43
Lois d'évolution et lois d'interruption	45
Nécessité et définition d'un déterminisme étendu	46
C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception	46
Conséquences de la Loi globale du déterminisme dues à la causalité	47
Métaphysique des lois de la nature	48
Les niveaux de déterminisme (diagramme)	53
Conclusion sur le déterminisme étendu	54
<b>Hasard</b>	<b>54</b>
« Au hasard » par opposition à « déterministe »	54
Le hasard n'existe pas	55
Le besoin de rigueur dans l'invocation du hasard	56
L'attribution d'une cause au hasard exige une démonstration	56

Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité	57
Cas dans lesquels une évolution a un résultat imprédictible	57
Les trois définitions du hasard	64
Principe de fatalisme	66
L'évolution de l'Univers depuis le Big Bang n'était pas prévisible	67
<b>La conscience et le cerveau interpréteur</b>	<b>68</b>
La conscience, ensemble de processus interpréteurs	68
Un vieux débat : la conscience est-elle transcendante ?	70
Conscience <i>de</i>	71
Conscience (tout court)	73
Interprétation - Processus de la conscience	74
Modèle informatique du psychisme	74
<b>Le jugement humain</b>	<b>76</b>
Vérité d'une connaissance d'objet	76
Rationalisme - Principe de raison - Principe d'universelle intelligibilité	79
Rationalisme critique de Karl Popper	81
L'aptitude à réfléchir ne garantit pas des conclusions justes	82
Valeur	82
Culture (définition)	83
Civilisation (définition)	84
Les 3 déterminants des valeurs selon la psychologie cognitive	85
Les universaux, part importante de l'inné humain	86
Le libre arbitre	88
<b>Déterminisme cognitif humain</b>	<b>92</b>
Déterminisme du vivant	92
Vie, organisation, complexité et entropie	93
Programme génétique et déterminisme	94
Déterminisme étendu des fonctions vitales	96
Gènes et comportement humain	97
Evolution du programme génétique	98
Conclusions sur le déterminisme génétique	102
Objections idéalistes et leur réfutation	102
Mécanisme psychique algorithmique	103
<b>Annexe</b>	<b>104</b>
Lois de Newton	104
Axiomatique et Système logique	106
Physique quantique - Mécanique quantique	107
Equation de Schrödinger	111
Principe d'incertitude de Heisenberg	111
Fluctuations quantiques d'énergie dues au principe d'incertitude de Heisenberg	113
Le chat de Schrödinger	114
Principe de correspondance	116
Principe de complémentarité	117
Interprétation métaphysique de Copenhague	118
Niveaux d'information biologique et déterminisme génétique	119
<b>Références</b>	<b>122</b>

## Origine historique : le déterminisme philosophique

Dans son monumental ouvrage *Traité de mécanique céleste*, publié en 5 volumes de 1798 à 1827, Laplace démontrait les lois détaillées du mouvement des planètes à partir des lois de Newton. Ces corps célestes se déplaçaient avec une régularité remarquable : on pouvait prévoir la position de chacun des années à l'avance et retrouver celle qu'ils avaient à une date lointaine du passé. Laplace a donc naturellement postulé que toutes les lois de la nature avaient les mêmes qualités :

- Universalité : elles s'appliquent à tous les corps, en toutes circonstances et en tous lieux ;
- Stabilité : elles n'ont pas varié depuis l'aube des temps et resteront valables indéfiniment.

Ces qualités sont à l'origine de la doctrine du déterminisme, voici comment.

Dans l'*Essai philosophique sur les probabilités* de Laplace on lit page 3 :

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

### *Interprétation*

- L'existence d'une chose ou la survenance d'un événement sont dus à une cause : ils ne sont pas l'effet du hasard.
- Même lorsque cette cause est la volonté d'un être, celui-ci a eu une raison d'agir. L'existence de décisions prises sans émotion ni contrainte [comme dans un calcul scientifique] ne justifie pas de croire qu'il existe une pensée indépendante de la matière. [Athée, Laplace militait contre les croyances en Dieu, en une âme immortelle, etc.]
- L'enchaînement d'événements par causalité est une loi de la nature. Aucune volonté ne peut remplacer cette causalité naturelle, quel que soit son libre arbitre, sans passer par une cause suffisante naturelle ; la volonté d'un esprit ne peut donc pas agir physiquement.
- La liberté d'action physique indépendante des lois naturelles est une illusion, une telle liberté n'existant que dans la possibilité de penser.

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

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

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

Laplace écrit à la suite de la citation précédente :

"Nous devons donc envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence [le « démon » de Laplace] qui pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde."

Selon le déterminisme philosophique :

- Les causes provoquent l'enchaînement des états d'un système qui évolue, ces états successifs formant une *chaîne de causalité*.
- La science humaine doit permettre d'expliquer l'état présent d'un système en reconstituant par la pensée l'historique complet des évolutions dont il résulte conformément aux lois physiques. Cela implique la possibilité pour l'homme de comprendre tous les phénomènes dont il connaît les causes successives, *promesse d'intelligibilité des phénomènes et de pouvoir explicatif de la science* ;
- Les lois de la science doivent aussi permettre de *prévoir* les évolutions futures et de *prédire* les situations correspondantes, *promesse de prédictibilité*.

#### Le déterminisme philosophique ne tient pas toujours ses promesses

La radioactivité naturelle est un exemple de phénomène qui échappe au déterminisme philosophique. Quand les atomes d'un échantillon d'uranium 238 se décomposent un par un en produisant des atomes de thorium et d'hélium :

- il est impossible de savoir quel est le premier atome de l'échantillon qui se décomposera, et à quelle heure ;
- dans un échantillon d'uranium contenant des atomes de thorium résultant de telles décompositions on ne peut retrouver dans quel ordre ces atomes de thorium sont apparus ;
- les décompositions se produisent toutes sans cause apparente, à des instants imprévisibles.

Ces impossibilités (qui se démontrent) contredisent le déterminisme philosophique, qu'il faut donc abandonner car les lois et principes de la physique ne doivent pas avoir d'exception. Daniel Martin a donc construit une autre théorie du déterminisme des lois physiques d'évolution capable de les régir toutes ; nous allons la découvrir par étapes en commençant par la compréhension de la radioactivité naturelle.

Le problème du déterminisme philosophique est qu'il ne peut ni prédire une situation future (par exemple quel est le premier atome qui se décomposera et à quelle heure), ni reconstituer en pensée l'ordre de décomposition des atomes d'uranium. La décomposition radioactive naturelle est pourtant régie par une loi, que Laplace ne pouvait pas connaître à son époque, voici laquelle.

## Radioactivité naturelle

*Décomposition radioactive, découverte par Henri Becquerel en 1896*

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

### *Demi-vie*

La loi qui décrit la décomposition d'un échantillon d'uranium ne donne qu'une *période de demi-vie*, durée au bout de laquelle 50% des atomes de son  $^{238}\text{U}$  se seront décomposés ; et cette durée de demi-vie n'est qu'une moyenne statistique, vraie pour un nombre significatif d'échantillons. La demi-vie de  $^{238}\text{U}$  est 4.5 milliards d'années : un échantillon paraît donc très stable ; il est surprenant, alors, qu'il se décompose spontanément atome par atome.

Si un atome d'un échantillon observé est du  $^{234}\text{Th}$ , il s'est probablement formé lors de la décomposition d'un atome  $^{238}\text{U}$ , mais il ne peut exister de loi pour savoir à quelle date. Insistons : ce n'est pas qu'on ne connaît pas de « loi de date de la prochaine décomposition naturelle d'un atome de  $^{238}\text{U}$  », c'est qu'*il ne peut y avoir de loi au niveau d'un atome pour cette décomposition*.

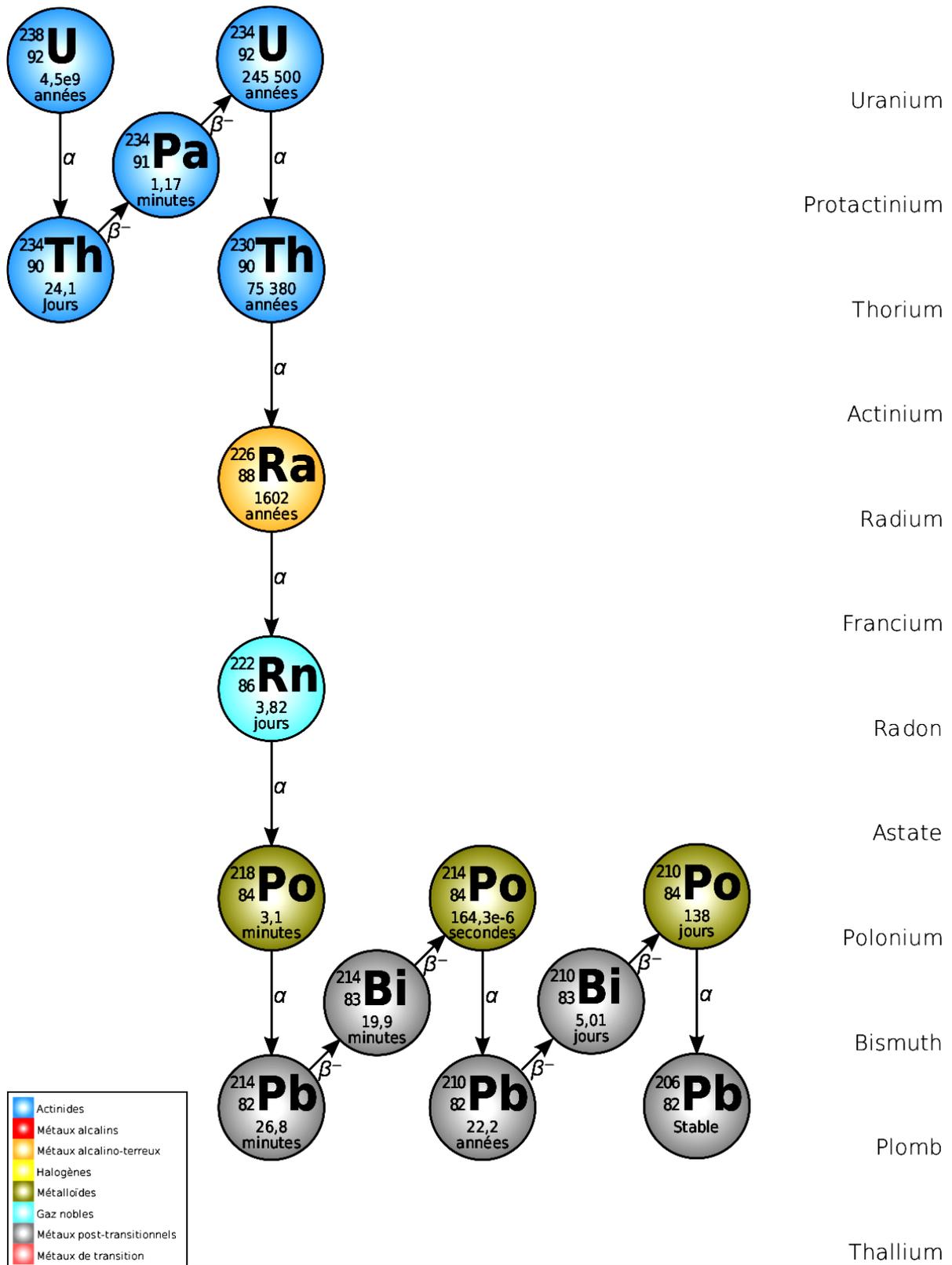
D'où les lois métaphysiques :

**« Ce n'est pas parce que l'esprit humain distingue une partie d'un objet (ici des atomes individuels) que la loi d'évolution naturelle agit au niveau de cette partie. »**

**« Un changement d'état d'un objet peut se produire sans échange d'énergie avec l'extérieur, donc du fait de causes internes. »**

Nous verrons plus bas qu'il y a d'autres lois d'évolution déterministes qui ont une portée globale. Nous verrons aussi d'autres évolutions sans cause extérieure. Nous verrons enfin quelle loi globale décrit la radioactivité naturelle.

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



Décomposition radioactive de  $^{238}\text{U}$  - © Microsoft Bing Creative Commons.  
 Dans le cercle de chaque isotope comme  $^{238}\text{U}$  on trouve son numéro atomique (92) et sa demi-vie (4,5e9=4.5 .10<sup>9</sup> années). La flèche qui en part indique le type de décomposition ( $\alpha$ ,  $\beta^-$ ).

## Conclusions doctrinales

### ■ *Rejet du déterminisme philosophique*

Au niveau des atomes de  $^{238}\text{U}$ , la doctrine du déterminisme philosophique ne tient pas ses promesses de prédiction des états futurs et de reconstitution en pensée de l'historique des états passés. Elle ne prévoit pas l'absence de cause externe de ce phénomène de décomposition.

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

### ■ *Construction d'une autre définition de l'adjectif « déterministe »*

Puisque le déterminisme philosophique, tel que Laplace le définit, ne peut ni toujours prédire les états futurs ni toujours reconstituer les états passés, voyons les conditions que doit vérifier un déterminisme de loi d'évolution :

- Il doit affirmer la causalité, externe ou interne : une cause suffisante  $C$  (=un état de système ou des circonstances) produit une évolution  $E$  :  
 $C \Rightarrow E$  ;
- Il doit postuler l'existence d'une loi  $L$  qui régit cette évolution, c'est-à-dire que les mêmes causes produisent toujours les mêmes conséquences :  $C \xrightarrow{L} E$  ;
- Il doit postuler que cette loi est une condition nécessaire et suffisante de l'évolution (nécessaire pour éliminer le hasard ou les interventions transcendantes, suffisante pour déclencher certainement l'évolution dès que l'état du système existe :  $E \Rightarrow (C \xrightarrow{L} E)$

Ces conditions permettent d'énoncer une définition du déterminisme comme :

**« L'adjectif déterministe qualifie une opération, une évolution ou une règle dont le résultat ne dépend que des données ou circonstances initiales et qui est soumise à une loi. »**

Cette définition réserve le qualificatif « déterministe » à un changement, et remplace la prédiction d'un état final du déterminisme philosophique traditionnel par la connaissance des conditions initiales et l'existence d'une loi.

#### *Remarque sur les résultats d'évolution*

Le déterminisme traditionnel définit aussi à tort un résultat d'évolution comme une *valeur de variable* ou *l'état du système* qui a évolué, habitude malheureuse car nous verrons que *le déterminisme n'entraîne pas toujours la prédictibilité d'un tel résultat*.

Retenons donc que :

**« Le résultat déterministe d'une cause (situation initiale) est nécessairement une évolution selon une loi (et non un état résultant). »**

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

### ■ *Les évolutions de la nature sont régies par des lois*

Qualifier un système de déterministe c'est nécessairement affirmer que son évolution est régie par des lois, sans effet du hasard ou d'une transcendance. Comme Laplace, nous postulons que *toutes* les évolutions naturelles sont déterministes, mais nous justifierons cette doctrine dans ce texte.

- *Nécessité d'un déterminisme statistique*

Le phénomène de décomposition radioactive fait apparaître le besoin d'un type particulier de déterminisme, que nous qualifierons de *statistique*. Il s'agit bien d'un déterminisme et non de hasard : même si on ne peut rien prédire au niveau d'un atome d'uranium cette décomposition n'est pas imprévisible, elle est bien régie par une loi.

Cette loi est au niveau d'une population d'atomes : la nature remplace le niveau de précision atome-par-atome (que nous souhaiterions) par un niveau plus global. La période de demi-vie de l'élément  $^{238}\text{U}$  résulte d'une loi d'évolution physique déterministe décrite par un outil mathématique appelé *Mécanique quantique*, dont les prédictions ont une interprétation statistique bien que son équation d'évolution soit déterministe au sens traditionnel ; nous en reparlerons.

On connaît aujourd'hui beaucoup d'évolutions dont les lois de prédiction sont statistiques. Celles-ci décrivent des états résultants de système dont certaines variables sont de type stochastique : leurs valeurs sont distribuées selon une loi statistique précise, elles ne sont pas au hasard.

- *Nécessité d'un autre déterminisme, à résultat d'évolution unique*

Ce n'est pas parce que la décomposition radioactive se produit sans cause externe ni résultat d'évolution unique qu'il n'existe pas d'évolution nécessitant une cause externe et produisant un résultat unique.

Exemple : la 2<sup>ème</sup> loi de Newton associe une cause (la force) à un résultat unique : l'accélération qu'elle communique à une masse.

Comme ce cas est très fréquent, nous appellerons le déterminisme dont il dépend « *déterminisme scientifique* ». Définissons ce déterminisme-là conformément aux conditions précédentes.

## Déterminisme scientifique

Le déterminisme scientifique est une doctrine basée sur le postulat suivant :

**« L'évolution dans le temps de tout système physique est régie par deux postulats : le *Postulat de causalité* et la *Règle de stabilité* ».**

Toute évolution qui satisfait ces deux postulats est qualifiée de *déterministe* ; réciproquement, toute évolution déterministe satisfait ces deux postulats.

### Postulat de causalité - Principe de raison

#### *Loi de la causalité*

L'enchaînement naturel des causes et des effets est régi par le postulat de causalité.

#### *Définition du postulat de causalité*

Le postulat de causalité est une condition nécessaire et suffisante.

#### 1. Condition nécessaire

**« Tout phénomène constaté (situation ou évolution) a nécessairement dans l'Univers une cause efficace (situation ayant créé ou déclenché ce phénomène) qui l'a précédé et dont il résulte. »** (c'est le *principe de raison*.)

Conséquences :

- Tout ce qui existe, a existé ou existera dans l'Univers a une chaîne de causalité remontant au Big Bang, commencement de l'Univers ;
- Aucune intervention transcendante (de l'extérieur de l'Univers ou précédant son existence) n'est possible : aucune n'a créé, ne créera ou ne modifiera quelque chose dans l'Univers, parce que l'Univers étant en expansion plus rapide que la vitesse de la lumière, cette intervention se propagerait plus vite qu'elle, ce que la Relativité interdit.
- Aucune cause de l'Univers ne peut agir à l'extérieur – si cet extérieur existe (même raison : la Relativité).

2. Condition suffisante

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

Exemple : je tiens une pierre dans ma main ;

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

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

**« La même cause produira le même effet, partout et toujours. »**

Nous reviendrons sur cette règle un peu plus loin, après avoir approfondi le postulat de causalité.

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

### Comprendre et prévoir

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

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

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

Kant écrit, page 647 de la *Critique de la raison pure* [20] : "Si ce sont des principes de l'entendement (par exemple, celui de la causalité)..."

Ce postulat est utilisé si spontanément qu'on fait parfois l'erreur de considérer la causalité comme un principe de Logique. Or il n'y a de causalité que pour les phénomènes physiques comprenant un échange d'énergie (on parle aussi de cause

efficace, ou efficiente ou suffisante) ; les causes matérielle, finale et formelle d'Aristote ne sont pas soumises à une loi naturelle de causalité.

### Les deux sortes de déductions causales

- La causalité *logique*, applicable à toutes les déductions de propositions logiques comme :
  - $(a < b \text{ ET } b < c) \Rightarrow (a < c)$
  - ou le syllogisme  $(a \Rightarrow b . c \Rightarrow a) \Rightarrow (c \Rightarrow b)$ , où le point "." se lit "ET".
- La causalité *naturelle*, applicable à toute évolution physique comme la 2<sup>ème</sup> loi de Newton. Cette causalité existe à deux niveaux :
  - Le niveau des lois de la nature, régissant toutes les évolutions.  
Exemple : la conservation de la charge électrique d'un système isolé.
  - Le niveau de la valeur d'une variable particulière, soumise à une certaine loi.  
Exemple : valeur de la tension  $V$  aux bornes d'une résistance  $R$  parcourue par un courant  $I$  :  $V = RI$  (loi d'Ohm).

### *Séparation des deux types de causalité*

Les déductions par causalité logique ne s'appliquent pas aux phénomènes naturels et les déductions par causalité naturelle ne s'appliquent pas aux propositions logiques. On ne peut donc pas, par exemple, déduire par raisonnement logique une réalité physique : il ne peut pas exister de preuve logique de l'existence d'un Dieu capable de créer l'Univers physique ou d'y agir.

- D'une description d'un Dieu créateur, quelle qu'elle soit, on ne peut déduire logiquement son existence physique, Kant l'a démontré dans la *Critique*.  
Et la logique pure ne peut pas, non plus, démontrer un effet causal physique : la logique et la physique sont deux domaines de connaissance tels qu'aucune déduction n'est possible de l'un à l'autre. La logique impose seulement à la physique la non-contradiction de deux affirmations sur un même sujet.
- Un Dieu purement abstrait (l'Idée de Dieu) ne peut être cause efficace de l'Univers, malgré la doctrine idéaliste qui voudrait que toute réalité soit copie d'une Idée. La raison en est l'absence de preuve : aucune représentation de phénomène, aucune existence d'objet en tant que concept n'est la cause d'existence d'un objet réel. Du temps de Platon et jusqu'au siècle des Lumières on admettait la copie idéaliste sans preuve, depuis on exige des preuves.
- On peut concevoir un Dieu physique existant avant l'Univers qu'il aurait créé, mais on ne peut prouver factuellement ni l'existence ni la non-existence de ce Dieu, ni la possibilité ni l'impossibilité d'un tel acte de création : Kant l'a aussi démontré dans la *Critique*.

Pendant des siècles les philosophes comme Descartes ont utilisé une *causalité divine* dans les raisonnements sur les phénomènes naturels, et les philosophes de l'antiquité une *causalité morale* (Bien/Mal) ou une *causalité esthétique* (comme l'harmonie de la nature, qui imposait aux astres de la « sphère supérieure » d'avoir des mouvements parfaits, donc circulaires et uniformes). Aujourd'hui nous admettons la *causalité psychologique* dans les rapports humains...

De nos jours nous sommes enfin revenus à la causalité du matérialiste Démocrite, pour qui un phénomène matériel ne peut avoir qu'une explication matérielle.

### Précisions sur la notion d'évolution utilisée dans ce texte

Une évolution concerne un système qui change sous l'effet d'une cause efficace. Quand je dis : « Une pierre lâchée tombe » :

- Le système qui évolue est la pierre ;
- L'évolution est la chute. Elle est régie par deux lois :
  - La loi de gravitation universelle, qui exerce une force attractive ;
  - La deuxième loi de Newton, qui décrit l'évolution de la hauteur de la pierre en fonction du temps.
- La cause efficace est la force du champ de gravitation, la pesanteur.

### L'échange d'énergie

Une cause efficace d'évolution met en œuvre une énergie. Toute évolution suppose donc un échange d'énergie ; en tombant, la pierre perd de l'énergie potentielle de gravitation et gagne de l'énergie cinétique en prenant de la vitesse.

- Bien que déterministe, la trajectoire d'un rayon lumineux réfléchi par un miroir n'est pas une évolution : il n'y a pas d'échange d'énergie.
- Dans une tige métallique isolée plus chaude à une extrémité qu'à l'autre la chaleur se propage de la première à la seconde. L'énergie du système étant constante, cette propagation déterministe de la chaleur, soumise à la loi de diffusion thermique de Fourier, n'est pas non plus une évolution.
- Une planète décrivant sa trajectoire elliptique dans l'espace vide autour du Soleil n'échange aucune énergie, en l'absence d'influence gravitationnelle d'autres corps célestes : son mouvement (péripétuel) n'est pas non plus une évolution.
- Dans une casserole d'eau au-dessus d'un brûleur l'eau qui bout subit une transformation : son changement de phase (passage de l'état liquide à l'état gazeux dû à l'apport de chaleur) est une évolution.
- Deux des trois lois de Newton (la loi d'inertie et la loi d'action et de réaction), qui n'impliquent pas d'échange d'énergie, sont des lois descriptives n'impliquant pas d'évolution.

### Lois d'évolution et lois descriptives

Il y a deux types de lois de changement de la nature : les lois d'évolution et les lois descriptives. Les lois d'évolution du déterminisme statistique (donc aussi celles du déterminisme scientifique, son sous-ensemble) appliquent les conséquences d'un échange d'énergie. Elles décrivent des variations de variables en fonction des valeurs des mêmes variables ou d'autres ; leur expression mathématique utilise des équations différentielles.

Toutefois, conformément à la définition de l'adjectif *déterministe*, nous incluons dans l'ensemble des lois physiques d'évolution les lois descriptives comme celles de l'optique géométrique. Ces dernières ne régissent pas une évolution, mais un trajet de rayons lumineux ; elles peuvent être qualifiées de déterministes car tout trajet est fonction des conditions initiales (le système optique) et respecte des lois. Une loi descriptive s'applique à un phénomène qui ne change pas, ou qui n'échange pas d'énergie au sens thermodynamique.

### Evolution conservative ou évolution dissipative

Cette évolution à échange d'énergie est conservative ou dissipative.

- Définition d'un système conservatif  
En Mécanique analytique on appelle système *conservatif* un système matériel qui a une énergie constante car sans échange avec l'extérieur ; c'est le cas notamment des systèmes sans frottement (en pratique ceux où les frottements ne perturbent l'évolution que de manière négligeable) ; exemple : une planète qui tourne autour du Soleil. Le modèle mathématique d'évolution d'un système conservatif a une symétrie temporelle : c'est un système d'équations différentielles invariable par changement de  $t$  en  $-t$ .
- Définition d'un système dissipatif  
Un système qui n'est pas conservatif (qui échange de l'énergie avec l'extérieur) est dit *dissipatif*. Les équations différentielles qui en décrivent l'évolution changent lorsqu'on remplace  $t$  par  $-t$ . C'est le cas de toutes les évolutions où il y a un frottement, ou (en astronomie planétaire) des *marées gravitationnelles*.

#### *Marées gravitationnelles*

Ensemble, la grosse planète Jupiter et son satellite Europe exercent sur le petit satellite Io une attraction variable, tantôt plus forte quand Io se rapproche de leur centre de gravité, tantôt plus faible quand il s'en éloigne. Il en résulte des forces qui alternativement compriment ou tendent la matière de Io, ce qui génère une chaleur telle que Io a des volcans qui crachent de la matière en permanence.

#### Le postulat de causalité et le déterminisme promettent l'évolution, pas la prédiction

En réponse à une cause efficace, la définition de Daniel Martin du postulat de causalité ne promet qu'une *évolution conforme à une loi* ; elle ne promet aucune *prédictibilité de résultat*, parce qu'une telle prédictibilité est possible à l'échelle macroscopique mais pas à l'échelle atomique (voir *Radioactivité naturelle*) ou dans les phénomènes chaotiques (voir *Chaos* dans *Déterminisme des processus itératifs*).

Cette définition est très différente de la définition traditionnelle des philosophes depuis Aristote. Pour eux, la causalité fait passer d'un état initial à son état conséquence, ou remonte la chaîne de causalité par états-causes successifs ou par dates de survenance.

- Le modèle "suite d'instant" des philosophes est discontinu, alors qu'une évolution est nécessairement ininterrompue tant que sa cause perdure.
- Le déterminisme "traditionnel" des philosophes prévoit un unique état conséquence d'un état initial donné, prédiction incompatible avec la physique quantique et les phénomènes chaotiques. Le déterminisme de Daniel Martin est compatible avec toutes les évolutions de la physique.

Nous aborderons ce problème en parlant de la complémentarité *loi d'évolution/loi d'interruption*.

#### Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)

**« La même cause produira le même effet, partout et toujours. »**  
(Toute évolution est soumise à une loi de la nature.)

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

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

### *Conséquence*

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

### *Domaine de connaissances de la physique*

La métaphysique doit aussi délimiter le domaine d'application de la physique.

- A quel domaine de réalité s'applique la physique, et quel est son objectif précis ? S'applique-t-elle au seul champ de l'expérience accessible à l'homme, ou peut-on/doit-on y inclure, par exemple, des considérations théologiques sur *Dieu créateur du monde*, sur *Sa finalité lors de cette création*, sur *Son intervention possible dans le monde actuel* et sur *l'harmonie de la nature* ?
- Comment définit-on la vérité d'une affirmation concernant la réalité physique, et comment la déduit-on de l'expérience ou de la logique pure ?
- Comment établit-on la cause qui explique un phénomène ? Et la cause de cette cause ? Une chaîne de causalité est-elle infinie vers le passé, ou comment s'arrête-t-elle ?

Les réponses à ces questions de conditions d'application sont dans ce texte.

### Utilité du déterminisme : comprendre, prévoir, prédire

Avant d'agir et par curiosité, l'homme a besoin de *comprendre* la situation, de *prévoir* son évolution et d'en *prédire les conséquences exactes*.

Faute de comprendre une situation ou de prévoir son évolution, l'homme est inquiet : pour lui, instinctivement, ce qui est incompris ou imprévisible est peut-être menaçant ou empêche de profiter d'une opportunité.

Compréhension et prévision de l'évolution naturelle d'un système sont régies par un principe philosophique : le déterminisme ; croire qu'il en est ainsi, c'est adopter la doctrine du déterminisme.

- *Comprendre* la situation d'un système, c'est décrire :
  - son état actuel dans son environnement ;
  - son évolution passée, prélude à une compréhension causale du phénomène et une réponse à la question : était-elle inévitable ?
- *Prévoir l'évolution d'un système*, c'est :
  - décrire qualitativement cette évolution :
    - ✓ déroulement, variables et domaine de définition ;
    - ✓ est-elle bornée ou diverge-t-elle (va-t-elle à l'infini) ;
    - ✓ diagramme des bifurcations ;

- ✓ a-t-elle un résultat unique ou y a-t-il un ensemble de résultats (et si oui, quelle est la structure de cet ensemble - par exemple une distribution statistique de valeurs) ?
  - ✓ a-t-elle des symétries, une auto-similitude, des propriétés statistiques ?
  - ✓ a-t-elle des solutions sensibles aux conditions initiales ?
  - ✓ si elle est bornée va-t-elle vers une forme limite, par exemple asymptotique à une courbe ou oscille-t-elle indéfiniment ? ;
  - ✓ répond-elle aux conditions d'universalité ? ;
  - ✓ Si elle ne va pas vers une forme limite, est-elle au moins stable ou est-elle chaotique ?
- décrire quantitativement cette évolution par une loi physique, qu'il faut donc connaître ou proposer.
- *Prédire les conséquences* de l'évolution future d'un système, c'est :
    - décrire les états futurs du système, avec la précision attendue des valeurs de leurs paramètres ;  
si cette précision n'est valable qu'à un horizon limité – comme c'est le cas pour le déplacement d'une particule atomique dont le paquet d'ondes s'étale progressivement, ou pour un système dynamique chaotique – chiffrer cet horizon ;
    - évaluer les interactions de ce système avec son environnement.

### *Différence entre prévoir et prédire*

Dans ce texte :

- *Loi d'évolution d'une situation*  
*Prévoir* une évolution de situation, c'est conjecturer qu'elle se produira par application d'une loi physique connue, la *loi d'évolution* de la situation ; l'évolution est supposée possible, mais non certaine : elle peut n'être qu'une conjecture en fonction des conditions initiales.  
Exemple : je tiens une pierre à la main ; si je la lâche, je prévois qu'elle tombera d'un mouvement uniformément accéléré.  
Prévoir c'est aussi décrire qualitativement l'évolution (comme ci-dessus).
- *Prédire* une situation, c'est annoncer le résultat de l'évolution prévue, et en décrire les détails. Exemple : je prédis que la pierre tombera à la hauteur précise  $h$  (à  $\Delta h$  près) à l'instant  $t$  (à  $\Delta t$  près).
  - En physique macroscopique la prédiction porte sur une situation unique, précise ;
  - En physique atomique (et en utilisant la Mécanique quantique, son outil de calcul), la prédiction porte sur un ensemble de valeurs, chacune associée à une probabilité ou une densité de probabilité :  
La Mécanique quantique substitue une probabilité à la certitude du déterminisme scientifique, et un ensemble de résultats d'évolution *possibles* à un résultat unique *certain*.

### *Conséquences déterministes*

**« Le déterminisme entraîne la prévisibilité, mais pas la prédictibilité. »**  
(L'imprédictibilité affecte la physique quantique et les phénomènes chaotiques.)

- Le comportement évolutif d'un système déterministe est prévisible par définition, mais il peut :
  - ne pas être prédictible, par exemple s'il est chaotique : nous verrons cela à propos des systèmes dynamiques ;
  - n'être prédictible qu'en tant qu'élément indéterminé d'un ensemble prédictible, s'il est à l'échelle atomique où l'interprétation des lois d'évolution est celle (statistique) de la Mécanique quantique.
- La loi d'évolution d'une situation donnée ne dépend pas du système d'axes de référence (le référentiel).

On peut *prévoir* la même évolution selon cette loi dans tout référentiel. Mais *prédire* les résultats numériques de cette loi dépend de la position et du mouvement relatif de l'observateur-prédicteur par rapport au référentiel où l'évolution a lieu. Ce sujet est abordé dans [0] à propos de la *Relativité restreinte*.

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

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

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

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

### *Critique des raisonnements par chaînes de causalité*

Cette remarque implique une critique du modèle d'évolution causale de philosophes comme Kant, qui ne raisonnent qu'avec des chaînes de causalité faites de situations successives distinctes dans le temps. Leurs raisonnements souffrent alors de problèmes de commencement et de fin du temps (à une certaine date ?, à l'infini ?). Ils souffrent aussi de problèmes de causalité, dus à l'incompatibilité formelle entre la continuité de l'évolution et la discontinuité des instants de jugement. Avec une chaîne causale de situations distinctes la situation infiniment lointaine dans le passé ou l'avenir n'existe pas (de même que l'infini n'est pas un nombre).

Des questions comme « le monde a-t-il un commencement, une fin ? » et « y a-t-il une cause première, une fin ultime ? » doivent donc s'étudier comme une fonction continue du temps lorsque celui-ci tend vers l'infini du passé ou du futur, en prenant en compte les possibilités de convergence et de divergence de la loi d'évolution à distance finie ou à l'infini. Les études de phénomènes continus par raisonnement

philosophique à étapes purement logiques butent sur des paradoxes comme le *Paradoxe d'Achille et de la tortue*.

#### *Paradoxe d'Achille et de la tortue*

Au V<sup>e</sup> siècle avant J.-C. le philosophe grec Zénon « démontrait » que le mouvement n'existe pas objectivement en disant ceci :

"Le rapide Achille ne peut rattraper une tortue partie avant lui parce que, tandis qu'il parcourt la distance initiale qui le sépare de la tortue, celle-ci avance et franchit un nouvel intervalle qu'Achille doit franchir à son tour, etc. Le nombre d'étapes de rattrapage d'Achille est donc infini, même si chacune ne dure qu'un instant. Il ne peut rattraper la tortue car pour une infinité d'instantes il faut un temps infini."

Et Zénon, qui ne connaissait pas les notions mathématiques de suite et série convergentes, en déduisait que le mouvement n'existe pas objectivement !

#### *Voici la solution mathématique*

Soit  $D$  la distance initiale entre Achille et la tortue au départ de la course (instant 0). Achille court à la vitesse constante  $V$  et la tortue à la vitesse constante  $v$ .

Achille met un temps  $t_0 = \frac{D}{V}$  pour atteindre la position de la tortue à l'instant 0.

Mais pendant le temps  $t_0$  la tortue a parcouru une distance  $vt_0 = v\frac{D}{V}$ . Achille

parcourt cette nouvelle distance en un temps  $t_1 = \frac{v\frac{D}{V}}{V} = v\frac{D}{V^2}$ . Pendant le temps  $t_1$

la tortue parcourt  $vt_1$  qu'Achille parcourt ensuite en un temps  $t_2 = \frac{vt_1}{V} = v^2\frac{D}{V^3}$ ,

etc. On voit qu'après le temps initial  $t_0 = \frac{D}{V}$  Achille met des temps successifs en

progression géométrique de raison  $\frac{v}{V}$  dont le total est  $T = \frac{D}{V} (1 + \frac{v}{V} + \frac{v^2}{V^2} + \dots)$ .

Posons donc  $x = \frac{v}{V}$  et soit la somme  $S_n = 1 + x^1 + x^2 + x^3 + \dots + x^n$  où  $x < 1$ .

Donc  $xS_n - S_n = x^{n+1} - 1$ , d'où  $S_n = \frac{x^{n+1}-1}{x-1}$ .

Lorsque  $n$  tend vers l'infini  $x^{n+1}$  tend vers 0 et  $S_n$  tend vers  $\frac{1}{1-x}$  : la somme  $S_n$  n'est pas infinie, elle est *convergente*. Si, par exemple, Achille va 10 fois plus vite que la tortue,  $S_n$  tend vers  $\frac{1}{1-0.1} = 1.11$  et Achille rattrapera la tortue en un temps  $= 1.11\frac{D}{V}$ , puis il la dépassera.

#### Les deux types fondamentaux d'objets de la physique

La physique n'a que deux types d'objets qui évoluent, la masse-énergie et la charge électrique. Il n'y a donc que deux groupes fondamentaux de lois d'évolution : le groupe des lois de Newton et celui des équations de Maxwell ; toutes les autres lois de la physique macroscopique régies par le déterminisme scientifique s'en déduisent, les lois de la thermodynamique relevant du déterminisme scientifique.

Et compte tenu du *Principe de correspondance*, les lois de la physique quantique s'en déduisent également.

**« Les évolutions macroscopiques n'ont pour lois fondamentales que celles de Newton et Maxwell. »**

(attention : il y a une différence entre ces évolutions et les changements d'état.)

Conséquence : les propriétés déterministes des lois d'évolution de la physique seront celles de ces lois et équations fondamentales de la masse-énergie et des charges.

### Lois d'évolution régies par le déterminisme scientifique

Le déterminisme scientifique régit donc toutes les lois d'évolution macroscopiques conservatives appartenant à l'un au moins des deux types fondamentaux précédents. Il régit aussi les lois de la thermodynamique, simples statistiques sur des considérations macroscopiques d'énergie et d'information. Il régit, enfin, les lois de la Relativité restreinte et de la Relativité générale.

### Portée du déterminisme : locale ou globale

Le déterminisme *local* régit le passage d'une situation de départ à une situation d'arrivée sous l'effet d'une loi d'évolution locale (qui s'applique à la situation de départ indépendamment des situations qui l'ont précédée). Son application est de proche en proche.

Mais la forme locale n'est pas la seule que le déterminisme peut prendre. Il peut aussi, en agissant de manière plus *globale* :

- *Choisir une loi d'évolution parmi plusieurs possibles, comme dans le Principe de moindre action de Maupertuis, le Principe de Fermat et les Quasi-cristaux* décrits en détail dans [0].

Mais le *Principe de correspondance* (décrit dans [0]) fait qu'aucune loi de portée donnée ne peut faire évoluer une même situation de manière différente de celle d'une loi d'une autre portée : la nature est cohérente et l'homme postule des lois cohérentes.

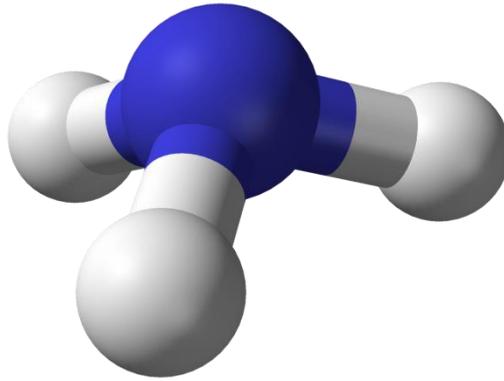
- *Grouper un certain nombre de variables, en précisant une loi d'évolution globale qui interdit de connaître l'évolution d'une des variables prise isolément ; c'est le cas avec le déterminisme statistique, les variables complémentaires de la Mécanique quantique [0] et ses particules corrélées (intriquées).*

## **Déterminisme statistique**

Nous avons vu que la décomposition radioactive naturelle nécessite un déterminisme différent du déterminisme philosophique. Voici un autre phénomène dans le même cas : la formation de la molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$ .

### Formation de la molécule d'ammoniac en superposition d'états

Dans une molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$  les 4 atomes sont reliés par des forces électriques, les liaisons chimiques ; celles-ci imposent une structure où l'atome d'azote N est à une certaine distance du plan des 3 atomes d'hydrogène H, et à égale distance de chacun. Les calculs de Mécanique quantique montrent que, lors de la synthèse de la molécule, il y a deux positions possibles de l'atome d'azote, de part et d'autre du plan des trois atomes d'hydrogène.



Molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$  – Bleu : atome d'azote N – Gris : atomes d'hydrogène H  
(un seul des deux états possibles est représenté : N au-dessus du plan des H)  
Les liaisons chimiques entre l'azote et chaque hydrogène partagent un électron

Ces calculs ont deux solutions, correspondant à une molécule *qui existe dans deux états possibles*. L'état de la molécule  $\text{NH}_3$  à la fin de sa formation est un état particulier de la matière appelé *superposition quantique d'états* ou plus simplement *superposition d'états*.

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

#### Une superposition d'états est un état particulier de la matière

Une superposition d'états d'une particule ou d'un système de particules est l'état (comme les états solide, liquide, gaz et plasma) à la fin de l'évolution ou de la formation. Les divers états quantiques simultanés issus de cette évolution partagent une même masse-énergie et quelques autres propriétés, toutes existant aussi à l'échelle macroscopique. Du fait de ce partage de propriétés physiques et mathématiques, la superposition quantique d'états est dite *cohérente*. Mais nous allons voir que ce n'est pas un état structuré de la matière.

#### *Fragilité d'une superposition d'états*

Cet état est très fragile parce qu'il n'a aucune énergie de liaison. Il n'a pas, comme dans une molécule d'oxygène  $\text{O}_2$ , une énergie potentielle négative liant les atomes d'oxygène, énergie qu'il faudrait fournir pour séparer la molécule en ses deux atomes.

Une telle énergie n'a pas été dégagée lors de la formation de la superposition, par exemple sous forme d'émission de photon : elle aurait fait partie de l'évolution terminée en superposition et nous n'en avons pas supposé ou constaté l'existence dans les évolutions à l'échelle atomique.

La superposition d'états existe donc à la fin de l'évolution d'une façon instable, et toute énergie macroscopique échangée avec le système en séparera immédiatement les éléments.

Une superposition d'états a donc une très courte durée de vie : une légère friction avec l'échelle macroscopique suffit pour la détruire, la réduisant à l'un de ses états constitutifs impossible à connaître d'avance ; il y a eu, alors, une *transition d'état* régie par une loi d'interruption (notion décrite plus bas). Cette transition est qualifiée de *décohérence*.

**« La matière-énergie peut aussi exister en superposition d'états quantiques, état non structuré donc infiniment fragile. »**

**« Le résultat d'une évolution à l'échelle atomique peut être une superposition d'états quantiques partageant notamment une même masse-énergie. »**

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

La superposition quantique d'états est mise en évidence dans certaines expériences de physique atomique en tant que résultat d'évolution [200], mais l'homme ne peut jamais en voir une physiquement, ses états sont virtuels. Toute tentative humaine de voir (à l'échelle macroscopique, par exemple lors d'une mesure) une superposition quantique d'états implique un échange d'énergie, qui la perturbe suffisamment pour la décomposer en ne retenant qu'un seul de ses états cohérents, état qui devient seul visible : il y a eu *décohérence*.

La "durée de vie" d'une superposition d'états est d'autant plus courte que le système considéré interagit fortement (par exemple thermiquement) avec son environnement, la rendant ainsi instable.

Cette perturbation n'est pas décrite par la loi d'évolution qui a produit la superposition. Son résultat ne peut donc être prédit par elle ; elle ne peut jamais être décrite, car elle met en jeu une énergie macroscopique distincte des énergies de l'expérience à l'échelle atomique. Le choix de l'état visible qu'elle produit parmi les états superposés n'est donc pas prévisible, car la perturbation finale ne peut être décrite avec précision.

Cette imprédictibilité a été à tort attribuée par certains à la loi d'évolution, qu'on a de ce fait qualifiée de non-déterministe, alors que le déterminisme ne peut évidemment concerner que des évolutions que l'on peut décrire fidèlement et qui sont, de ce fait, reproductibles.

La loi d'évolution qui s'applique à une situation donnée crée l'ensemble des états superposés résultants : on connaît tous les éléments-états de cet ensemble dès le déclenchement de l'évolution, et cet ensemble persistera pendant toute l'évolution ; ainsi une molécule  $\text{NH}_3$  qui vient de se former est un ensemble d'états cohérents à 2 molécules-éléments : la molécule avec atome d'azote *au-dessus* du plan des hydrogènes et la molécule avec atome d'azote *au-dessous* du plan des hydrogènes. Une mesure ou une perturbation d'énergie choisira de manière imprévisible un de ces états, celui qui sera visible et persistera à l'échelle macroscopique.

Autre exemple naturel de superposition d'états : le neutrino.

Dans le cas de la décomposition radioactive de l'uranium, la loi d'évolution s'applique, à chaque instant, à la population de  $N(t)$  atomes  $^{238}\text{U}$  non encore décomposés : le nombre de décompositions par unité de temps est proportionnel à  $N(t)$ , voir loi ci-dessous.

*Loi d'évolution d'une décomposition radioactive*

**« Dans une population d'atomes donnée d'un élément radioactif, 50% se décomposent au bout d'un temps fixe  $\tau$  appelé *demi-vie* de cet élément. »**

Le nombre  $N(t)$  d'atomes non décomposés d'un échantillon qui en comptait  $N_0$  à l'instant  $t=0$  décroît selon la loi exponentielle :

$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ , où :

- $\lambda$  est appelée "constante de décomposition" ;
- la date-heure à laquelle le nombre d'atomes non encore décomposés est 50% de  $N_0$  est  $\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$  où  $\ln 2$  est le logarithme népérien de 2 : 0.692.

Cette loi est *statistique* : la proportion « 50% en  $\tau$  secondes » est la limite de la moyenne des proportions observées lorsqu'un nombre d'échantillons tend vers l'infini.

L'isotope  $^{238}\text{U}$  n'est pas le seul à se décomposer spontanément. En voici quelques autres, avec les demi-vies correspondantes :

Isotope	Elément	Demi-vie (années)
$^3\text{H}$	Tritium	12.3
$^{90}\text{Sr}$	Strontium	28.9
$^{232}\text{U}$	Uranium	68.9
$^{14}\text{C}$	Carbone	5730
$^{239}\text{Pu}$	Plutonium	24110
$^{230}\text{Th}$	Thorium	75400
$^{244}\text{Pu}$	Plutonium	$80 \cdot 10^6$
$^{238}\text{U}$	Uranium	$4.47 \cdot 10^9$
$^{50}\text{V}$	Vanadium	$1.4 \cdot 10^{17}$

Demi-vies de divers isotopes  
En comparaison : l'âge de l'Univers est  $4.6 \cdot 10^9$  années

Enfin, quelques isotopes se décomposent vite : l'einsteinium  $^{253}\text{Es}$  en 20.5 jours, le mendélévium  $^{256}\text{Md}$  en 78 minutes et l'ununhexium  $^{293}\text{Uuh}$  en 6 millisecondes.

### Conclusions physiques

La nature n'a pas – et ne peut avoir, on l'a démontré - de loi permettant de connaître le moment où *un* atome particulier se décomposera, ou de savoir *quel* est le premier atome d'un échantillon qui se décomposera : sa loi de décomposition ne s'applique – et ne peut s'appliquer - qu'à *une population* d'atomes.

Dans le cas de la décomposition radioactive on peut *prévoir* une évolution (les produits de la décomposition), mais on ne peut pas *prédire* certains de ses résultats quantitatifs (comme l'heure où un atome particulier se décomposera et l'heure de la première décomposition d'un atome). D'où l'importante conclusion métaphysique :

**« Pouvoir prévoir ne garantit pas de pouvoir prédire »**

Il y a de nombreux phénomènes naturels dont l'évolution peut ainsi être prévue, mais pas prédite. Comme les exemples que l'on peut citer sont à l'échelle atomique, il faut citer l'outil mathématique des lois de physique atomique, la *Mécanique quantique*, qui explique aussi la décomposition radioactive.

### *Conclusions philosophiques*

Le déterminisme naturel peut donc se manifester par de l'instabilité, où l'état présent évoluera *sans cause externe* vers un état plus stable au bout d'un temps plus ou moins long, un phénomène expliqué et chiffré en Mécanique quantique par le *principe d'incertitude de Heisenberg*.

**« L'instabilité de certains corps à l'échelle atomique produit des changements d'état relevant du déterminisme statistique. »**

Nous devons donc en conclure qu'en plus de l'irréversibilité qui l'accompagne parfois, le déterminisme peut être :

- *Ininterrompu*
  - **« Tout système naturel évolue sans cesse, et évoluera jusqu'à la fin des temps, l'équilibre thermodynamique n'étant jamais complètement stable. »** (Tout endroit "vide" de l'Univers reçoit des rayonnements, donc de l'énergie).
  - **« Tout corps rayonne, absorbe et réfléchit sans cesse de l'énergie électromagnétique. »**
- *Multiétapes* (lorsque des décompositions s'enchaînent comme celle de  $^{238}\text{U}$ ).
- *Plus ou moins rapide en ce qui concerne la durée d'une évolution-conséquence* (et la durée est elle-même relative, puisque variant de manière relativiste avec la vitesse de l'observateur : une horloge en mouvement rapide tourne plus lentement qu'une horloge au repos) ;
- *Stochastique*, en ce sens que nul ne peut prédire l'ordre dans lequel les noyaux d'un objet se décomposeront, ni l'instant où un noyau donné se décomposera ; la loi de décomposition s'applique à une population, pas à un de ses éléments.

La causalité qui agit dans la décomposition de noyaux ou de particules ne s'explique pas parfaitement de nos jours.

Son effet se modélise cependant en faisant intervenir des mécanismes de liaison entre nucléons (=protons ou neutrons) comme la tension superficielle d'une goutte de liquide, la répulsion électrostatique (force de Coulomb), la force nucléaire et la force faible.

On sait malgré tout que certains noyaux lourds, synthétisés à l'origine dans des supernovas (=explosions stellaires), ont une faible énergie de liaison par nucléon. Si un tel noyau est déformé - par exemple par un choc ou par une forte agitation thermique de ses nucléons - la répulsion entre ses protons amplifie la déformation : le noyau lourd a tendance à se rompre. Et comme une décomposition de noyau se fait avec perte de masse, donc dégagement d'énergie et augmentation de l'entropie, il peut y avoir fission spontanée.

*L'instabilité énergétique n'est pas une cause agissante, c'est une propriété ; et la conséquence - qui n'apparaît qu'au bout d'un certain temps, d'ailleurs variable - n'agit pas sur un noyau ou une particule donnée, mais statistiquement sur un nombre de noyaux ou de particules. Nous touchons là aux limites des postulats de causalité et de déterminisme, certaines propriétés des évolutions-conséquences étant imprévisibles au niveau atomique ; la solution philosophique est l'existence des lois d'interruption dans le cadre du déterminisme étendu. Pour le moment retenons que :*

**« Certains effets déterministes ne peuvent être décrits correctement que de manière statistique portant sur toute une population, pas sur un élément individuel. ».**

### Décohérence

#### *Définition*

Une décohérence est une transformation fondamentalement différente de l'évolution réversible régie par l'équation de Schrödinger qui l'a précédée, car elle est pratiquement irréversible : c'est une transition d'état faisant passer le système de l'état virtuel instable de superposition à un de ses états quantiques. C'est un cas de transformation où l'imprédictibilité intervient (par déterminisme statistique, c'est-à-dire sous forme de choix imprédictible d'une valeur de variable appartenant à un ensemble prédéterminé).

Autre exemple d'imprédictibilité, les fluctuations quantiques sont des phénomènes sans cause préalable qui ne sont pas des évolutions, parce qu'ils résultent d'indéterminations intrinsèques (instabilité due au principe d'incertitude de Heisenberg) échappant au concept même de causalité. Voir *Résumé des cas d'imprédictibilité*.

#### *Instabilité*

Une superposition d'états se décompose assez vite en interagissant avec son environnement, par exemple sous forme d'échange de chaleur. Voir l'article *Du monde quantique au monde macroscopique : la décohérence prise sur le fait* [200]. Plus le système est grand et lourd, plus il est instable. C'est pourquoi on ne constate jamais d'état superposé macroscopique.

**« La superposition d'états ne peut être stable qu'à l'échelle atomique. »**

#### *Durée de récurrence de Poincaré*

En théorie, la stabilité d'un système macroscopique issu d'une décohérence n'est pas éternelle. Le *Théorème de récurrence de Poincaré (quantique)* [315] montre qu'à très long terme (des milliards d'années, par exemple) un tel système peut spontanément redevenir cohérent et reprendre sa forme superposée : il existe une durée finie  $T$  (dite « période de récurrence ») au bout de laquelle l'état quantique d'un système dont le spectre d'énergies est discret doit redevenir arbitrairement proche de l'état superposé initial. Mais l'événement est si rare qu'on n'en a pas observé.

Du point de vue thermodynamique, la décohérence augmente l'entropie du système. Mais compte tenu du théorème de récurrence ci-dessus, la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique (qui impose à l'entropie d'augmenter) ne s'applique que pendant des durées très inférieures à la durée de récurrence : en attendant assez longtemps nous verrons l'entropie diminuer aussi souvent qu'elle augmente ([313] page 158).

**« L'augmentation de l'entropie thermodynamique dure beaucoup moins longtemps que la période de récurrence, et finit par s'inverser après une attente suffisante. »**

#### *Réduction de la fonction d'onde*

Le passage d'une superposition d'états à un de ses états réduit cette superposition à un état unique stable visible à l'échelle macroscopique. Il réduit la fonction d'onde cohérente du système complet {objet en états superposés + dispositif de mesure} à

celle d'une valeur propre particulière d'une observable du dispositif, d'où le nom de *décohérence* : il choisit l'une des valeurs propres, correspondant à l'un des objets superposés, lui attribue les paramètres globaux de l'objet initial comme la masse-énergie, et le laisse subsister de façon stable à l'échelle macroscopique. Il est impossible de prévoir lequel des objets superposés sera choisi, car on ne peut décrire avec précision les paramètres de la perturbation macroscopique infligée à la superposition à l'état atomique par la décohérence, perturbation qui crée l'état unique observé à partir de la superposition.

**« Un objet macroscopique est dans un état quantique unique et stable. »**

Au point de vue dualité onde-particule (que nous verrons plus bas) où la théorie des ondes de matière de De Broglie attribue à tout système matériel à la fois un comportement corpusculaire et un comportement ondulatoire, la réduction de la fonction d'onde supprime le comportement ondulatoire qui introduisait une incertitude ou une instabilité sur la valeur d'une variable et ne laisse subsister que l'état macroscopique sans incertitude.

### Multiplicité des résultats d'évolution

La superposition des états d'un système résultant d'une évolution existe aussi sous forme de valeurs probabilistes de variables comme la position ou la vitesse. Une particule qui s'est déplacée se trouve *simultanément*, au temps  $t$ , non pas à une mais à une infinité de positions voisines.

#### *Probabilité de présence au point Q*

Chacune de ces positions, par exemple au point Q, est affectée d'une densité de probabilité de présence  $p(Q)$  permettant de calculer la probabilité de présence dans un volume  $dV$  autour de Q par le produit  $p(Q)dV$ .

#### *Exemple*

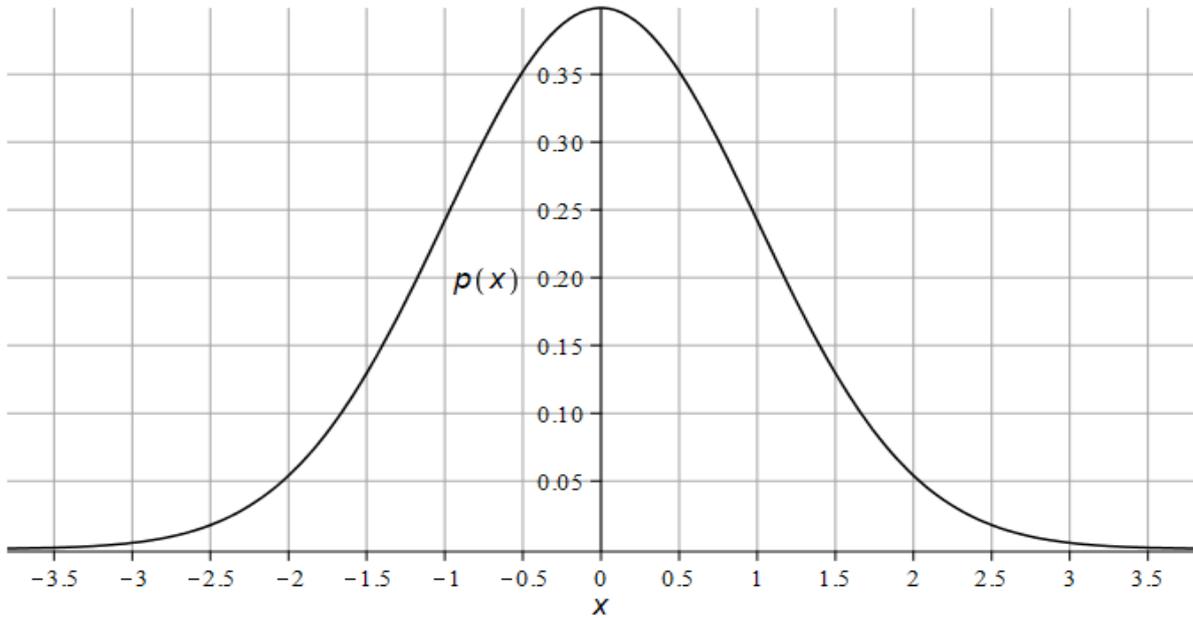
Soit un espace à une dimension, où la position d'un point Q est repérée par son abscisse  $x$ . La fonction connue sous les noms de "Loi de Gauss" ou "Loi de distribution normale" :

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

représente une *densité de probabilité* au voisinage du point d'abscisse  $x$  telle que la probabilité de trouver Q entre  $x = a$  et  $x = b$  est :

$$p(a \leq x \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Voici la représentation graphique de la densité de probabilité  $p(x)$  :



Densité de probabilité  $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ . La position moyenne est  $x=0$

La probabilité d'une position  $x_0$  dans l'intervalle de largeur  $dx$  centré sur  $x_0$  est:

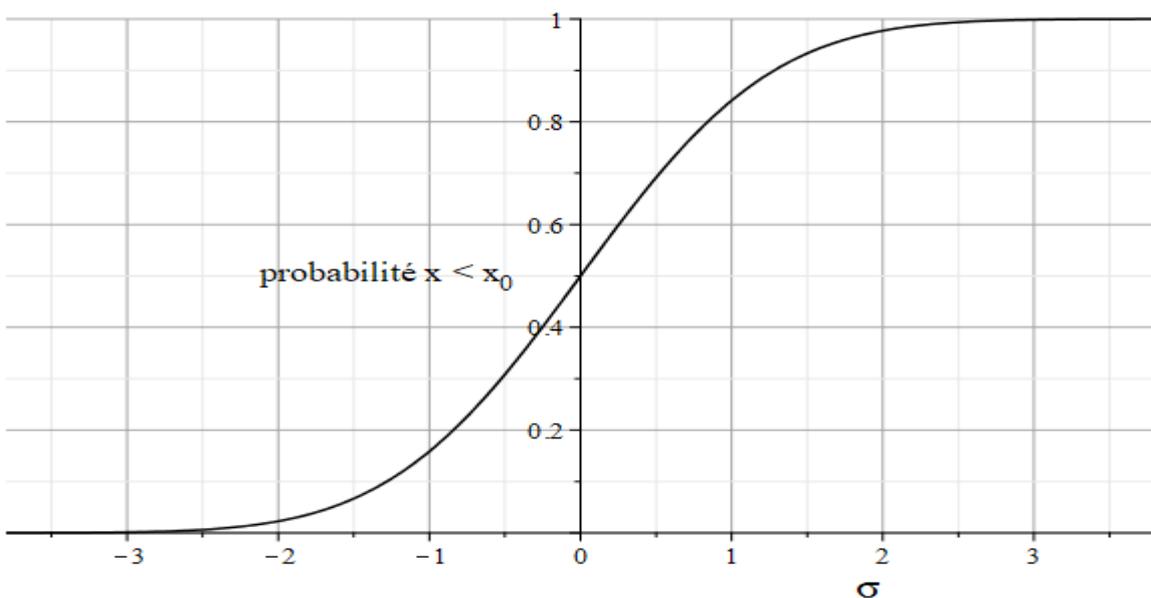
$$\text{prob}\left(x_0 - \frac{dx}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{dx}{2}\right) = p(x_0)dx$$

La certitude de trouver  $x$  *quelque part* ( $-\infty < x < +\infty$ ) résulte de l'égalité :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1$$

La probabilité de trouver une valeur  $x$  inférieure à  $x_0$  suit la loi de Gauss :

$$\text{prob}(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_0} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$



Loi de Gauss : probabilité d'une position  $x < x_0$  (position moyenne  $x=0$ )

On peut interpréter la multiplicité des positions d'une particule en fin d'évolution :

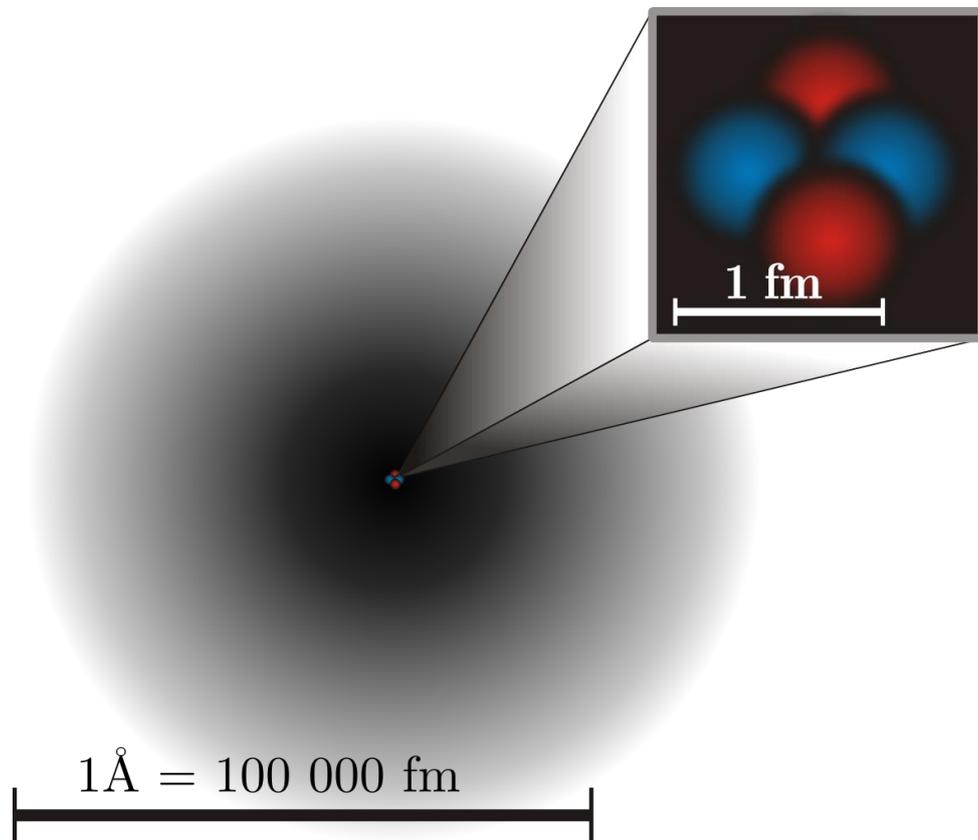
1. soit comme une présence plus probable là où la densité de probabilité est la plus élevée ;
2. soit comme une présence simultanée dans tout l'espace, donnant une image floue mais plus nette là où la densité de probabilité est la plus élevée ;
3. soit comme les diverses positions possibles si l'on refait l'expérience un grand nombre de fois, certaines étant plus probables que d'autres. C'est là une *prédiction probabiliste de position* dont il existe une loi équivalente pour les vitesses :

**« A l'échelle atomique, les positions et les vitesses sont probables, jamais certaines. »**

### Exemple

Dans la figure ci-dessous, la densité de probabilité de présence des deux électrons du nuage électronique d'un atome d'hélium  ${}^2\text{He}$  dans une petite zone est d'autant plus forte que cette zone est plus foncée (qu'elle comprend plus de points). Le noyau (2 protons + 2 neutrons) est au centre.

Le carré en haut à droite représente la densité de probabilité de présence des deux protons dans le noyau. Un atome d'hélium a une taille de l'ordre de l'angström ( $10^{-10}$  m), tandis que son noyau est 100 000 fois plus petit, avec une taille de l'ordre du fermi ( $10^{-15}$  m).



Atome d'hélium : densité de probabilité de présence des 2 électrons autour du noyau  
© Wikimedia Commons

## Les indéterminations de la Mécanique quantique

A un instant donné, non seulement la position d'une particule est incertaine, mais sa vitesse l'est également.

**« A un instant donné la position et la vitesse sont probabilistes, donc incertaines. »**

Pire encore, il est impossible de connaître simultanément avec précision la position  $x$  et la quantité de mouvement  $p=mv$  selon un axe quelconque d'une particule de masse  $m$  et vitesse  $v$  : le produit de leurs imprécisions  $\Delta x$  et  $\Delta p$  a une borne inférieure donnée par le Principe d'incertitude de Heisenberg, démontré en Mécanique quantique :

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$$

où  $\hbar$  ("h barre") est une constante telle que  $\frac{1}{2} \hbar = 0.527 \cdot 10^{-34}$  joule.seconde.

La masse étant toujours constante en Mécanique quantique car non-relativiste, c'est la vitesse qui est d'autant plus imprécise que l'imprécision sur la position est faible, et réciproquement. Et il y a d'autres couples de variables soumises à la même limitation : voir en annexe *Principe d'incertitude de Heisenberg*.

**« Certains couples de variables ont des erreurs de détermination dont le produit a une borne inférieure. »**

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

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

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

**« Contrairement à la physique macroscopique, aucune observable de physique quantique n'a une valeur indépendamment de sa mesure. »**

Il est important de comprendre que la mesure *crée* le résultat, elle ne *révèle* pas un résultat préexistant. Ce qui préexiste est l'ensemble des résultats *possibles* de l'évolution, ensemble de valeurs propres d'une observable qui a la masse de départ du système avant évolution. Cette évolution, régie par l'équation de Schrödinger, crée cet ensemble en superposition, tous ses éléments existant ensemble et partageant une même énergie et d'autres propriétés (ce qu'on appelle la cohérence). Ce que la Mécanique quantique affirme et que l'équation de Schrödinger produit est cet état superposé, réalité de la matière-énergie qu'on peut mettre en évidence à l'aide de dispositifs expérimentaux ad hoc [200].

Ce résultat est donc un état *virtuel* de la matière, impossible à voir car :

- Il n'a pas été matérialisé par une interférence avec l'environnement du système ;
- Une telle interférence ne peut créer, par décohérence, qu'un état existant de la matière correspondant à une des valeurs propres possibles.

## Valeurs propres orthogonales et interférences

Source [301].

La superposition d'états produite par l'évolution en application de l'équation de Schrödinger n'est pas visible : on n'en verra l'état choisi qu'après une interaction avec l'environnement, par exemple lors d'une mesure. Il y a alors deux cas :

- Ou les états quantiques en superposition sont indépendants (on dit "orthogonaux") et l'interaction a produit une des valeurs propres possibles, dans un état physique visible à l'échelle macroscopique (dans la molécule d'ammoniac l'atome d'azote sera au-dessus ou en dessous du plan des trois hydrogènes ; le chat de Schrödinger sera mort ou vivant) ;
- Ou ces états quantiques interfèrent entre eux parce qu'ils ne sont pas indépendants, ce qui change la distribution de leurs probabilités d'occurrence. L'interaction a encore produit une des valeurs propres possibles ; l'effet des interférences a simplement changé les probabilités de ces valeurs propres. Cette distribution de probabilités différente est la seule manifestation des interférences, les états finaux possibles étant les mêmes qu'en son absence.

## Processus du choix de l'état décomposé d'une superposition

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

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

Dans tous les cas, la mesure amplifie l'énergie qu'elle échange avec le dispositif expérimental dont elle fait partie : sans cette amplification l'homme ne pourrait rien voir, ses sens n'étant pas assez sensibles. Or cette amplification met en jeu une énergie beaucoup plus importante que celle de l'échelle atomique, énergie qui ne fait pas partie de l'expérience, qui n'est pas intervenue dans l'évolution de celle-ci, dont la loi d'évolution ne peut donc tenir compte. Et comme il est impossible de mesurer cette énergie perturbatrice, l'élément qu'elle choisit dans l'ensemble qu'est la superposition d'états est imprévisible : voilà pourquoi des gens qui ne connaissent pas l'explication précédente parlent à tort de valeur au hasard.

### *La décohérence vue par la Mécanique quantique relationnelle*

Puisqu'avant une mesure son résultat n'existe pas, et que toute évolution décrite par l'équation de Schrödinger se termine par une décohérence non déterministe, on peut changer la définition de l'évolution en postulant qu'elle se termine *toujours* par cette décohérence. On n'a plus, alors, de raison de parler de réduction de la fonction d'onde : la fin de l'évolution choisit une des valeurs propres de l'observable et l'état correspondant du système devient alors visible. Il n'y a plus de perturbation par friction avec l'échelle macroscopique, parce qu'on ne « voit » pas le choix se faire et qu'il n'échange aucune énergie avec l'énergie d'évolution de l'équation de Schrödinger.

Cette interprétation de la décohérence, donc de la mesure quantique, est celle de la Mécanique quantique relationnelle. Voir aussi [301].

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

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

### Les deux sortes de changements physiques : transitions et évolutions

La nécessité d'échanger de l'énergie pour mesurer quelque chose est une conséquence du fait qu'il n'y a que deux sortes de changements physiques :

- Les transitions (changements d'état) comme le gel de l'eau, la décohérence ou la décomposition radioactive, qui ne sont visibles que par l'intermédiaire de photons porteurs d'énergie dont la capture perturberait l'expérience à l'échelle atomique ;
- Les évolutions proprement dites, toujours continues et accompagnées d'un échange d'énergie.

**« Il n'y a que deux sortes de changements physiques :  
les changements d'état et les évolutions proprement dites. »**

Un rayon lumineux (fut-ce un photon unique) réfléchi par un miroir transfère une impulsion à ce miroir, donc une énergie qui compte à l'échelle atomique. A l'échelle macroscopique, la propagation de la lumière - même soumise à des réflexions et réfractions - n'est ni une évolution ni un changement d'état, bien qu'elle transporte de l'énergie électromagnétique et de l'information.

C'est pourquoi les physiciens affirment que :

**« Tout transfert d'informations est accompagné d'un transfert d'énergie et réciproquement. »**

Voir aussi dans [0] *Principe de conservation de l'information d'un système fermé.*

### Définition du déterminisme statistique

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

Le déterminisme le plus simple, qui permet à la fois la compréhension, la prévision et la prédiction d'une évolution est le déterminisme scientifique. Le déterminisme statistique n'existe que pour les évolutions à résultats multiples appartenant à un ensemble défini au début de l'évolution.

### Lois d'évolution régies par le déterminisme statistique

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

- Dont les éléments sont prédictibles :
  - Chacun avec une probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles discrets ; exemple : 2 états équiprobables dans le cas de l'ammoniac ;
  - Chacun avec une densité de probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles continus (voir *Densité de probabilité*).
- Dont les éléments :
  - Soit sont des états finaux d'une évolution itérative périodique, allant vers des attracteurs ou à prédictibilité statistique ;
  - Soit coexistent en superposition cohérente avant de subir une décohérence ; celle-ci choisit un des éléments de manière nécessairement imprédictible (comme pour l'ammoniac) ;
  - Soit ont déjà subi par décohérence un choix stochastique produisant un élément unique (comme dans le cas d'un lancer de dé).

En plus des lois d'évolution macroscopique conservatives régies par le déterminisme scientifique, le déterminisme statistique régit les lois de l'échelle atomique. Il régit pour cela les outils de calcul que sont la Mécanique quantique, dont l'équation fondamentale est celle de Schrödinger. Il régit aussi l'Electrodynamique quantique et la Chromodynamique quantique. Il régit, enfin, les systèmes dynamiques (chaos).

#### *Continuité et ininterrompibilité : définitions*

La continuité est, pour nous, une propriété de fonction d'évolution.

Une fonction numérique  $f(x)$  définie sur un intervalle  $I$  est continue au point  $x_0$  si  $f(x) \rightarrow f(x_0)$  quand  $x \rightarrow x_0$ . (Le symbole  $\rightarrow$  signifie « tend vers »).

Une telle fonction n'existe que lorsque l'évolution est soumise à une loi, mais lorsqu'elle existe son application est ininterrompible tant que sa cause existe.

L'ininterrompibilité décrit la conséquence d'une cause suffisante : tant que la cause existe sa conséquence est certaine, elle ne peut être interrompue.

Affirmer l'ininterrompibilité c'est donc affirmer l'existence d'une conséquence, mais pas nécessairement que cette conséquence est une évolution soumise à une loi ; il pourrait, par exemple, s'agir d'un changement d'état qui se poursuivra tant que sa cause existera. Tant que la température de l'eau est 100°C l'eau bout et n'arrêtera pas de bouillir tant que sa température sera celle-là.

#### *Postulat de continuité (ininterrompibilité)*

*La continuité d'une cause entraîne celle de la loi d'évolution qui en résulte*

Cette continuité causale entraîne celle des lois d'évolution de la nature : si une cause suffisante a pour conséquence l'application d'une loi d'évolution, cette loi doit rester active aussi longtemps que sa cause, ni plus ni moins, d'où le postulat de continuité :

**« Toute loi d'évolution s'applique sans discontinuer aussi longtemps que sa cause suffisante existe. »** (Aucune interruption n'est possible)

#### Le déterminisme statistique régit aussi les transitions d'état

La radioactivité, évoquée précédemment, provoque des décompositions qui ont un caractère à la fois prévisible et imprédictible.

Les éléments produits par la décomposition d'un noyau ou d'une de ses particules (proton ou neutron) sont parfaitement prévisibles, ainsi que les émissions de rayonnements qui les accompagnent :

**« Une décomposition n'est pas l'évolution d'une particule, mais sa transformation en un ensemble connu d'autres particules. »**

Conclusion métaphysique :

**« Une situation d'un système peut avoir pour conséquence un changement d'état (décomposition, fusion, liquéfaction, etc.), et pas seulement une évolution continue. »**

### Structure hiérarchique des lois du déterminisme

L'instant de décomposition d'un noyau d'uranium  $^{238}\text{U}$  ne peut être prédit, car il ne résulte pas d'une *loi de transition* calculable, mais d'une *condition de stabilité* entre forces antagonistes ; par nature celles-ci varient continuellement sans cause externe, et on ne peut les déterminer à un instant  $t$  précisément parce que leurs intensités instables rendent une telle détermination impossible. Retenons que :

**« Il existe des situations instables où une transition d'état peut survenir sans cause externe, à un instant imprévisible. »**

Cette transition *au niveau d'un atome* échappe donc au déterminisme philosophique et au déterminisme scientifique. Mais il existe une loi statistique régissant *une population d'atomes*, et cette loi est régie par le déterminisme statistique.

Contrairement à une évolution, qui a une loi *calculable*, une transition d'état a une loi *descriptive* comme "liquide  $\rightarrow$  vapeur" ou " $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$ ".

L'instabilité précédente est donc un exemple de condition régissant une loi de transition d'état, *condition d'un niveau supérieur à elle*. Cette condition est d'une nature fondamentalement différente de la loi de transition qu'elle régit ; elle comprend un test de la forme :

<Si telle condition est remplie>

et une conséquence qui dépend du résultat du test, de la forme :

<Si le résultat est OUI effectuer ou empêcher telle action>

<Si le résultat est NON effectuer ou empêcher telle autre action>.

Les évolutions régies par le déterminisme seront donc décrites, en plus des formules de calcul du déterminisme statistique (et de son sous-ensemble le déterminisme scientifique), par des conditions d'application de lois de transition d'état. D'où la conclusion métaphysique :

**« La nature a des conditions d'application des lois de transition d'état : nous les appellerons *lois d'interruption*. »**

Une loi d'interruption permet ou empêche, démarre ou interrompt l'application d'une loi de transition, selon les circonstances. Muni de ces deux types de lois, le déterminisme global sera de plus haut niveau que les déterminismes scientifique et statistique, c'est-à-dire un sur-ensemble. Nous en appellerons la doctrine *déterminisme étendu* et nous l'étudierons après les précisions sur la prédictibilité du paragraphe suivant.

## Lois de transformation

Un système peut subir deux sortes de transformations : les évolutions et les transitions (changements) d'état. Pour désigner indifféremment l'une ou l'autre nous parlerons de *transformation* ; il sera donc question de *lois de transformation*, et nous postulerons que toute transformation de système étant régie par une loi, elle respecte la Règle de stabilité.

## Conditions nécessaires pour des résultats prédictibles

Pour qu'une loi d'évolution de la nature produise un résultat prédictible, son caractère déterministe ne suffit pas : savoir qu'un résultat ne dépend que des conditions initiales et d'une loi ne garantit pas son unicité, sa calculabilité et sa précision.

### *A - Il faut d'abord un algorithme de prévision de l'évolution à partir de l'état initial*

L'existence d'une loi d'évolution déterministe implique l'existence d'un « algorithme de prévision en fonction du temps » de l'évolution qui suit un état initial de système, méthode mathématique qui garantit sa calculabilité. Exemples d'algorithme :

1. La deuxième loi de Newton reliant la force  $F$  (vecteur), la masse sur laquelle elle agit  $M$  et l'accélération  $\gamma$  (vecteur) communiquée à cette masse est :  $F = M\gamma$ . L'accélération étant la dérivée seconde de la position par rapport au temps, un calcul de la loi de position met en œuvre une équation différentielle.

Le respect d'une équation (ou d'un système d'équations) différentielle(s) est caractéristique d'une évolution, et présent dans l'expression mathématique de toutes les lois d'évolution régies par les déterminismes scientifique et statistique, à l'exception des lois itératives dont nous verrons des exemples plus bas.

2. Une fonction itérative comme  $f(x) = rx(1-x)$  permettant de calculer les termes successifs d'une suite  $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$  connaissant le coefficient  $r$  et la valeur initiale. On rencontre une telle suite dans un système dynamique.  
Voir ci-dessus *Exemple n°2 : Fonction logistique*.
3. Un système d'équations différentielles comme celui du modèle de système dynamique de Lotka-Volterra (voir [0]).

### *B – Il faut ensuite que cette évolution soit unique*

- L'exemple 1 précédent donne un résultat d'évolution unique pour chaque état initial. Mais à l'échelle atomique où l'évolution d'un système est décrite par l'équation de Schrödinger, les résultats sont des variables stochastiques : la position d'une particule en mouvement n'est pas unique, elle dépend d'une loi de probabilité. Bien que l'équation de Schrödinger soit déterministe, le caractère probabiliste de ses résultats empêche leur prédictibilité, tout en leur imposant des contraintes d'appartenance à un ensemble précis, condition qui les empêche d'être « au hasard ».

La Mécanique quantique, outil mathématique des évolutions à l'échelle atomique, définit un modèle de déterminisme plus riche que le déterminisme scientifique de la physique classique : le *déterminisme statistique*.

- Les exemples 2 et 3 ci-dessus donnent parfois des résultats multiples tels qu'une oscillation périodique entre plusieurs états successifs, ou une évolution vers un cycle limite « attracteur », etc.

Une évolution déterministe produit donc parfois des résultats multiples calculables, éventuellement prédictibles avec des valeurs limites. Ses résultats sont alors soumis au déterminisme statistique.

#### *Remarque sur l'unicité de l'évolution de l'Univers*

L'exigence d'unicité est imposée au modèle d'évolution de l'Univers entier par le déterminisme philosophique de Laplace et l'espace-temps de la Relativité d'Einstein. Laplace (astronome) et Einstein (physicien cosmologiste) avaient en tête un univers déterministe de phénomènes astronomiques. L'unicité implique l'existence d'une chaîne de causalité unique reliant les situations du passé, du présent et de l'avenir.

Cette chaîne de causalité unique de l'enchaînement des situations qui ont existé est un sous-ensemble des chaînes de causalité de l'arborescence des situations possibles, compte tenu des superpositions d'états, des incertitudes de position et vitesse et des transitions d'état imprévisibles. Des possibilités multiples sont apparues chaque fois qu'un résultat d'évolution (ou de transition d'état) a été un élément d'un ensemble de solutions parmi lesquelles la nature a fait un choix non déterministe, par exemple le choix d'un des états d'une superposition par une interaction avec l'environnement.

De toute façon aucune prédiction de résultat n'est possible au-delà d'un nœud d'arborescence : le choix de la branche suivie est parfois fonction de processus non déterministes comme la date d'une décomposition radioactive d'atome ou des raisonnements de l'inconscient humain. Et l'homme agit sur la nature, parfois avec la brutalité d'une explosion atomique.

**Conclusion : « L'évolution globale de l'Univers n'est pas déterministe. »**

#### *C – Il faut, enfin, que le résultat prédit par calcul soit précis*

Du point de vue logique, il faut qu'un résultat d'évolution prédit représentant une grandeur physique puisse être exact, c'est-à-dire que sa définition n'offre aucune indétermination ou ambiguïté.

Cette exigence est incompatible avec la Mécanique quantique, dont les résultats sont entachés d'incertitude probabiliste. En outre, à l'échelle macroscopique, nous verrons que certaines évolutions présentent une *sensibilité aux conditions initiales* qui limite la précision d'un résultat ou son horizon de prédiction même quand les calculs et les données initiales sont précis. D'où la conclusion :

**« Le déterminisme d'une évolution ne garantit pas la prédictibilité des situations futures, bien que celles-ci dépendent d'une loi. »**

Complément : voir au chapitre *Hasard* le paragraphe *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*.

#### Déterminisme des processus itératifs

##### *Systèmes dynamiques*

Les processus itératifs (qui décrivent des *systèmes qualifiés de « dynamiques »*) sont une alternative aux processus continus (ininterrompus) des lois de la nature. Cette alternative a été conçue pour modéliser des évolutions intrinsèquement discontinues,

comme celle d'une population connue seulement par statistiques annuelles. Pour parler de *l'évolution d'un système dynamique* on parle de sa *dynamique*.

#### *Définition d'un processus itératif*

Un processus itératif comprend des étapes successives dont le déroulement et le résultat sont tels que :

- Le déroulement est régi par une loi calculable définie par l'homme ; cette loi définit, pour tout rang  $n$ , le terme de rang  $n+1$  connaissant celui de rang  $n$ . Ce terme de rang  $n+1$  ne dépend que du terme de rang  $n$  ; la loi d'évolution est donc déterministe.
- Le résultat de chaque étape est défini à la fin de cette étape (et pas pendant son déroulement) ;
- L'étape initiale se déroule à partir des conditions initiales, puis les résultats de chaque étape servent de conditions initiales pour l'étape suivante.

#### *Exemple*

Considérons la suite de nombres dont le 1<sup>er</sup> terme est 1 et le terme de rang  $n+1$  est défini à partir de son prédécesseur par la formule  $x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_n + \frac{2}{x_n})$ .

Les termes successifs sont : 1 ;  $\frac{1}{2}(1+2/1)=1.5$  ;  $\frac{1}{2}(1.5+2/1.5)=1.4166$ , etc.

Lorsque  $n$  tend vers l'infini ( $n \rightarrow \infty$ )  $x_n \rightarrow 1.4142135\dots$  qui est la valeur de  $\sqrt{2}$ .

Un tel processus est déterministe, car son déroulement est géré par une loi et ne dépend que des conditions initiales.

Exemple : une population a une croissance naturelle de 1.5% par an, mesurée par des statistiques annuelles. Cette croissance entraîne une consommation croissante d'une ressource naturelle limitée (comme l'eau), consommation mesurée chaque année en même temps que la population. Connaissant la limite de la ressource et la population initiale (de l'année zéro) calculer son évolution à court terme (années 1, 2, 3...) et à long terme.

#### *Une évolution itérative bornée peut produire 4 sortes de résultats et 4 seulement*

Nous verrons en étudiant le *chaos* que l'évolution d'un tel processus déterministe itératif peut, selon le cas, produire après un grand nombre d'itérations :

- un résultat unique fini,
- un résultat infini,
- une oscillation asymptotique entre un certain nombre de résultats,
- ou une suite infinie de résultats uniques.

Nous allons étudier le cas particulier important où le caractère itératif d'une évolution est dû à sa non-linéarité.

#### *Fonction linéaire et fonction non linéaire*

Par définition, une fonction *linéaire*  $F(x)$  de la variable  $x$  est telle que si  $x$  est multiplié par  $k$ ,  $F(x)$  l'est aussi. Cela s'écrit :

$$F(kx) = kF(x)$$

Bien entendu, si  $x$  est divisé par  $k$ ,  $F(x)$  l'est aussi :  $F(\frac{x}{k}) = \frac{F(x)}{k}$ .

Une fonction *non linéaire* met en jeu, par exemple, une puissance de la variable, un produit de variables comme  $xy$  ou certaines fonctions comme  $\cos(x)$ . Exemples de fonctions non linéaires :  $x^2$ ,  $\cos(x)$ ,  $xy$ ,  $e^x$  (où  $e = 2.71828\dots$ ).

#### *Chaos : sensibilité aux conditions initiales*

Le mot chaos évoque la désorganisation, l'imprédictibilité. S'agissant de systèmes physiques ou artificiels qui évoluent, le caractère chaotique vient de ce que leurs équations descriptives d'évolution *déterministes* ont pourtant des solutions imprédictibles. Ce phénomène est abordé au chapitre Hasard, paragraphe *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*. Une des raisons de l'imprédictibilité des systèmes chaotiques est leur *sensibilité aux conditions initiales*.

Nous verrons aussi que cette imprédictibilité n'est pas totale : les prédictions sont possibles dans le cadre de statistiques, les variables prédites étant stochastiques. Les évolutions des systèmes dynamiques sont donc régies par le *déterminisme statistique* ; il y a là une analogie avec les évolutions en Mécanique quantique, régies également par le déterminisme statistique.

Le chaos caractérise un phénomène déterministe de manière essentiellement négative : il empêche la prédiction d'états futurs un peu lointains et il amplifie des imprécisions expérimentales.

#### *Problème des trois corps, exemple de sensibilité aux conditions initiales*

##### *Une orbite planétaire perturbée*

Le problème proposé en 1885 par le roi Oscar II de Suède et Norvège, avec un prix au premier scientifique qui le résoudrait, concerne un phénomène conservatif à solutions chaotiques. Il s'agissait de savoir si le système solaire était stable à long terme, sur des millions d'années, ou si un corps (planète ou astéroïde) pouvait tomber sur le Soleil, entrer en collision avec un autre corps, être éjecté hors du système, bref changer d'orbite de manière significative.

Le gagnant du prix, le mathématicien français Henri Poincaré, étudia les propriétés générales des solutions éventuelles de ce problème. Il en montra la complexité et approfondit le cas simple où il n'y avait que 3 corps - par exemple deux gros comme le Soleil et une planète et un très petit par rapport à eux comme un satellite - cas appelé depuis « Problème des trois corps ». Il montra que même dans ce cas simple *les orbites sont trop complexes pour être décrites par une formule explicite*.

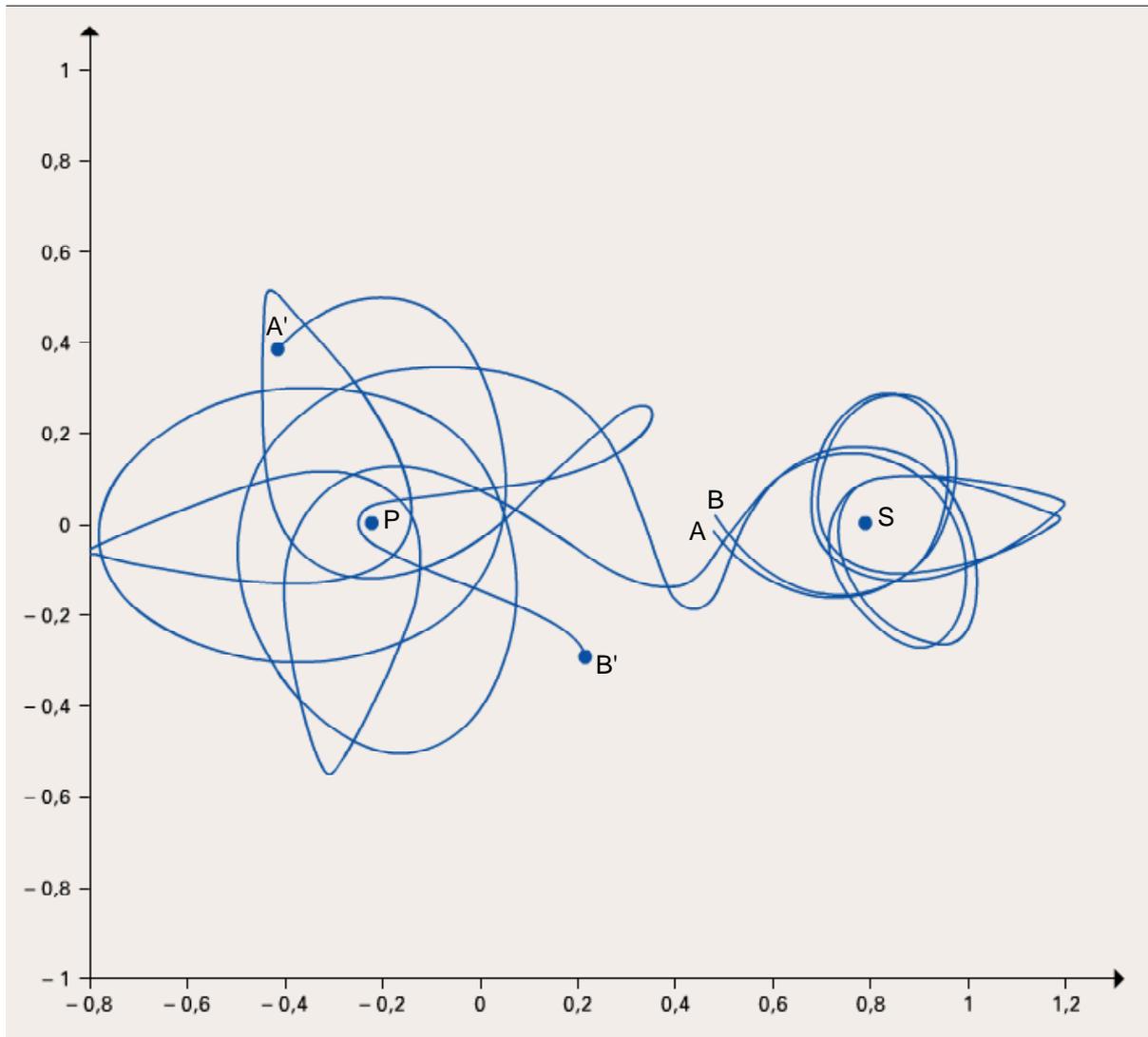
Pour résoudre ce problème, Poincaré dut approfondir une branche des mathématiques, la *topologie algébrique* ; cette science étudie les transformations continues d'objets géométriques en utilisant des structures algébriques. Il résuma les solutions générales du problème astronomique posé dans une nouvelle discipline dont il posa les bases : la *Théorie des systèmes dynamiques*.

Au XX<sup>e</sup> siècle, d'autres mathématiciens complétèrent les travaux de Poincaré, montrant que *dans certains cas l'évolution d'une orbite peut être imprévisible, découverte qui remet en cause la définition du déterminisme admise à l'époque*.

Voici un exemple d'évolution chaotique issu de [177] : le mouvement du corps céleste « petit » du problème des 3 corps. Le graphique ci-dessous représente, dans un référentiel où l'axe horizontal passe par les centres du Soleil  $S$  et d'une planète  $P$ , et l'axe vertical est une perpendiculaire quelconque au premier, deux trajectoires

$A \rightarrow A'$  et  $B \rightarrow B'$  du petit corps lorsque celui-ci est parti de points  $A$  et  $B$  très voisins. On voit que ces deux trajectoires divergent, la distance finale  $A'B'$  étant bien plus grande que la distance initiale  $AB$ .

On connaît aujourd'hui des évolutions chaotiques dans de nombreux domaines : la dynamique des fluides, la météorologie, la chimie des réactions dissipatives et même la Mécanique quantique. Notons qu'une évolution chaotique peut concerner un système conservatif aussi bien qu'un système dissipatif.



Divergence des trajectoires d'un petit corps attiré par le Soleil S et une planète P

### *Evolution itérative*

La non-linéarité exige une recherche numérique de la limite à l'infini, par itérations successives. Le caractère non linéaire de l'évolution d'une fonction chaotique interdit, en général, d'en donner une formule permettant un calcul en fonction du temps de la forme  $F(t)$ .

Le principe du calcul de l'évolution d'un tel système a été illustré dans l'exemple précédent  $x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_n + \frac{2}{x_n})$ . On calcule *numériquement*, par itérations successives aux instants  $t_0, t_{0+h}, t_{0+2h} \dots$ , la valeur de ses variables  $x(t), y(t), z(t) \dots$  et leurs variations pendant un court intervalle de temps  $h$  grâce à leurs dérivées. L'évolution

des systèmes dynamiques est donc décrite par une suite d'étapes de calcul dont chacune a pour point de départ le résultat de la précédente. Ce principe de calcul est déterministe, en tant que suite d'étapes déterministes.

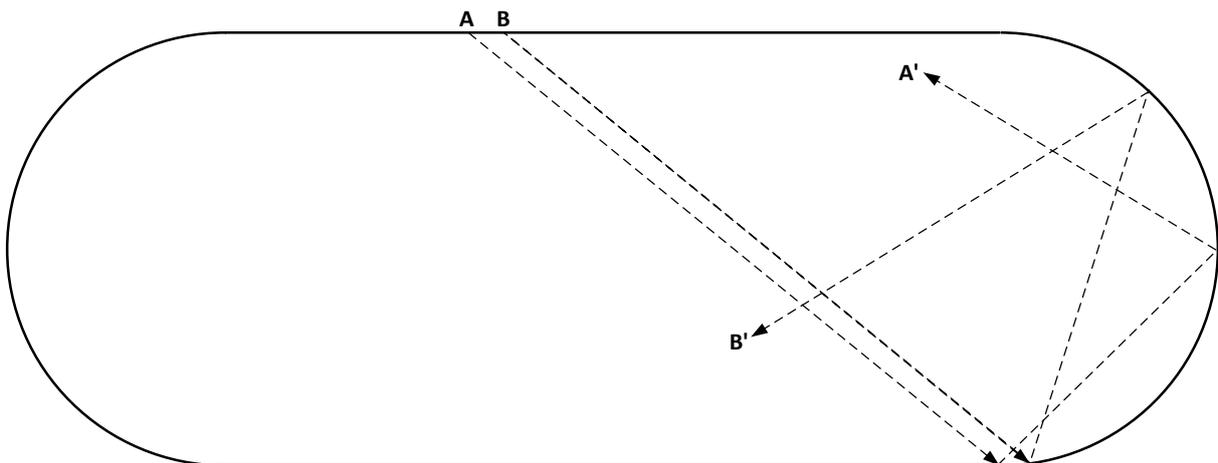
*Définition d'un système dynamique à évolution chaotique*

On dit qu'un système dynamique a une évolution chaotique si et seulement si, considérant une suite itérative d'états  $i$  de sa variable  $x_i$  :

1. Cette suite est telle que la fonction d'évolution soit de la forme  $x_{n+1} = f(x_n)$  où l'état  $n+1$  ne dépend que de l'état précédent  $n$  : la fonction d'évolution (la suite des états) est donc déterministe ;
2. La suite des états est apériodique : (aucune partie de la suite d'états n'existe plus d'une fois) ;
3. La suite est bornée inférieurement et supérieurement : (les valeurs de la fonction d'évolution sont comprises entre un minimum et un maximum) ;
4. Le système dynamique est sensible aux conditions initiales : (une variation - même petite - des conditions initiales de la loi d'évolution du système produit, à plus ou moins long terme, des variations significatives et imprévisibles de la fonction : le système dynamique est donc non linéaire.

*Exemple n°1 : Sensibilité aux conditions initiales*

Considérons un billard qui a deux côtés arrondis suivant le schéma ci-dessous. Supposons que deux billes soient lancées dans des directions parallèles de deux points voisins  $A$  et  $B$ . Lorsqu'elle rencontre une paroi, une bille rebondit en faisant un angle exactement opposé à celui qu'elle fait avec la normale à la paroi au point de contact. Or la bille partie de  $A$  touche la paroi opposée dans sa partie rectiligne et celle partie de  $B$  la touche au début de sa partie ronde. Les tangentes à la paroi de ces deux points d'arrivée n'étant pas du tout parallèles, les trajectoires finales  $AA'$  et  $BB'$  sont très différentes.



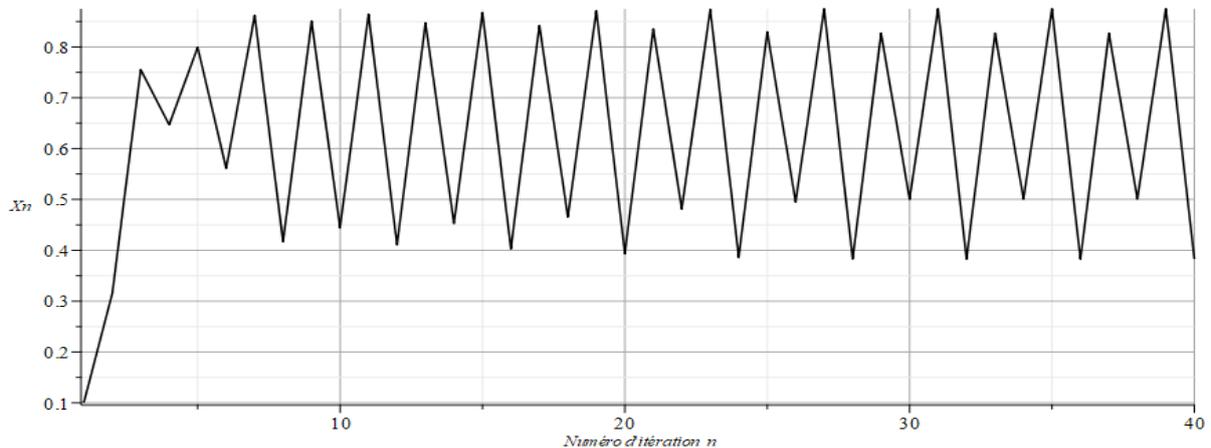
Dans cet exemple de sensibilité aux conditions initiales il n'y a pas eu d'itération, mais seulement non-linéarité.

*Exemple n°2 : Fonction logistique  $f(x) = rx(1 - x)$  où  $0 \leq x \leq 1$  et  $r \leq 4$*

- La variable  $x$ , définie entre 0 et 1, représente le rapport entre une population effective, une année donnée, et un maximum arbitraire ;

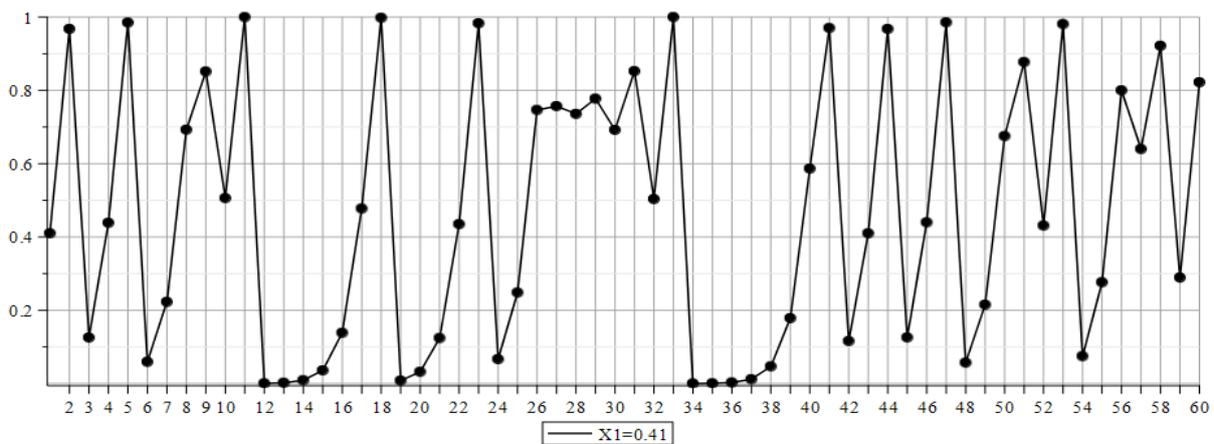
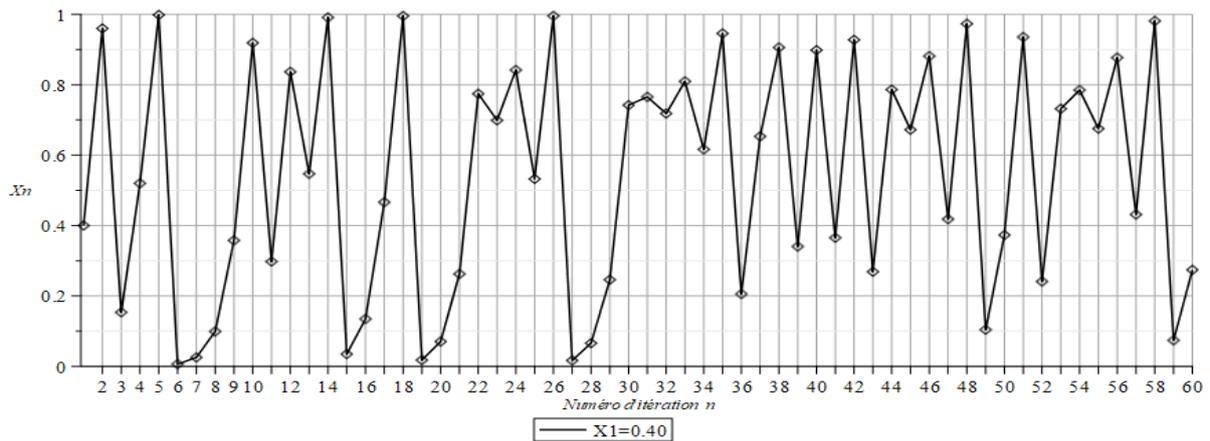
- La fonction logistique  $f(x)$  en calcule la valeur (la population) après une période de temps prise pour unité ; ce calcul se fait par itérations successives (voir paragraphe suivant).
- Le paramètre  $r$  représente la vitesse de croissance de la population. Sa valeur maximum est 4, pour que la fonction ne croisse pas indéfiniment lorsque le nombre d'itérations croît.

*Evolution de la fonction logistique avec  $r=3.5$*



On voit qu'à partir de l'itération 30 il y a une *oscillation de période 4* : les valeurs successives de  $x$  du graphique semblent se reproduire toutes les 4 itérations.

*Evolution de la fonction logistique avec  $r=4.0$  pour deux valeurs initiales proches :  $x_1=0.40$  et  $x_1=0.41$*



On voit qu'à partir de l'itération 6 la différence est significative.

*Conclusion pour la fonction logistique sur la sensibilité aux conditions initiales*

Avec  $r=4$ , la fonction logistique est sensible aux conditions initiales : au bout de quelques itérations elle amplifie une petite différence initiale. On ne peut donc prédire son état final que si la précision de son état initial est infinie, ou pour un intervalle de valeurs initiales infiniment étroit ; et on ne peut prédire l'état que pour un nombre réduit d'itérations, c'est-à-dire pour un *avenir proche*.

Cette évolution apériodique se produit quelle que soit la valeur initiale de  $x$  lorsque  $r=4$ . Et les valeurs successives, apériodiques, chaotiques, sont toutes distinctes : une valeur déjà obtenue ne se reproduira jamais.

*Fonction logistique : diagramme des bifurcations*

La période de la fonction logistique (nombre de valeurs formant un groupe répétitif après un grand nombre d'itérations) dépend de la valeur du paramètre  $r$ . Un programme simple MAPLE [145] permet de représenter graphiquement l'ensemble des valeurs finales ( $n \rightarrow \infty$ ) de la fonction logistique en fonction de  $r$ .

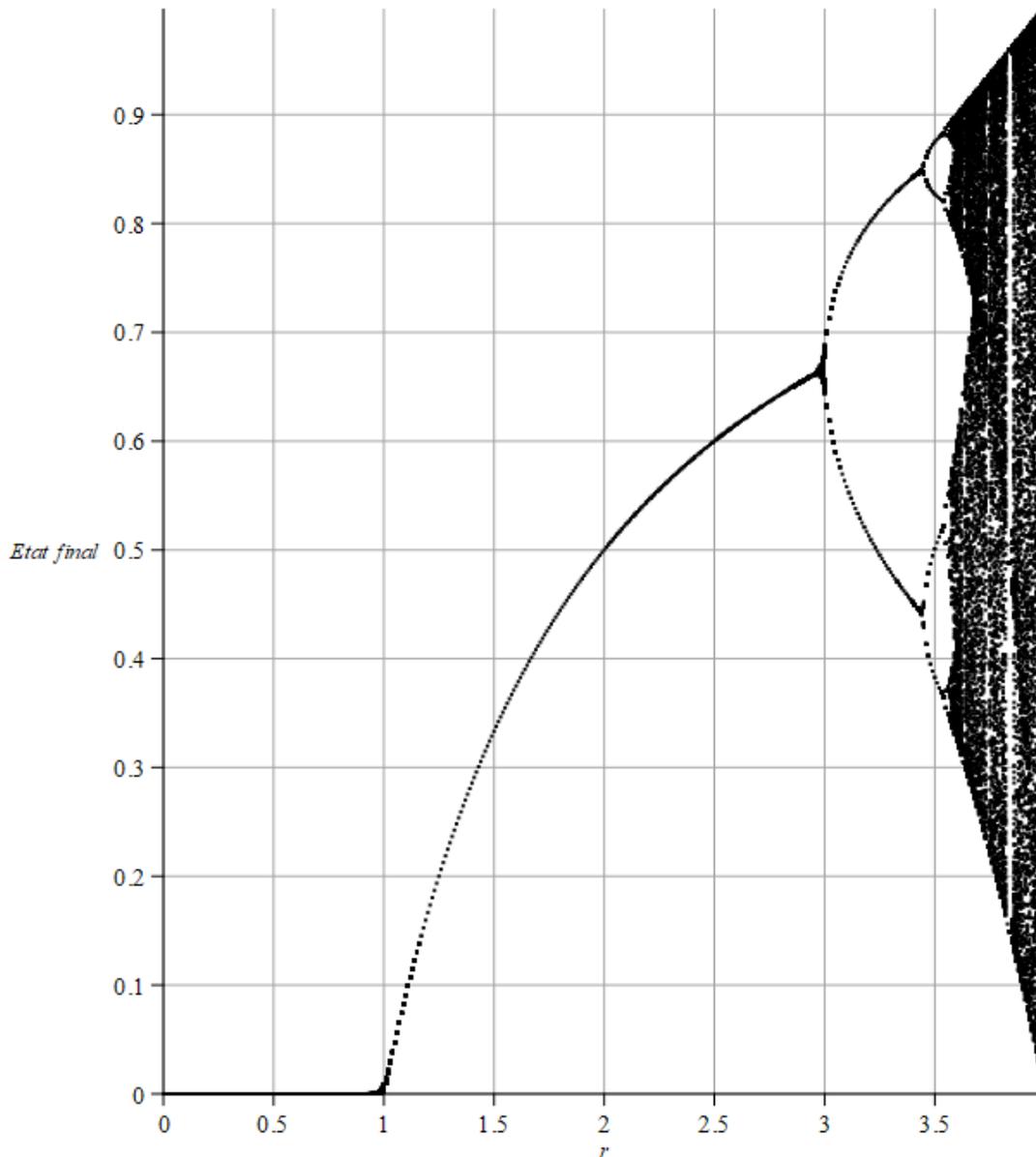


Diagramme des bifurcations : état final de la fonction logistique en fonction de  $r$

### Remarques

- Pour  $0 \leq r \leq 1$ , la valeur finale est zéro.
- Pour  $1 < r < 3$ , il y a une seule valeur finale.
- Pour  $3 \leq r < 3.46$  environ, il y a une période de deux valeurs finales.
- Pour  $3.46 \leq r < 3.544$  environ, il y a une période de quatre valeurs finales.
- Pour  $3.544 \leq r < 3.5644$  environ, il y a une période de huit valeurs finales.
- Pour  $r > 3.5644$  il y a une courte période de seize valeurs finales, jusqu'à environ 3.5687 où commence une période de 32 valeurs.

## Déterminisme étendu

Nous construisons ici un déterminisme capable de régir toutes les lois d'évolution conservative de la nature, le *déterminisme étendu*. Cette doctrine suppose un préalable : l'adhésion au réalisme de la science moderne, dont voici un résumé.

### Doctrine réaliste moderne

Un réaliste pose aujourd'hui deux principes :

1. Il existe une réalité indépendante de la connaissance de l'homme ;
2. Cette réalité est intelligible : l'homme peut donc la découvrir et en décrire les lois.

La connaissance que l'homme acquiert de la réalité (par perception, intuition, entendement et raisonnement) est digne de confiance jusqu'à preuve du contraire. Cette position est opposée à celle de l'idéalisme, prisonnier de l'allégorie de la caverne (Platon).

### *Opposition fondamentale entre réalisme et idéalisme*

La différence entre réalistes et idéalistes est que les premiers font a priori confiance à leur aptitude de connaître la réalité, alors que les seconds en nient a priori la possibilité.

### *Le réalisme est difficile à définir et à soutenir à l'échelle atomique*

A l'échelle atomique nous ne pouvons rien voir, ou à peu près rien même avec de puissants microscopes. Nous remplaçons alors cette vision par la représentation des objets (particules et ondes) et de leur évolution que nous en donne notre Mécanique quantique : nous "voyons" à travers des équations dont nous interprétons les résultats. Et un gros problème apparaît alors : leur caractère probabiliste.

Beaucoup de gens, Einstein par exemple, considèrent ce caractère comme incompatible avec le réalisme ; Einstein allait même jusqu'à rejeter la Mécanique quantique, qu'il considérait comme une solution provisoire, à remplacer par une solution réaliste dès qu'on la trouverait.

### *Controverse doctrinale opposant le réalisme et l'antiréalisme*

La controverse doctrinale commencée à l'époque de Platon et Aristote entre l'idéalisme du premier (pour qui la réalité est une Idée dont l'objet physique n'est qu'une copie) et le réalisme de son disciple Aristote (pour qui la réalité est ce qu'on voit et l'Idée intelligible est une abstraction inutile) se poursuit de nos jours entre la doctrine antiréaliste de Niels Bohr et Heisenberg et la doctrine réaliste d'Einstein et de De Broglie. Le réalisme d'Einstein peut lui-même être considéré comme une variante de l'Idéalisme transcendantal de Kant, variante qui abandonne la notion d'Idée réelle comme l'aurait fait Aristote.

**« La controverse doctrinale entre réalisme et antiréalisme se poursuit de nos jours. »**

Selon [313] pages 9 et suivantes il y a deux façons d'être réaliste, selon la réponse à la question suivante : "Le monde naturel se compose-t-il uniquement des types d'objets que nous discernons lorsque nous regardons autour de nous, et de leurs constituants ?" Autrement dit : "Ce que nous apercevons autour de nous constitue-t-il la totalité de l'Univers ?"

- Ceux qui répondent *oui* à cette question – appelons-les « réalistes naïfs », c'est-à-dire « sans complication » n'ont pas besoin de justifications sophistiquées pour décrire le monde et les évolutions de ses objets.

Exemple de théorie relevant du réalisme naïf : une théorie des atomes décrite dans [313], théorie distincte de la Mécanique quantique et plus complète qu'elle.

- Ceux qui répondent *non* croient en une réalité cachée existant en plus de celle sur laquelle tout le monde est d'accord ; l'auteur de [313] appelle leur doctrine "réalisme magique".

Exemple de réalité cachée : les multivers décrits dans [0] et [203-1].

Il est évident que les descriptions scientifiques de l'Univers entier et des évolutions de ses objets doivent pouvoir se passer le plus possible de réalités cachées, dont l'existence ne pourra jamais être justifiée et dont l'inexistence est également indémontrable. Ainsi, il y a aujourd'hui une théorie qui décrit le détail du déroulement du Big Bang, le faisant sortir de sa catégorie « phénomène caché » : la *Gravitation quantique à boucles*, qui constitue un pont entre la physique de l'échelle macroscopique (qui comprend la Relativité générale) et la Mécanique quantique de l'échelle atomique.

#### Synthèses de plusieurs lois d'évolution

Le mouvement d'un bouchon flottant à la surface de l'eau d'un torrent dépend simultanément des lois de Mécanique des fluides et des lois de Newton. La nature fait constamment et instantanément la synthèse de toutes les lois qui s'appliquent à un système donné, quel qu'il soit, quelle que soit sa complexité et quelles que soient les circonstances.

En fait, c'est l'homme qui invente des lois réductrices régissant une partie seulement d'un phénomène ; même si (en vertu du *réalisme*) il pense avoir découvert des lois naturelles existant indépendamment de lui, c'est bien lui qui les imagine, puis les vérifie et les met au point jusqu'à ce qu'elles n'aient pas de contre-exemple.

On peut toutefois postuler que la nature n'a qu'*une loi de synthèse globale* régissant tous les systèmes conservatifs possibles, quel que soit le nombre de lois partielles humaines qui s'appliquent simultanément à un système donné.

**« Postulat : la nature a une loi de synthèse globale régissant l'évolution ou la transition d'état de tous les systèmes, conformément à la Règle de stabilité. »**

#### *La nature est complète*

On doit aussi postuler que la nature *est complète* : elle ne manque jamais de loi d'évolution ou de transition d'état, parce qu'on ne constate jamais de non-transformation lorsque les circonstances sont une cause efficace de transformation, et qu'on ne constate jamais de « transformation erronée » contredisant des lois connues.

**« Postulat : dans la nature toute évolution ou transition d'état est régie par une loi, conformément à la Règle de stabilité. »**

### *Méthode pour une application conditionnelle des lois d'évolution*

La seule manière de prendre en compte tous les ensembles de circonstances possibles dans une décision de lancer ou arrêter une loi d'évolution est d'utiliser un algorithme comprenant le nombre d'étapes de raisonnement nécessaires, avec des conditions de la forme :

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

### *Exemple : choix des lois successives régissant le chauffage de la glace*

Lorsqu'on chauffe une certaine quantité de glace, son élévation de température  $\Delta T$  est proportionnelle à la quantité de chaleur fournie  $\Delta Q$  selon la formule  $\Delta Q = C_G \Delta T$ , où  $C_G$  est la capacité calorifique de la glace.

Lorsque la température de fusion  $T_F$  est atteinte, cette glace se transforme en eau à température constante selon une loi où la quantité de glace fondue est proportionnelle à la quantité de chaleur fournie.

Enfin, lorsque toute la glace a fondu, la loi est  $\Delta Q = C_E \Delta T$ , où  $C_E$  est la capacité calorifique de l'eau. Les trois lois d'absorption de chaleur par l'eau étant différentes, le choix de la loi d'évolution à appliquer dépend de l'état : glace sèche, glace en train de fondre ou eau. L'algorithme de choix de la loi comprendra donc deux tests successifs, où  $T$  est la température à l'instant considéré :

1. Si  $T < T_F$  alors appliquer la loi d'échauffement de la glace ;
2. Si  $T = T_F$  alors appliquer la loi de fusion de la glace.

Si aucune des conditions précédentes n'est remplie, c'est que toute la glace a fondu et  $T > T_F$  : inutile de tester cette condition-là, appliquer la loi d'échauffement de l'eau.

Quelle que soit la complexité d'une évolution à étapes successives, la détection des conditions de changement de loi d'évolution se fait comme cela.

### Conclusions sur le lancement et l'interruption des lois d'évolution ou de transition d'état

Nous avons déjà postulé qu'une transformation naturelle est soit une évolution soit une transition d'état. On doit donc maintenant postuler que :

**« Toutes les lois de transformation que l'homme peut définir sont soumises à des conditions de lancement ou d'arrêt descriptibles par des algorithmes. »**

(Un algorithme est la description d'un raisonnement en langage de programmation.)

**« Une transition d'état est toujours suivie, pour chaque état nouveau, d'une évolution. »**

**« Une évolution peut être suivie d'une bifurcation choisissant une nouvelle loi d'évolution parmi plusieurs possibles ».**

**« La nature gère automatiquement tous les cas de transformation de tous les systèmes, dans toutes les circonstances si complexes soient-elles, avec les lois de synthèse appropriées, qui font toutes partie de la Loi globale d'évolution de la physique. »**

**« Tout système conservatif est régi par la Loi globale d'évolution dont les lois d'évolution ou de transition humaines sont des vues réduites à des circonstances particulières. »**

### Lois d'évolution et lois d'interruption

D'après ce qui précède, toutes les lois physiques possibles appartiennent à une (et une seule) des deux catégories suivantes :

1. Les lois d'évolution au sens large, comprenant les lois descriptives, les lois de transformation (décomposition, fusion, transition d'état), et de manière générale toutes les lois physiques conservatives avec échange d'énergie ;
2. Les lois conditionnelles, comme les lois d'échauffement de l'eau de l'exemple précédent ou la loi de décomposition radioactive de l'uranium 238. On appellera ces lois désormais lois d'interruption, car elles lancent ou interrompent l'application d'une loi d'évolution, ou elles provoquent une transition d'état.

Les lois d'interruption s'appliquent simplement en testant des conditions, sans échange d'énergie. Dans la nature, ces tests sont effectués en permanence, pour détecter un changement de causalité dès qu'il se produit, ou pour empêcher qu'un changement indésirable n'ait lieu ou qu'une situation ne survienne (comme dans le cas du principe d'incertitude de Heisenberg).

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

### *Début et fin de l'action d'une loi d'évolution*

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

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

### *Exemple 1*

Quand on chauffe de l'eau liquide à pression constante, sa température croît tant qu'elle n'a pas atteint le point d'ébullition ; la poursuite du chauffage entraîne une ébullition à température constante tant qu'il reste du liquide ; elle entraîne ensuite une élévation de température de la vapeur. Il y a dans cette expérience 3 lois d'évolution différentes séparées par 2 lois d'interruption ; et il y a 3 capacités calorifiques (en joules/kg et par degré) : celle de l'eau liquide, celle de la vaporisation et celle de la vapeur.

### *Exemple 2*

A l'échelle atomique, lorsqu'une évolution décrite par l'équation de Schrödinger a produit une superposition d'états, celle-ci persiste jusqu'à ce qu'une intervention extérieure ayant la violence d'un phénomène de l'échelle macroscopique (comme une mesure) vienne la perturber ; la superposition est alors détruite (il y a décohérence) et l'évolution du système perturbé se poursuit avec un seul des états précédemment superposés. La décohérence n'est pas une évolution, c'est une transition d'état comme le gel d'un liquide, mais sans échange d'énergie.

### *Loi globale d'interruption et Loi globale du déterminisme*

Toute loi d'évolution s'applique et cesse de s'appliquer du fait de lois d'interruption, et seulement du fait de ces lois. On peut donc postuler que l'ensemble des lois d'interruption, déjà définies par l'homme ou non, constitue dans la nature une *Loi globale d'interruption* qui en fait une synthèse cohérente, applicable à toutes les situations : tout se passe comme si les évolutions naturelles étaient régies par une *Loi globale du déterminisme* comprenant la Loi globale d'évolution et (grâce à la Loi globale d'interruption) toutes les conditions d'application nécessaires.

Cette Loi globale du déterminisme comprend un mécanisme algorithmique de supervision des circonstances capable de détecter les causes suffisantes de lancement et arrêt d'évolutions, et de lancer l'application de chaque loi d'évolution avec les conditions initiales appropriées.

Conformément à la doctrine réaliste, l'homme ne fait que découvrir et énoncer, progressivement, les diverses lois d'évolution applicables à des circonstances réductrices. Toutes ces lois supposent des systèmes conservatifs, condition nécessaire du déterminisme lui-même imposée par la Règle de stabilité.

Il n'y a pas de loi d'évolution appliquée à un système dissipatif, faute de pouvoir décrire fidèlement les échanges ou pertes d'énergie et de matière : on se ramène toujours à des systèmes conservatifs évoluant par étapes et auxquels on applique des corrections.

### *Classification des lois de Newton en tant que lois d'évolution ou lois d'interruption*

- La 2<sup>ème</sup> loi et la loi de gravitation sont des lois d'évolution, car elles décrivent des forces susceptibles de causer des accélérations.
- La 1<sup>ère</sup> loi et la 3<sup>ème</sup> loi sont des lois d'interruption, car elles décrivent des conditions sources de contraintes.

### Nécessité et définition d'un déterminisme étendu

La nécessité de régir toutes les évolutions par des lois d'interruption entraîne celle d'un *déterminisme étendu*, englobant le déterminisme statistique et donc aussi le déterminisme scientifique, auxquels il ajoute l'algorithme universel de décision que nous avons vu sous le titre *Méthode pour une application conditionnelle des lois d'évolution*.

En postulant un déterminisme étendu, on adopte une doctrine du *déterminisme universel* régissant *toutes* les évolutions conservatives de la physique.

### *Le déterminisme étendu est une doctrine réaliste*

Admettre que toute évolution conservative est régie par une Loi globale munie de ses conditions d'interruption est une doctrine réaliste. Mais cette doctrine ne remet pas en cause le fait que c'est l'homme qui rédige les lois qu'il découvre, avant de vérifier leur conformité avec les phénomènes qu'il constate.

### C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception

(Citation de la *Critique de la raison pure* de Kant [20], page 194)

"L'ordre et la régularité [conformité aux lois de la nature], c'est donc nous-mêmes qui les introduisons dans les phénomènes que nous appelons nature, et nous ne pourrions les y trouver si nous ou la nature de notre esprit ne les y avaient mis

originaires. Car cette unité de la nature doit être une unité nécessaire, c'est-à-dire certaine a priori, de la liaison [par causalité] des phénomènes. Or, comment pourrions-nous instaurer a priori une unité synthétique, si, dans les sources originaires de connaissance de notre esprit, ne se trouvaient contenus a priori des principes subjectifs d'une telle unité [comme le postulat de déterminisme et la règle de stabilité], et si ces conditions subjectives ne possédaient en même temps une validité objective, dans la mesure où elles sont les principes de la possibilité de connaître un quelconque objet dans l'expérience ?"

(Fin de citation)

Bien entendu, l'homme définit les lois de la nature selon ce qu'il devine qu'elles sont en réalité suite à ses observations. Il vérifie ensuite que l'effet constaté de chaque loi est conforme à ses prévisions et prédictions.

#### *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets (doctrine)*

Cette idée est révolutionnaire, en ce sens qu'elle renonce à affirmer comme Platon que la réalité est inaccessible parce que l'homme n'en voit que des phénomènes. Elle consiste à considérer comme réels les objets et phénomènes physiques observés et présents à l'esprit par leurs représentations, c'est-à-dire à *postuler que la réalité suit le modèle que l'homme en conçoit*. Tout homme fait donc confiance à ce qu'il perçoit parce que c'est la seule réalité accessible. Mais cette confiance est provisoire, elle peut être mise en cause dès qu'une différence ou une contradiction apparaît avec une autre réalité constatée ou prévue, et il faut alors changer quelque chose dans le modèle.

L'étape initiale de la construction de cette connaissance du monde consiste à admettre des aprioris de l'esprit humain comme l'espace, le temps, les catégories de jugement de Kant (quantité, qualité, relation et modalité de Kant) et la causalité, et à élaborer notre connaissance du monde réel (objets et lois physiques d'évolution) par rapport à eux, avec des compléments faits de prédicats et de liens de relation. C'est ainsi que l'homme a construit la géométrie, en partant des concepts a priori de point, droite et cercle pour définir des figures, angles, etc. Chaque connaissance nouvelle sera construite à partir de connaissances déjà acquises et en se liant à elles.

Détails : voir [Philosophie des sciences, métaphysique du XXI<sup>e</sup> siècle](#) [0] paragraphe *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets (doctrine)*.

#### Conséquences de la Loi globale du déterminisme dues à la causalité

Voici les conséquences métaphysiques de la causalité qui régit l'évolution d'un système tant que ne survient pas une cause d'interruption ou de limitation :

« **L'application d'une nouvelle causalité est une conséquence instantanée** »  
(des conditions d'interruption sont prises en compte sans délai) ;

« **L'application d'une causalité est une conséquence ininterrompue** » voir :  
*Continuité et ininterrompabilité : définitions et Postulat de continuité (ininterrompabilité)* ;

« **L'application d'une causalité est déterministe** »  
(voir *Le hasard n'existe pas*) ;

« **L'application d'une causalité conserve l'information d'un système fermé** »  
(voir dans [0] *Conservation de l'information dans une évolution conservative*) ;

**« L'application de la causalité a des exceptions dues au principe d'incertitude de Heisenberg »**

(voir dans [0] *Fluctuations quantiques dues au principe d'incertitude de Heisenberg*) ;

**« L'application de la causalité a des contraintes diverses : principe d'exclusion de Pauli, invariances CP et CPT, principes de conservation et de symétrie, etc. »**

(voir *Les niveaux de déterminisme (diagramme)*) ;

**« Le déterminisme n'entraîne pas toujours la prédictibilité des résultats d'évolution »**

(voir au chapitre *Hasard* le paragraphe *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité*).

*Quelles caractéristiques du déterminisme étendu reste-t-il à définir ?*

Nous avons besoin d'un postulat de déterminisme adapté à *toutes* les évolutions conservatives de la nature, connues ou à découvrir. Un tel postulat doit aussi être un sur-ensemble du déterminisme statistique, lui-même sur-ensemble du déterminisme scientifique, niveaux du déterminisme dont nous avons montré la nécessité. Nous allons construire le déterminisme étendu par induction à partir de propriétés de l'Univers. Voici donc ces propriétés, en commençant par les principes métaphysiques des lois de la nature que le déterminisme étendu doit régir.

Métaphysique des lois de la nature

Cette section définit les principes métaphysiques des lois d'évolution que le déterminisme étendu doit régir.

1. Uniformité des lois

*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, de l'énergie, de la charge électrique, etc.

2. Principe cosmologique : l'espace est homogène et isotrope

L'espace astronomique a les mêmes propriétés partout et dans toutes les directions.

**« L'espace de l'Univers est homogène et isotrope. »**

Cette affirmation est le *Principe cosmologique*, postulé pour simplifier des calculs de Relativité générale. L'homogénéité et l'isotropie de l'Univers, avant et après le Big Bang, sont confirmées avec une très grande précision par la découverte en 1965 du fond diffus cosmologique : la densité d'énergie de l'Univers primitif était la même en tous ses points, mais il se produisait (et il se produit toujours) des fluctuations quantiques dont sont nées les galaxies. La Théorie de l'inflation explique l'extrême homogénéité constatée aujourd'hui à grande échelle (~100 millions d'années-lumière et plus). (Détails : voir [0])

3. Les lois physiques sont stables (invariantes) dans le temps et l'espace

On le voit en astronomie : regarder loin, à 1 milliard d'années-lumière, c'est voir à cet endroit-là ce qui se passait il y a environ 1 milliard d'années ; et on constate, alors, que les lois physiques étaient les mêmes que sur Terre aujourd'hui. Cette stabilité est l'origine de la Règle de stabilité associée au postulat de causalité

dans le déterminisme scientifique. Même lorsqu'une loi varie avec le temps il y a toujours une loi *stable* qui décrit ou même explique cette variation.

Exemple : le rayon de l'Univers varie ; on s'en est aperçu en 1927 en découvrant son expansion, matérialisée par une vitesse d'éloignement des galaxies lointaines qui croît avec leur distance, mais reste la même dans toutes les directions.

Puis on s'est aperçu que la loi de croissance de ce rayon variait elle-même : l'expansion de l'Univers est de plus en plus rapide.

Enfin, on a prouvé par raisonnement qu'au commencement de l'Univers, une petite fraction de seconde après le Big Bang et pendant un très court instant, sa vitesse d'expansion a été extraordinairement rapide, des milliards de milliards de fois plus rapide que la vitesse de la lumière : ce fut la phase *d'inflation*.

Remarque : la vitesse d'expansion de l'espace n'est en rien limitée par celle de la lumière, car elle ne déplace ni matière ni énergie.

#### 4. Les lois physiques sont cohérentes (non contradictoires)

Les lois de la nature se complètent sans jamais se contredire. Elles respectent trois principes fondamentaux de la logique : le principe de non-contradiction, le principe du tiers exclu et le principe d'identité. Elles respectent aussi le principe d'homogénéité.

Cette cohérence est inévitable : c'est l'homme qui fait les lois de la nature, et il vérifie pour chaque nouvelle loi qu'elle n'en contredit aucune autre.

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. Exemples :

- Les lois statistiques de la thermodynamique s'appliquent sans contredire les lois des mouvements et chocs des molécules.
- Le Principe de moindre action de Maupertuis constitue une loi globale de mouvement qui ne contredit pas les lois de proche en proche de Newton.

#### 5. La nature est complète

Considérons la doctrine 2 du réalisme (ci-dessus), selon laquelle la nature existe et a des lois indépendamment de l'homme. On constate alors que :

- La nature a *toutes* les lois qu'il faut pour réagir à *toutes* les situations et expliquer *tous* les phénomènes : on dit qu'elle est *complète*.

(C'est l'homme qui rédige les lois qu'il découvre ; affirmer la complétude de la nature est une position doctrinale réaliste.)

- Il n'y a pas de situation sans loi d'évolution, loi nécessairement universelle et immuable pour que la même cause produit le même effet, partout et toujours.

#### 6. L'homme doit imaginer les lois de la nature

*Postulat de reproductibilité de l'expérience*

Nous postulons que les mêmes causes produisent les mêmes effets, partout et toujours ; mais ces effets reproductibles sont ceux que *nous* constatons, nous hommes.

Pour Platon et Kant, les *vraies* causes et les *vrais* effets (ceux de la nature) nous sont inaccessibles, et il n'y a aucune certitude concernant l'existence de *vraies*

lois produisant ces effets à partir de ces causes. Selon cette doctrine-là, nous sommes donc obligés *d'imaginer* des lois déterministes permettant de *décrire, prévoir et prédire* les effets que *nous* constatons, produits par des causes que *nous* imaginons.

Nous suivrons Kant et adopterons donc l'essentiel de sa doctrine d'*idéalisme transcendantal* : c'est l'homme qui définit les lois de la nature et doit ensuite en vérifier la cohérence avec ses constatations, prévisions et prédictions. Toutefois, nous définirons l'espace et le temps non comme des formes (données) sensibles de notre intuition, mais comme le continuum d'espace-temps de la Relativité.

Cette différence est considérable. Alors que pour Kant et son idéalisme transcendantal l'espace et le temps sont des *abstractions* indispensables pour la représentation humaine des phénomènes, l'espace-temps de la Relativité est un milieu, *réalité physique* que la matière déforme.

#### 7. Postulat d'intelligibilité

Pour que l'homme puisse imaginer des lois d'évolution en accord avec tous les phénomènes du domaine de définition de chacune, il est indispensable que la réalité inaccessible de la nature nous soit intelligible. Nous postulerons donc que :

**« Rien n'empêche l'homme de trouver des lois qui décrivent parfaitement un phénomène instantané ou évolutif qu'il constate ; rien ne lui est incompréhensible a priori, rien ne restreint sa liberté de connaître. »**

Cette compréhension demandera souvent des efforts, du temps, de multiples itérations, de la collaboration entre chercheurs, de l'honnêteté, etc. Mais a priori aucun phénomène ne nous est incompréhensible à jamais, et nous sommes libres de chercher à le comprendre.

Cette position est conforme à celle des Lumières [21] et s'oppose à l'attitude d'ignorance résignée de la religion catholique quand elle enseigne que « les voies du Seigneur sont impénétrables » [201]. Elle transgresse aussi la malédiction du péché originel. Elle s'oppose donc aux religions qui voudraient que l'homme croie leurs révélations sans les mettre en doute, en l'assurant qu'il peut avoir confiance dans sa faculté de connaissance.

#### 8. Postulat de synthèse naturelle

L'homme imagine souvent ses lois à partir d'expériences dont il se forge une représentation abstraite simplifiée. Cette approche réductrice est nécessaire pour des raisons pratiques comme pour faciliter les raisonnements. Mais les phénomènes réels évoluent le plus souvent selon plusieurs de ces lois humaines, la nature faisant spontanément leur synthèse.

L'homme raisonne aussi, en général, sur des systèmes fermés, alors que la nature ignore cette notion ; un système fermé conserve naturellement l'énergie et la charge électrique, alors que dans la nature rien ne s'oppose à des échanges. L'homme fait des hypothèses de frottements absents ou négligeables, parce qu'il ne sait pas les décrire avec assez de précision pour les soumettre à des lois déterministes ; la nature, par contre,...

La nature fait donc une synthèse spontanée de toutes les lois d'évolution qui s'appliquent à une situation, synthèse que le déterminisme étendu permet en régissant les lois conçues par l'homme chaque fois qu'il peut les définir.

9. Complétude à la fois analytique, synthétique et procédurale  
Comprendre parfaitement un phénomène c'est pouvoir en décrire tous les aspects : son analyse (décomposition en éléments), ainsi que les relations et interactions entre ces éléments et entre le phénomène et le monde extérieur.

*Nécessité de descriptions procédurales*

Une telle description à la fois analytique et synthétique est souvent insuffisante si elle n'est pas, en plus, procédurale.

*Procédural*

L'adjectif *procédural* est utilisé par les informaticiens pour décrire la logique d'un raisonnement qui comprend des tests de valeurs et des ruptures de séquence d'instructions, c'est-à-dire des instructions de type :

« Si <condition> alors <action à exécuter ou continuation à une instruction désignée> »

Exemple : *Méthode pour une application conditionnelle des lois d'évolution.*

Le caractère procédural est indispensable pour tenir compte d'interactions complexes entre phénomènes, comme ceux où plusieurs lois de la nature s'appliquent simultanément et/ou successivement du fait de la synthèse naturelle.

Nous avons vu l'exemple du chauffage de la glace au paragraphe *Méthode pour une application conditionnelle des lois d'évolution* : selon la température atteinte, la loi d'évolution qui s'applique est différente. Il faut donc un algorithme, raisonnement procédural dont la liste d'étapes comprend des tests de condition et des ruptures de séquence ; un tel algorithme est en général mis en œuvre dans un logiciel.

Autre exemple connu de tous les contribuables : la loi de calcul du pourcentage d'imposition n'est pas la même selon les diverses activités du contribuable.

Parfois il faudra prévoir un comportement à long terme, en utilisant un raisonnement de passage à la limite ou de convergence d'une suite, opérations impossibles à partir d'analyses et de synthèses telles qu'envisagées par les philosophes comme Descartes et Kant.

Parfois il faudra conclure à l'impossibilité de prévoir à trop long terme, comme Poincaré face au problème de trajectoires d'astres dit « Des trois corps » [0]

Une description d'évolution naturelle quelconque doit donc être procédurale. Kant, par exemple, ne le soupçonnait pas ; et Descartes, dans son *Discours de la méthode*, limitait celle-ci à une analyse suivie d'une synthèse.

10. Veille, déclenchement et arrêt d'évolutions

Nous avons défini une évolution au sens large comme une transformation affectant un système conservatif, quelle que soit la loi de ce changement.

*Supervision des évolutions de systèmes*

La nature déclenche et arrête chaque évolution *instantanément* lorsque les circonstances l'exigent. Elle a donc une *fonction de veille* qui détecte les conditions de lancement ou d'interruption d'une loi d'évolution, et toute évolution est déclenchée selon une loi avec les valeurs initiales de paramètres conformes aux circonstances.

### *Logiciel superviseur d'un ordinateur*

En informatique un *système d'exploitation* comme Windows, Unix ou Android est un programme qui a ces fonctions de veille, arrêt et lancement de programmes d'application avec passage de paramètres ; comme il supervise l'ensemble du fonctionnement d'un ordinateur on l'appelle parfois aussi *superviseur*.

L'action précise de ce programme en réponse à une situation détectée électroniquement (comme la frappe d'un caractère au clavier ou l'arrivée d'un message Internet) est appelée *interruption* : elle consiste à analyser l'événement détecté et décider du « réveil » (lancement avec passage de paramètres) ou de l'arrêt d'un ou plusieurs programmes (d'application ou du système d'exploitation). Les processus d'analyse et de décision sont évidemment de type procédural.

La nature a donc une fonction de veille qui soumet les lois d'évolution à des règles. Exemples : conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique et de la charge électrique ; principe d'incertitude de Heisenberg, etc.

La nature se comporte donc comme un superviseur de l'ensemble de l'Univers, qui gère tous les débuts et toutes les fins d'exécution de lois d'évolution, en tous ses points et à tout instant. Nous appellerons donc la logique de cette supervision *Loi globale d'interruption*, et en distinguerons au besoin telle ou telle partie applicable à un système particulier sous le nom plus simple de *loi d'interruption* : la Loi globale d'interruption sera donc l'ensemble synthétique des lois d'interruption.

En résumé la nature a deux sortes de lois : les lois d'évolution et les lois d'interruption. Ces lois sont complémentaires, aucune loi d'un type ne pouvant exister sans une loi de l'autre. Leur unité globale synthétique d'action permet leur regroupement en une *Loi globale du déterminisme de la nature*.

#### 11. Conclusions sur la causalité et conséquences pour le déterminisme

Une cause suffisante naturelle conservative donnée produit toujours un effet instantanément et tant qu'elle existe (sans interruption).

Cet effet est toujours le même, partout : c'est pourquoi on peut postuler qu'il est régi par une loi, donc postuler aussi le déterminisme.

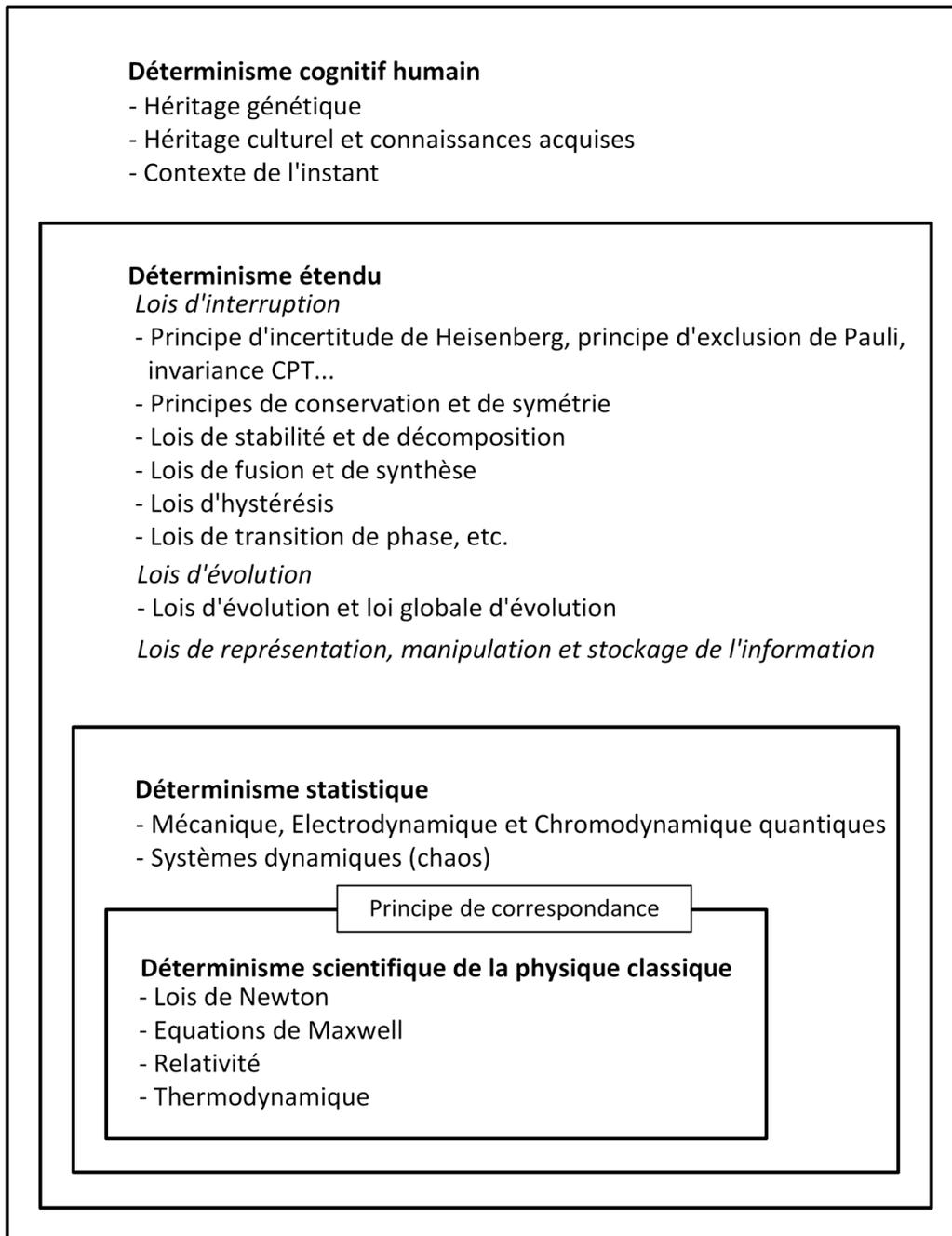
Mais pour que ce déterminisme puisse régir l'évolution de toutes les situations, permettre de les *comprendre* par une description complète, d'en *prévoir* l'évolution, et d'en *prédire* le résultat lorsque c'est possible (et au niveau de détail possible), nous avons enrichi le déterminisme statistique en régissant, avec les lois descriptives et les lois d'interruption du déterminisme étendu (voir [0]) :

- Une théorie des fluctuations quantiques (exemple : force de Casimir-Lifshitz) ;
- Des indéterminations dues au principe d'incertitude de Heisenberg ;
- Des principes limiteurs comme celui de Pauli ;
- Des lois de conservation et symétries ;
- Des lois de stabilité et de décomposition aux niveaux moléculaire, atomique ou nucléaire ;
- Des lois de fusion et de synthèse ;

- Des lois d'hystérésis ;
- Des lois de transition de phase ;
- Des lois de représentation, manipulation et stockage de l'information (horizon étiré des trous noirs, principe holographique, etc.) ;
- Une loi de conservation de l'information d'un système fermé.

On peut donc représenter les niveaux de déterminisme sur le diagramme du paragraphe suivant.

### Les niveaux de déterminisme (diagramme)



Niveaux de déterminisme régissant la connaissance scientifique

### Conclusion sur le déterminisme étendu

Le déterminisme étendu, postulé par notre doctrine, est capable de régir toutes les lois d'évolution conservatives et toutes les lois de transition d'état de la nature. La raison en est simple et basée sur la constatation que la nature fait la synthèse des lois d'évolution et de transition d'état nécessaires en toutes circonstances : dans le déterminisme étendu cette synthèse est effectuée par la Loi globale d'interruption, avec sa puissance algorithmique capable de tous les raisonnements logiques de la pensée humaine et sa fonction de veille détectant tous les événements.

### **Hasard**

En interrogeant mes amis je n'ai trouvé personne qui nie l'existence et l'influence du hasard ; ce sont même des lieux communs : le hasard existe, admettre son effet est le bon sens même. Nous allons voir pourquoi tous se trompent.

#### « Au hasard » par opposition à « déterministe »

La notion de hasard s'oppose à celle de déterminisme en niant ou en restreignant les possibilités de comprendre, prévoir et prédire. Selon le *Dictionnaire de l'Académie* [3], une situation ou une évolution est dite « au hasard » lorsqu'elle est :

- Sans but précis (finalité au hasard) ;
- N'importe comment (caractéristiques au hasard) ;
- Sans ordre, ni méthode (structure ou déroulement au hasard) ne permettant pas de calculer une valeur d'une suite connaissant des valeurs précédentes ;
- Selon ce qui se présente accidentellement par l'effet de l'imprévu (sans cause).

Ainsi, par exemple :

- Un phénomène naturel au hasard surviendrait sans que s'applique aucune loi de causalité de la nature, qui aurait alors « fait n'importe quoi sans raison ».  
Exemple : la décomposition radioactive ci-dessus, pour qui n'en connaît pas l'explication physique ; ce phénomène décrit par la Mécanique quantique relève du *déterminisme statistique*.
- La plupart des mesures physiques sont entachées d'erreurs qui en limitent la précision ; un résultat de mesure semble alors aléatoire, défini par exemple par une loi de probabilités comme celle de Gauss, qu'on rencontre si souvent qu'on l'a qualifiée de « Loi normale ».  
Exemple : distribution des tailles (en centimètres) des hommes adultes dans un pays (probabilité qu'un homme adulte donné ait une certaine taille).

Mais là non plus il n'y a pas de hasard, voyons à présent pourquoi.

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

### *Valeur « au hasard » d'une variable - Définition importante*

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

### *Stochastique (adjectif)*

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

#### *Différence entre stochastique et déterministe*

Dans les mêmes circonstances initiales :

- Un processus stochastique produit des valeurs distribuées selon sa loi de probabilité ;
- Un processus déterministe reproduit une même valeur (à l'échelle macroscopique), ou un même ensemble de valeurs si son résultat n'est pas unique (à l'échelle atomique).

### *Hasard ou imprédictibilité ?*

Le hasard a plusieurs définitions scientifiques que nous préciserons plus loin, mais qu'on peut résumer comme suit : est au hasard toute structure, tout comportement dont on peut *démontrer* l'impossibilité d'une description complète à partir d'une de ses parties et/ou du contexte, faute de lois de déduction ou de calcul applicables.

*Si elle existait*, une évolution naturelle au hasard serait une caractéristique objective (indépendante de l'homme), et dont l'absence de loi descriptive est démontrée.

Remarque : hasard ou pas, la nature ne peut violer ses lois générales, par exemple de conservation de l'énergie, de la charge électrique, du moment cinétique, de la quantité d'information en Mécanique quantique, etc. Ces lois sont définies par l'homme précisément pour régir tous les cas de leur domaine de définition, et sans exception.

### Le hasard n'existe pas

Disons-le tout net, comme Kant dans [20] page 286 :

« Tout ce qui arrive est hypothétiquement nécessaire [=nécessaire par hypothèse] : c'est là un principe fondamental qui soumet dans le monde le changement à une loi, c'est-à-dire à une règle s'appliquant à l'existence nécessaire, sans laquelle règle il n'y aurait pas même de nature. Par conséquent, le principe : rien n'arrive par un hasard aveugle (*en latin : in mundo non datur casus*) est une loi *a priori* de la nature. »

**« Rien n'arrive par un hasard aveugle est une loi a priori de la nature. »**  
(Rappel : c'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception.)

Ou comme René Thom, mathématicien médaille Fields 1958, dans [63] :

"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 pourrions jamais décrire, donc jamais comprendre."

Ou plus brièvement, comme Henri Poincaré dans [65] :

« Le hasard n'est que la mesure de notre ignorance. »

Ou enfin de façon imagée, comme Einstein :

« Gott würfelt nicht » (Dieu ne joue pas aux dés : la nature ne fait pas n'importe quoi). Einstein disait cela pour s'opposer à l'interprétation de Copenhague de la Mécanique quantique.

Expliquons cela.

### Le besoin de rigueur dans l'invocation du hasard

*Quand les gens attribuent-ils quelque chose au hasard ?*

Quand une personne affirme que quelque chose est dû au hasard, c'est parce qu'elle n'en connaît pas la cause, donc ne sait pas à quelles circonstances et quelle loi cette chose est due ; c'est peut-être aussi parce qu'elle pense que personne ne sait. C'est là du « *hasard par ignorance* », une confusion entre imprédictibilité et hasard.

Cas particulier d'ignorance : il arrive que l'imprédictibilité ou l'insuffisance de précision soient dues à la complexité, au nombre de variables du problème. C'est le cas, par exemple, dans le diagnostic d'un psychiatre, dans la prévision d'un cours de bourse par un investisseur ou dans la prédiction d'une évolution du chômage par un politicien.

### L'attribution d'une cause au hasard exige une démonstration

Affirmer qu'une situation, l'état d'un système ou une évolution, sont dus au hasard demande autant de rigueur qu'affirmer qu'ils sont régis par une loi de la physique.

A celui qui me dit : « *c'est dû au hasard* », je réponds : « *prouvez-le !* ».

L'affirmation « C'est dû au hasard » doit être prouvée par celui qui la formule, avec la même rigueur que la proposition « C'est dû à la loi X ». Or, à part les lois résultant d'une déduction purement logique (qui ne nous apprennent rien, car leur contenu résulte entièrement de leurs prémisses) *une loi de la nature ne se démontre pas*, elle est postulée par induction à partir de phénomènes constatés et de leur évolution, et on l'admet à titre provisoire jusqu'à ce qu'un contre-exemple la fasse déclarer fautive : *une loi affirmée après examen contradictoire par des gens compétents est donc toujours supposée vraie jusqu'à preuve du contraire* (voir *Rationalisme critique de Karl Popper*).

*Aucune constatation d'un ensemble de phénomènes ne prouve qu'ils sont dus au hasard*

On ne peut pas démontrer *qu'il n'existe pas* de loi d'évolution d'une situation donnée, c'est-à-dire que d'une fois sur l'autre elle peut ne pas évoluer ou évoluer différemment ; on ne peut prouver qu'une loi *ne pourra pas être trouvée* ou qu'il existera des situations où une loi *sera nécessairement instable*, donc ne sera pas une loi d'évolution.

En mathématiques on peut prouver qu'une valeur de variable n'existe pas, mais pas qu'aucune relation n'existe. Lorsque John Bell a démontré que dans un problème de

Mécanique quantique « il n'existe pas de variable cachée » c'était à l'aide de corrélations, pas de façon certaine.

Quelles que soient les constatations faites sur des phénomènes et leur nombre, quel que soit l'étonnement qu'ils nous suggèrent, il est impossible d'en déduire une preuve d'absence de loi naturelle qui les régit ; et le fait de ne pas avoir découvert de loi ne prouve pas qu'il n'y en a aucune.

Lorsqu'on ne connaît pas de loi d'évolution d'une situation donnée on peut toujours affirmer cette ignorance, on ne peut jamais affirmer le caractère nécessaire du hasard, avec son absence de loi.

**« Le hasard est toujours invoqué au lieu de l'ignorance. »**

### Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité

En abandonnant le déterminisme philosophique au profit du déterminisme scientifique, puis du déterminisme statistique et enfin du déterminisme étendu nous avons abandonné la promesse de prédictibilité des résultats d'évolution ; nous avons simplement conservé la conséquence nécessaire d'une cause suffisante : le déclenchement immédiat et inévitable d'une évolution.

On peut s'étonner que les promesses du déterminisme (comprendre, prévoir et prédire) aient distingué prévoir et prédire : pouvoir prévoir n'est-ce pas pouvoir prédire ?

Eh bien, non ! Il existe des phénomènes naturels dont les lois d'évolution sont connues, mais dont l'application ne permet pas de formuler toutes les prédictions souhaitables ; voyons cela.

### Cas dans lesquels une évolution a un résultat imprédictible

L'imprédictibilité d'une situation ou d'un résultat d'évolution peut avoir des causes diverses, mais ne constitue pas une preuve de hasard. Voici des cas d'imprédictibilité du résultat d'une évolution.

*1<sup>er</sup> cas : la nature statistique de l'évolution de l'objet – Prédictibilité statistique*

#### ▪ *Exemple 1*

Une loi physique d'évolution déterministe, l'équation de Schrödinger, fait qu'à un instant donné la position et la vitesse d'une particule en mouvement dans un champ électromagnétique ont des valeurs mesurables *possibles* régies par une loi statistique ; ces valeurs sont déterministes et leurs ensembles sont connus avant la mesure ; voir *Evolution vers un ensemble d'états superposés*.

Mais, à la fin de l'évolution, une valeur effectivement mesurée est choisie dans son ensemble par une opération brutale de décohérence qui n'est pas régie par l'équation de Schrödinger et n'est même pas déterministe, parce qu'il est impossible de la décrire et de l'exécuter de manière reproductible.

#### ▪ *Exemple 2*

Un système dynamique (système dont l'évolution est décrite par une suite d'itérations d'une fonction d'évolution déterministe), a fréquemment un état chaotique : il est calculable à chaque itération, mais imprédictible à long terme connaissant seulement son état initial. Il peut seulement être décrit à l'avance,

sous certaines conditions, par des statistiques comme un histogramme des états finaux.

Ces deux exemples relèvent du *déterminisme statistique*. Il nous suffit, pour le moment, de donner la définition suivante.

#### *Prédictibilité statistique d'une évolution*

Par définition, une évolution a une *prédictibilité statistique* si ses résultats sont stochastiques (=distribués selon une loi statistique) ; une expérience renouvelée plusieurs fois peut alors donner des résultats différents. Sa loi d'évolution est gouvernée par un déterminisme statistique où c'est *l'ensemble des résultats possibles qui est prédéterminé par les conditions de l'expérience et la loi d'évolution, non un résultat particulier*.

Lors d'une telle évolution, la nature refuse le résultat unique que l'homme désire ; c'est l'ensemble auquel ce résultat appartient qui est unique et prédéterminé, chaque expérience ayant un résultat appartenant à cet ensemble.

En outre, lors d'expériences renouvelées ou de changement de valeur initiale avant itération, les résultats sont distribués selon une loi de probabilité elle-même prédéterminée. On ne doit pas parler, alors, de résultat *au hasard* car il ne peut être quelconque, totalement imprévisible ; on parle de *déterminisme statistique* car seul le *choix de résultat* dans l'ensemble prédéterminé est imprévisible ; et il l'est parce que ce choix n'est régi par aucune loi : la décohérence est brutale, le choix d'une position dans le voisinage d'un point est arbitraire, etc.

Par définition, la distribution de ces résultats est alors *stochastique, pas au hasard*.

#### *2<sup>ème</sup> cas : la complexité - Evolution d'une situation régie par une ou plusieurs loi(s) déterministes*

L'effet global d'un grand nombre de phénomènes déterministes, simultanés ou non, 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 (-273.15°C) fait qu'elles s'agitent sans cesse, l'énergie cinétique associée à leur vitesse caractérisant la température. Cette agitation, le *mouvement brownien*, les fait rebondir les unes sur les autres et sur les parois, conformément à des lois des chocs élastiques parfaitement connues et déterministes, donc sans intervention du hasard. Mais il est impossible de connaître la position et la vitesse à l'instant  $t$  d'une molécule particulière, 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 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, la direction et la vitesse d'un choc due à la largeur du paquet d'ondes de probabilité accompagnant chaque molécule. La loi des chocs élastiques est donc difficile à appliquer avec précision, les conditions initiales de chaque choc étant entachées d'erreurs non négligeables.

Cette impossibilité de connaître le mouvement précis d'une molécule particulière 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 particulière ;
- 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.

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 trop difficile la prévision de son résultat par calcul ou raisonnement. Le caractère aléatoire d'une évolution à l'échelle atomique (évolution décrite par la Mécanique quantique) caractérise un choix d'élément de l'ensemble (déterministe) des résultats que sont les valeurs propres possibles d'une équation, alors que le hasard caractérise l'inexistence d'un algorithme à résultats utilisables.

L'imprévisibilité par excès de complexité, qui n'existe pas en théorie dans la nature (ses évolutions déterministes étant arrêtées ou déclenchées par des lois d'interruption), sévit hélas en pratique. Elle n'affecte pas la nature, qui jamais n'hésite ou ne prévoit l'avenir (ce n'est pas un être pensant), 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 dernière, 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 son comportement) ont beau n'être, 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.

#### *Calculs trop complexes*

Un système soumis à des lois déterministes connues peut avoir une évolution précise exigeant des calculs trop complexes ou trop prolongés pour être réalisables.

#### *Exemples*

- prévoir quelle boule va « sortir » d'une sphère de tirage de loto connaissant les paramètres initiaux ;
- prévoir le temps qu'il fera à Lyon dans 30 jours.

### *Parade : une description qualitative*

La complexité des phénomènes naturels incite souvent l'homme à les décrire au moyen de théories générales, permettant une *connaissance en grandes lignes* avec des règles de possibilité et d'impossibilité, mais ne permettant pas la prédiction d'évolutions.

Exemple : la théorie de Darwin sur l'évolution des espèces par sélection naturelle prévoit la survie de celles dont les individus sont les mieux adaptés à leur environnement et les plus prolifiques. Mais elle ne permet pas de prédire l'évolution d'une espèce donnée ; on ne sait pas, par exemple, quelle espèce succèdera à *Homo sapiens*.

### *3<sup>ème</sup> cas : l'ignorance*

En plus de tout ce que nous ignorons en physique, il y a de nombreux systèmes dans la société humaine dont l'évolution est difficile à prévoir, ou à prédire avec la précision désirée, parce qu'on ne peut pas connaître tous les paramètres nécessaires. Exemples :

- des cours de bourse soumis à des anticipations d'investisseurs, optimistes ou non, influencés par des médias ou non ;
- ce qui se passe dans le subconscient, qu'on ne peut décrire avec assez de précision pour que les affects et les raisonnements soient prévisibles.

Certains hommes ont tendance à attribuer au hasard ce qu'ils ne peuvent expliquer ou prévoir. D'autres l'attribuent à Dieu : c'est le cas, par exemple, de la loi américaine qui admet comme cause d'une catastrophe naturelle « An act of God ».

En plus de l'ignorance de paramètres, il y a leur imprécision expérimentale : un résultat peut sembler « entaché de hasard » alors qu'il souffre d'imprécision matérielle ou opératoire.

### *4<sup>ème</sup> cas : l'imprécision*

Il y a des cas où la précision du résultat (calculé ou mesuré) de l'application d'une loi d'évolution peut être jugée insuffisante.

- *Imprécision des paramètres et hypothèses simplificatrices d'une loi d'évolution*  
La formulation mathématique d'une loi d'évolution a 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 : la dynamique (=mouvement) d'un pendule simple est décrite par une équation différentielle non linéaire. 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 du mouvement qui croissent avec l'amplitude des oscillations.

- *Imprécision ou non-convergence des calculs dans un délai acceptable*  
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, par exemple pour une propagation d'onde.

- *Changement de loi d'évolution suite à une transition de phase*  
Une évolution peut être soumise à des lois successives, par exemple lors d'un changement de phase. Le déterminisme étendu prend en compte ce problème avec ses lois d'interruption.
- Voir enfin, plus bas, *La sensibilité aux conditions initiales*.

#### 5<sup>ème</sup> cas : l'instabilité

Les fluctuations quantiques d'énergie sont dues à une instabilité intrinsèque, une *impossibilité* de définir une énergie à un instant donné à un endroit donné, car elle varie constamment et sans cause ; cette impossibilité résulte du *principe d'incertitude de Heisenberg*, théorème démontré en Mécanique quantique.

#### 6<sup>ème</sup> cas : la sensibilité aux conditions initiales

Il y a des lois d'évolution déterministe chaotique où une prédiction précise du changement exige une impossible connaissance de ses paramètres avec une précision infinie. Exemple : trajectoire d'un astéroïde du système solaire, soumise aux perturbations gravitationnelles de l'énorme Jupiter et des autres planètes ; Henri Poincaré a démontré l'impossibilité en étudiant le *Problème des trois corps*.

Nous approfondirons ce sujet plus bas au paragraphe *Déterminisme des processus itératifs*.

#### 7<sup>ème</sup> cas : l'exigence d'un raisonnement algorithmique

Lire d'abord en annexe *Complétude d'une axiomatique*.

Les réponses à certaines questions légitimes exigent un raisonnement logique à étapes multiples ; ces réponses ne peuvent résulter d'une simple synthèse d'informations.

Un tel raisonnement est décrit par un algorithme, suite d'étapes de calcul parcourues en tenant compte de valeurs de données au moyen de choix (dits *procéduraux*) du type :

« Si telle condition est remplie continuer à l'étape  $E_n$ , sinon continuer à l'étape  $E_p$  ».

Le résultat d'un tel parcours, donc du raisonnement, dépend des valeurs de départ et de valeurs calculées précédemment par l'algorithme : il est donc imprévisible au vu des seules données de départ.

#### *Exemple d'algorithme* : (source [67])

Le modèle économique appelé "Mésange" (graphique ci-dessous), prend en compte de nombreux mécanismes qui interagissent pour décrire ce qui se passe dans l'économie française lorsqu'on baisse les coûts salariaux, par exemple lors d'une baisse des charges des entreprises. De taille moyenne pour un modèle économique, Mésange comprend environ 500 équations.

Lorsqu'un résultat nécessite un tel algorithme, il faut souvent plusieurs années de travail à des spécialistes pour en écrire le programme. Et lorsque des dizaines d'exécutions de ce programme avec des jeux de paramètres différents ne permettent pas d'en déduire des lois de comportement du résultat simples à expliquer au public, il faut s'abstenir d'invoquer le hasard dans des publications...

**Schéma reprenant les différents mécanismes économiques attendus d'une baisse du coût salarial unitaire (CSU)**

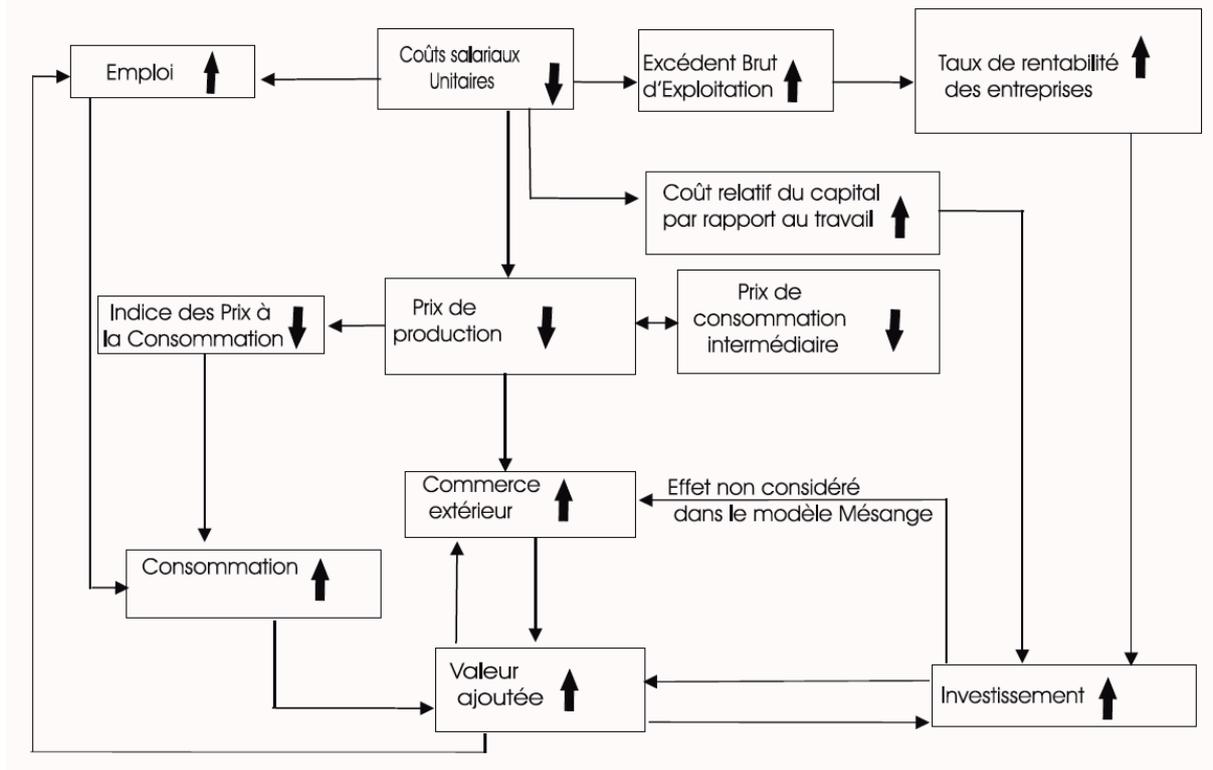


Schéma du modèle Mésange

*8<sup>ème</sup> cas : des exigences de prédictibilité impossibles à satisfaire*

La curiosité fait souvent poser à l'homme des questions auxquelles la nature n'a pas de réponse. Nous avons vu plus haut l'exemple de la décomposition radioactive, où on ne peut savoir quel atome se décomposera le premier et quand. Nous avons aussi vu le caractère probabiliste des positions et vitesses de particules. Il y a également le phénomène de décohérence de la physique quantique, où l'interaction d'une superposition d'états quantiques avec l'environnement macroscopique choisit une des solutions superposées de manière imprévisible. Il y a enfin le phénomène des fluctuations quantiques, les trajectoires chaotiques des astéroïdes, etc.

Il y a des cas où *la loi d'évolution que la nature applique ne peut fournir la précision que nous voudrions*. La loi de décomposition radioactive ne s'applique pas à un atome, mais à une population où chaque atome a une certaine probabilité de se décomposer en un intervalle de temps donné : on ne peut lui faire dire quelque chose pour *un* atome.

**« Il y a des évolutions régies par une loi d'ensemble ne permettant pas de connaître des événements particuliers ou de savoir ce que devient un des éléments. »**

Il y a aussi les lois de l'espace-temps de la Relativité, où l'ordre de survenance de deux événements *A* et *B* peut être différent pour deux observateurs différents : impossible de faire dire à la nature quel événement est *absolument* le premier parce qu'il n'y a pas, dans l'Univers, de temps absolu (contrairement à ce que postulait Newton dans son célèbre ouvrage *Principia* [9]).

**« Dans l'espace-temps relativiste il n'y a pas de temps absolu : la date-heure d'un événement dépend de la position relative de l'observateur et de son mouvement. »**

**« Il n'y a pas, non plus, d'ordre absolu de deux événements : cet ordre dépend de la position de l'observateur et de son mouvement. »**

Il y a aussi *l'intrication*, où deux photons générés ensemble et partageant une même énergie - pourtant distants de plusieurs kilomètres - cèdent cette énergie et disparaissent ensemble si on capture un seul d'entre eux, malgré la limitation de vitesse d'une propagation de conséquence à celle de la lumière, car les deux photons formant un même objet la disparition de l'un est en même temps disparition de l'autre [96]. Un éventuel désir de connaître l'existence de l'un des deux sans impacter l'autre ne peut être satisfait.

**« Dans certaines expériences un système intriqué peut grandir indéfiniment, sans cesser de se comporter comme s'il est tout entier au même point de l'espace : on dit que dans ce cas "l'espace n'est pas séparable". »**

Il y a encore le [\*Principe d'incertitude de Heisenberg\*](#), etc.

Toutes ces impossibilités d'obtenir le résultat que nous voulons, ces limitations de la connaissance à ce que la nature veut bien nous dire, ne mettent pas en cause le déterminisme : chaque cause a bien sa (ou ses) loi(s)-conséquence(s), que la nature applique toujours et sans délai, mais c'est à l'homme d'accepter de la connaître sous les formes qu'elle a, pas sous celles qu'il voudrait qu'elle ait.

Ainsi, comme nous ne pourrions jamais voir une particule de l'échelle atomique, nous devons nous contenter de la connaître par l'intermédiaire d'équations qui en décrivent les propriétés, notamment de l'équation fondamentale de la Mécanique quantique, dite « de Schrödinger », qui en décrit l'évolution dans le temps et l'espace. Nous devons renoncer à savoir, à un instant donné, la position et la vitesse de la particule, dont nous n'aurons jamais que des probabilités ou des densités de probabilité, c'est-à-dire une vision floue.

Nous devons alors comprendre qu'une particule peut se trouver à une infinité d'endroits à la fois, un volume donné autour d'un endroit donné ayant alors une certaine probabilité de présence. A une position donnée une particule peut avoir une infinité de vitesses, chacune aussi probabiliste. Une particule peut aussi parcourir une infinité de trajectoires à la fois. Toutes ces réalités ne font intervenir aucun hasard, mais des distributions de probabilités qui limitent les valeurs possibles.

*9<sup>ème</sup> cas : le psychisme humain*

Le cerveau humain a des processus logiques prévisibles (exemple : les déductions rationnelles) et des processus imprévisibles (exemples : les pensées subconscientes, les intuitions, les associations d'idées). Les neurones de la pensée sont des objets matériels, donc toujours soumis à des lois naturelles lorsqu'ils s'excitent et agissent par interconnexion. Mais leurs processus subconscients (qui ont un rôle prépondérant) sont inaccessibles au sujet, qui ne peut donc les comprendre et encore moins en décrire les lois, malgré les progrès des recherches actuelles.

L'imprédictibilité de la pensée humaine ne vient donc pas des processus neuronaux, mais de l'impossibilité d'en connaître suffisamment le fonctionnement

subconscient qui interprète en permanence les informations du cerveau (voir *Les pensées ne sont que des interprétations de l'état du cerveau par lui-même*).

### Les trois définitions du hasard

Il y a trois définitions rationnelles du hasard, hélas toutes négatives car de la forme « Est au hasard un phénomène qui n'est pas... ».

#### 1. Définition de René Thom

Le mathématicien René Thom, médaille Fields 1958, a défini le hasard dans [63] comme suit :

*"Je voudrais dire d'emblée que cette fascination de l'aléatoire [croire que le hasard existe dans la nature] 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 [et dogmatique] qui consiste à affirmer qu'il y a des phénomènes naturels que nous ne pourrions jamais décrire, donc jamais comprendre. [...]*

*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 a priori [c'est-à-dire le Principe d'intelligibilité]."*

René Thom décrit donc l'effet du hasard comme une impossibilité de description en un langage axiomatique (par exemple un langage de programmation) due à une impossibilité de comprendre et prévoir. Cette description correspond bien à la raison la plus souvent responsable de l'affirmation « C'est dû au hasard » : l'ignorance non assumée.

#### *L'irrégularité n'est pas un critère suffisant de hasard*

René Thom qualifie donc d'aléatoire tout processus (phénomène observé, nombre ou suite d'éléments) non modélisable par un algorithme. Selon cette définition, la suite des décimales d'un nombre irrationnel comme  $\sqrt{2}$  (que l'on sait générer par algorithme) n'est pas aléatoire, bien qu'elle n'ait aucune régularité connue ; l'irrégularité n'est donc pas un critère suffisant de hasard, puisqu'on sait générer par algorithme des suites irrégulières de chiffres.

Nous considérons comme aléatoires (soumis à un hasard imprévisible) les tirages du jeu de loto générés par une machine qui agite des boules. René Thom considérerait-il une telle machine comme un mécanisme, donc ses tirages comme non aléatoires ? Leur caractère aléatoire vient de la complexité de ses processus, où chaque boule subit de nombreux chocs, trop nombreux pour que l'on puisse prédire si elle sortira

ou non ; ce caractère aléatoire résulte donc de *l'imprévisibilité par complexité*, sujet que nous avons abordé précédemment ; ce n'est pas un hasard *démonstré*.

## 2. Définition par rencontre de chaînes de causalité indépendantes - Hasard par ignorance

Deux chaînes de causalité (déterministes par définition) issues d'origines indépendantes peuvent se rencontrer, créant alors une situation nouvelle qui n'était prévisible dans le déroulement d'aucune des deux chaînes prises séparément.

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 qui marche (hypothèse non évidente, car toutes deux issues du même phénomène initial du Big Bang), leur rencontre est imprévisible.

Voir aussi *Remarque sur l'unicité de l'évolution de l'Univers*.

Une personne qui n'avait pas prévu cette rencontre peut l'attribuer à tort au hasard. Mais une définition plus complète des circonstances, prenant en compte l'ensemble des deux phénomènes, élimine le hasard : à l'origine, toutes les conditions étaient réunies pour que plus tard la tuile blesse l'homme. L'étonnement ou la rareté d'un phénomène ne justifient pas qu'on attribue au hasard le résultat global de processus qui respectent les lois déterministes de la nature.

Les seuls domaines naturels où on trouve une évolution produisant un semblant de hasard sont la Mécanique quantique et les phénomènes chaotiques ; tous deux sont déterministes et relèvent de la prédictibilité stochastique du déterminisme statistique.

L'exemple de la tuile ci-dessus montre qu'une prévision basée sur le déterminisme doit prendre en compte *tous* les paramètres susceptibles d'intervenir dans l'évolution à prévoir, ce qui est souvent impossible. Refuser sciemment de prendre en compte la situation d'ensemble, c'est accepter l'ignorance et le risque de prédictions fausses.

L'indépendance des chaînes de causalité doit être démontrée, comme l'attribution au hasard. Mais allons plus loin.

La Relativité restreinte montre qu'un événement *A* ne peut être cause d'un événement *B* si l'information "*A* a eu lieu", voyageant à la vitesse de la lumière, arrive à la position de *B* après la survenance de *B*. Mais même si cette information arrive à la position de *B* avant l'événement *B* on peut seulement affirmer que *A* peut être la cause de *B*, pas que *A* est la cause de *B*.

Il y a ensuite la condition d'application du déterminisme : l'évolution doit être régie par une loi stable. Cette condition peut être remplie par tout phénomène naturel conservatif, mais pas par un phénomène où intervient l'action d'un être vivant qui pense, homme ou animal, comme dans le *déterminisme humain*.

## 3. Définition par la quantité d'information

On peut aussi définir comme aléatoire *un nombre dont l'écriture est plus concise (en nombre de signes ou de bits, par exemple) que le texte de tout algorithme capable de le générer* ; un tel nombre a donc une écriture incompressible par algorithme. 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 ! La définition ci-dessus n'a donc qu'un intérêt théorique.

Pour un système dont on décrit l'organisation au niveau microscopique, cette définition correspond, en thermodynamique, à une entropie élevée : il y a beaucoup d'informations ignorées sur sa structure, celle-ci est désorganisée, elle est « au hasard ».

#### Conclusion sur ces trois définitions du hasard

**« Le hasard qui régit une structure ou une évolution ne peut être défini que de manière négative, en disant ce qu'elle n'est pas. »**

Le caractère imprévisible qu'implique le hasard ne peut être défini que par une impossibilité de déduction ou de génération algorithmique.

*Conclusion : il n'y a pas de hasard, tout ce qui arrive devait arriver*

Conclusion de ce qui précède : attribuer ce qu'on n'explique pas, situation ou phénomène, au hasard est toujours une erreur, une manière de ne pas admettre son ignorance.

#### Principe de fatalisme

Puisque toutes les attributions au hasard que l'on constate sont dues à l'ignorance, il est bon de préciser la position de Kant à la page 286 de la *Critique* [20] :

"Tout ce qui arrive est hypothétiquement nécessaire [postulé nécessaire] : c'est là un principe fondamental qui soumet dans le monde le changement à une loi, c'est-à-dire à une règle s'appliquant à l'existence nécessaire..."

Kant pense donc que les évolutions naturelles suivent un *Principe de fatalisme* :

(1) **« Tout ce qui arrive *devait* arriver, car toute évolution a une cause. »**

(2) **« Ce qui n'est pas arrivé ne pouvait pas arriver. »**

#### *Démonstration*

En vertu du *Principe de raison suffisante* (en abrégé : *principe de raison*), toute situation constatée résulte d'une cause (situation entraînant une évolution) qui a elle-même certainement existé et qui, à son tour, résultait d'une cause, etc. jusqu'au commencement du monde : on parle de *chaîne de causalité* de la situation constatée. Puisque tous les éléments de cette chaîne ont nécessairement existé, chacun comme conséquence du précédent et le premier comme conséquence du Big Bang, on peut parcourir en pensée toute la chaîne de causalité dans son sens normal des causes aux conséquences (du passé vers le présent) pour aboutir à la situation constatée ; celle-ci devait donc nécessairement survenir. Et toutes les évolutions ont été soumises à des *lois de la nature*, elles-mêmes soumises à la *règle de stabilité*.

### *Critique de cette démonstration et limitation de sa portée*

Cette démonstration suppose une limitation des phénomènes au monde macroscopique, car le parcours de la chaîne de causalité du passé vers le futur est supposé unique, ce qui exclut les résultats multiples d'évolution. Pour tenir compte de la possibilité de résultats multiples, on devrait remplacer la loi (1) ci-dessus par :

**« Tout ce qui arrive *pouvait* arriver, car toute évolution a une cause. »**

Le principe de fatalisme perdrait alors tout intérêt, car ce serait un truisme.

Au contraire, ce qui n'est pas arrivé n'a pas de chaîne de causalité remontant au Big Bang, et ne pouvait donc pas arriver.

### *Remarque sur les choix imprévisibles de la nature ou de l'homme*

A la fin d'une évolution déterministe régie par l'équation (continue et déterministe) de Schrödinger, le système peut être dans un état particulier appelé « superposition d'états ». Abandonné à lui-même, sans action extérieure, il subira (en général au bout d'un temps très court) une interaction avec son environnement, par exemple un échange de température ou l'intervention d'un dispositif de mesure. De telles interactions « choisissent » un état final visible et stable à l'échelle macroscopique parmi les états superposés, et suppriment les autres états. Elles sont impossibles à décrire avec précision, donc à prédire : elles ne sont pas déterministes. Donc si, à la fin de l'évolution déterministe du système, on considère le choix final comme faisant partie de ce système et de l'expérience, on ne peut plus s'attendre à ce que l'évolution soit déterministe puisqu'elle est perturbée de manière impossible à préciser. *L'évolution déterministe prend donc fin avant le choix final qui en détermine le résultat.*

Plus généralement, on ne doit pas chercher le caractère déterministe d'un phénomène impossible à décrire avec précision comme une pensée humaine, dans laquelle interviennent des processus cognitifs subconscients. Comme nul ne connaît ces processus, on ne peut chercher à en prévoir le déroulement et à en prédire le résultat ; on ne peut donc parler de déterminisme à leur sujet, bien que les processus cognitifs soient tous des interprétations par le cerveau de l'état de ses neurones (voir *Conscience de*), donc des phénomènes matériels déterministes : Kant avait déjà remarqué ce paradoxe.

### L'évolution de l'Univers depuis le Big Bang n'était pas prévisible

Toute loi d'évolution a un résultat déterministe, sauf lorsque son application se termine par un choix :

1. Choix d'une valeur de variable continue (position, etc.) affectée d'une densité de probabilité.
2. Choix d'un des états d'une superposition quantique par décohérence. On peut considérer que le résultat de ce choix est sans conséquence pour l'évolution ultérieure, les états superposés étant équivalents, notamment en énergie : l'évolution ultérieure est donc prévisible.
3. Choix d'une des branches d'une bifurcation. On peut considérer que la branche choisie dépend d'un état de système englobant qui est déterministe, donc que ce choix est aussi prévisible.

Comme à l'échelle atomique (à laquelle se ramènent les lois d'évolution macroscopique) il n'y a pas de frottement, le résultat de toute évolution commencée est, en dernière analyse, prévisible au sens du déterminisme statistique.

Mais contrairement au cas des univers de Laplace et de Newton, cela ne suffit pas pour que toute évolution y ait été (et soit encore) prévisible : dans le cas 1 ci-dessus on peut seulement prédire une valeur avec un intervalle de probabilité. Parfois cet intervalle est insignifiant à l'échelle macroscopique, mais parfois il est amplifié comme lors d'une sensibilité aux conditions initiales.

En outre, *le début* d'une évolution peut résulter d'un autre choix, lui nécessairement non déterministe : un choix fait par un être vivant. Les choix humains, par exemple, sont imprévisibles car soumis à son subconscient, et ces choix comptent : penser aux bombes atomiques de 1945, par exemple. Le raisonnement dépasse alors la dispute entre matérialistes et idéalistes concernant l'intervention ou non d'une transcendance dans les choix humains : même les matérialistes ont une pensée dont la plupart des raisonnements ont une part d'imprévisibilité subconsciente ! Mais l'imprévisibilité des décisions humaines s'explique par ce subconscient sans intervention transcendante. Et la Terre fourmille d'êtres vivants jouissant d'une liberté de ce genre.

Conclusion :

**« En toute rigueur l'évolution de l'Univers est imprévisible. »**

### **La conscience et le cerveau interpréteur**

Ce chapitre décrit la nature et le fonctionnement de la *conscience d'un objet* et de la *conscience de soi* : pour une personne, qu'est-ce que « avoir conscience de » ? Comment son esprit passe-t-il de perceptions des sens et d'abstractions diverses à l'impression de conscience ? Qu'est-ce que la conscience en tant qu'ensemble de phénomènes psychiques ?

Sources : [51], [52], [42], [44]

### La conscience, ensemble de processus interpréteurs

Le texte suivant résume le fonctionnement de la faculté *psychique* de conscience. Voici des définitions dont nous aurons besoin.

#### *Représentation*

Le mot représentation a deux significations :

- Acte par lequel l'esprit du sujet se représente une chose (son objet, par exemple un phénomène) tel qu'elle est à un instant donné. C'est une mise en relation de l'objet avec l'ensemble de données mentales qui le représentent dans l'esprit du sujet. L'objet peut être externe à l'esprit (phénomène) ou interne (concept pur).  
L'objet qu'un sujet se représente est *présent à son esprit* (=en mémoire de travail) et fait l'objet d'une intuition puis d'un entendement, et souvent d'une réflexion visant une compréhension.
- Résultat de cet acte : l'ensemble de données mentales précédent, en mémoire de travail, dont l'esprit peut prendre conscience par intuition, entendement ou raison.

### *Conceptualisation*

Une représentation n'est consciente que sous forme d'un concept, dont le processus général de formation s'appelle *conceptualisation*.

### *Présence à l'esprit – Prise de conscience*

Un phénomène ou un objet est dit *présent à l'esprit* (qui l'a pris en compte en en *prenant conscience*) lorsque sa représentation est en mémoire de travail et qu'elle a commencé à être appréhendée par l'entendement (=compréhension), ou qu'elle est associée à un concept issu de l'intuition, de l'entendement, de la raison ou de l'imagination.

La prise de conscience d'une représentation se fait par conceptualisation.

### *Psychisme*

Le substantif psychisme désigne l'ensemble, conscient ou inconscient, considéré dans sa totalité ou partiellement, des phénomènes et *processus* relevant de l'esprit, de l'intelligence et de l'affectivité, et constituant la vie psychique. Cet ensemble comprend les phénomènes conscients, relevant de l'état d'éveil, et les phénomènes non conscients, présents que le sujet soit éveillé ou non.

### *Processus*

Un processus est l'action d'un mécanisme mental d'un sujet ; c'est un enchaînement d'opérations exécutant des fonctions psychiques :

- Elaboration de concepts (conceptualisation) ;
- Fonctions *cognitives* (ensemble des facultés mentales d'acquisition, de gestion et d'utilisation des connaissances, notamment les fonctions entendement et mémoire. Elle traduit des représentations d'objets réels en symboles conceptuels et raisonne sur ces symboles) ;
- Jugements d'une affirmation (jugements vrai/faux et jugements de valeur) ;
- Raisonnements (déduire une affirmation d'autres, tenues pour vraies ; chercher un enchaînement de concepts produisant un résultat désiré...) ;
- Organisation par l'entendement et la raison de connaissances présentes à l'esprit : classification (appartenance à un ensemble) ; reconnaissance de concept ou de procédure (reconnaître en identifiant) ; sériation (trier des éléments selon un ordre croissant ou décroissant) ;
- Etc.

### *Parallélisme de processus*

Le psychisme est capable de lancer et d'exécuter spontanément un grand nombre de processus en parallèle (se déroulant simultanément).

Exemple : après avoir pris conscience d'une représentation :

- L'esprit en tire automatiquement des conséquences simples comme l'évaluation « Est-ce bon ou mauvais pour moi ? ».  
Cette évaluation a une *grandeur* « bon ou très bon ? » / « mauvais ou très mauvais ? » Les évaluations « très » peuvent déclencher des processus prioritaires interrompant des processus en cours.
- L'esprit cherche s'il y a dans sa mémoire des souvenirs qui ont quelque chose en commun avec la représentation actuelle. Chaque souvenir ainsi trouvé est apprécié aussitôt au sens « bon ou mauvais ».

Toutes ces opérations sont des processus lancés spontanément et simultanément sans que le sujet en ait conscience, et se déroulant en parallèle.

### Un vieux débat : la conscience est-elle transcendante ?

La présentation du livre récent sur la conscience [44] commence par :

"Ce livre renouvelle le débat séculaire sur la possibilité de réduire la conscience à un processus neuronal." Directeur de recherches au CNRS, l'auteur sait de quoi il parle. Voilà des siècles que des philosophes se demandent si l'esprit humain, avec sa conscience du monde et sa conscience de soi, est une conséquence du seul fonctionnement physique du cerveau. La conscience ne résulte-t-elle pas aussi (comme le croyait Descartes) de quelque chose d'immatériel, comme Dieu ? Puisque lors d'un rêve notre pensée vagabonde sans cause consciente, et puisqu'elle crée souvent des idées spontanément, comment ne pas supposer qu'elle a des facultés transcendantes ?

Le problème de la nature de la conscience humaine a une dimension métaphysique : est-elle d'origine exclusivement matérielle, intérieure à notre corps, ou a-t-elle en plus des causes non matérielles (transcendantes) comme l'influence divine ?

*Descartes, méfiant des interprétations de son esprit : Je suis une chose qui pense*

Au XVII<sup>e</sup> siècle, Descartes savait comme Platon que l'homme n'est pas conscient de la réalité, mais seulement des idées de son esprit, idées qui comprennent des représentations mentales des perceptions de ses sens. Croyant qu'il pouvait se tromper, et désirant malgré cela trouver la vérité sur la nature de son être fait d'un corps et d'un esprit, il commençait par mettre ses interprétations en doute dans [17] :

« Je suppose donc que toutes les choses que je vois sont fausses ; je me persuade que rien n'a jamais été de tout ce que ma mémoire remplie de mensonges me représente ; je pense n'avoir aucun sens ; je crois que le corps, la figure, l'étendue, le mouvement et le lieu ne sont que des fictions de mon esprit. Qu'est-ce donc qui pourra être estimé véritable ? » ([17] *Méditation seconde*)

Ces hypothèses relèvent du scepticisme.

Bien que doutant de tout, Descartes était certain d'exister au moins en tant que "chose qui doute" :

« De sorte qu'après y avoir bien pensé, et avoir soigneusement examiné toutes choses, enfin il faut conclure, et tenir pour constant que cette proposition : Je suis, j'existe, est nécessairement vraie, toutes les fois que je la prononce, ou que je la conçois en mon esprit. » ([17] *Méditation seconde*)

Descartes finit par conclure qu'en plus d'avoir un corps matériel, "substance corporelle, étendue", il avait aussi un esprit (une âme) "substance pensante, intelligente" :

« Mais qu'est-ce donc que je suis ? Une chose qui pense. Qu'est-ce qu'une chose qui pense ? C'est-à-dire une chose qui doute, qui conçoit, qui affirme, qui nie, qui veut, qui ne veut pas, qui imagine aussi, et qui sent. » ([17] *Méditation seconde*)

Dans les deux passages précédents, le "je" de "je suis" désigne à l'évidence l'objet de la *conscience de soi*, expression que Descartes n'utilise pas. Mais hélas, en se contentant de qualifier sa conscience de *substance pensante*, Descartes ne l'explique pas ; et en attribuant toutes choses à Dieu, il en admet la transcendance.

*Un professeur : « Aucune cause physique n'explique les abstractions humaines »*

En 2009, le livre d'un professeur de philosophie enseigne que « La nature abstraite de la pensée humaine l'empêche de résulter d'un phénomène exclusivement physique : aucun phénomène matériel ne crée d'abstraction ; quel que soit leur fonctionnement, les neurones ne suffisent pas pour expliquer la conscience humaine, il faut en plus quelque chose de transcendant. »

Nous allons voir pourquoi cette opinion si répandue est fautive : le phénomène matériel qui crée des abstractions est le cerveau interpréteur humain.

### Conscience de

On parle de *conscience de...* pour désigner les mécanismes psychiques par lesquels l'homme prend connaissance d'un objet présent à son esprit. On en parle avec les verbes avoir et être :

- Quand j'ai conscience d'un objet, il est *présent à mon esprit*, je peux en parler.
- Quand je suis conscient d'une situation, elle est présente à mon esprit.

*La conscience de est un état instantané du psychisme*

C'est une « photo » du contenu de l'esprit. Cet état change automatiquement au fur et à mesure que l'objet de conscience change : lorsque je suis conscient qu'un ballon vient vers moi, son image dans mon esprit (=sa photo) change (ou est remplacée) au fur et à mesure de son déplacement.

L'état où l'esprit a conscience de quelque chose n'est pas obtenu passivement, il résulte d'une attention qui est *intentionnelle*, que cette attention ait été déclenchée volontairement (par un raisonnement) ou par un réflexe.

*La conscience de résulte d'un ensemble de données (informations)*

Dans mon esprit, l'état d'un objet à un instant donné (l'ensemble des informations à son sujet dont je suis conscient) figure sous forme d'un ensemble de données appelé *représentation* de l'objet dont je suis conscient. Cet ensemble d'informations en représente à la fois *les caractéristiques* et *la signification psychologique* qu'il a pour moi, propriétés que je peux décrire et dont je peux parler car j'en suis conscient.

*Signification psychologique (sens psychique)*

Sentiment qu'inspire une pensée ou une perception. - Exemples :

- Pour un optimiste, la vie a un sens et mérite des efforts ; pour un *nihiliste* elle n'en a pas, et il peut se laisser aller à l'abattement comme à la révolte violente.
- Le nihilisme est une doctrine de désespoir pour qui aucune valeur n'a de réalité. Le nihiliste nie les valeurs morales, religieuses et sociales, car elles n'ont pas, à ses yeux, de *sens psychique*. Pour lui, aucun espoir n'est permis, aucun effort n'est justifié, aucune autorité n'est supportée.

Le sentiment ci-dessus est toujours fortement dépendant des conséquences imaginées à la suite de la perception ou de la pensée : le rôle de cette imagination (spontanée ou délibérée) est très important.

Cet ensemble d'informations dont j'ai conscience est la seule origine possible de mon appréhension de l'objet, puisque mon cerveau ne peut manipuler que les abstractions qu'il s'est construit ou possède depuis sa naissance.

**« Mon cerveau ne peut manipuler que les représentations qu'il s'est construit ou possède depuis sa naissance ».**

L'état psychique *conscience de* se confond donc avec cette représentation : lorsque je me souviens d'avoir eu *conscience de* quelque chose, ce sont *des données* que j'extrahis de ma mémoire.

*Justification : une conscience de est nécessairement un ensemble de données*

- 1<sup>ère</sup> raison : l'état d'un système est décrit par un ensemble de variables ayant une valeur à un instant donné. Si le système évolue dans le temps (en se déplaçant, en se transformant...) son état change, et certaines des variables qui le décrivent changent de valeur.

Or la *conscience de* est un état psychique à un instant donné, résultat pour un individu de l'état de certains de ses neurones et des excitations (signaux électrochimiques transportant des informations) qu'ils se sont transmis. A un instant donné, la *conscience de* est donc décrite par un ensemble de données, celui de l'état des neurones correspondants et des excitations émises et reçues jusqu'à cet instant-là.

Il y a donc un « code conscient », propre à chaque individu, qui décrit la représentation dont il a conscience à un instant donné. Selon [42] page 205 :

« La distribution des cellules actives et inactives compose un code interne qui reflète fidèlement le contenu de la perception subjective. Ce code conscient est stable et reproductible : ce sont toujours les mêmes neurones qui déchargent dès que le patient pense à Bill Clinton. Il suffit, pour les activer, d'imaginer le visage du président : la plupart des neurones du cortex temporal antérieur répondent avec la même sélectivité aux images réelles et aux images mentales. La mémoire suffit également à les réactiver. »

- 2<sup>ème</sup> raison : lorsque je suis conscient de quelque chose (et seulement si j'en suis conscient, ce qui implique que j'y fais attention), je peux en parler. Or les muscles qui agissent pour parler (ceux de la bouche, etc.) sont commandés par des neurones moteurs. Comme tous les neurones, ceux-ci sont activés par des signaux d'excitation et seulement de cette manière-là ; ils sont donc activés par des données, celles des signaux reçus, elles-mêmes provenant d'autres neurones, etc., l'origine de la chaîne de neurones étant la *conscience de*.

Pour activer une chaîne de neurones se terminant par les neurones moteurs de la parole, la *conscience de* ne peut donc être qu'un ensemble de données. Si l'origine des signaux activant la parole était une fonction *autonome* et *inconsciente* du psychisme elle ne pourrait pas émettre des signaux aboutissant à des paroles cohérentes, fonction du seul contenu de la *conscience de*.

*La conscience d'une représentation est celle de son concept, et seulement celle-là*  
L'ensemble de données décrivant un objet, qu'il soit concret (phénomène) ou abstrait, présent à l'esprit ou en mémoire de long terme, est sa *représentation*. Dire que l'esprit est conscient d'un concept, c'est dire que la représentation dont il est conscient est interprétée par lui sous forme de ce concept, que c'est ainsi qu'il la voit.

Représentation et concept correspondent au même état des mêmes neurones ; les notions de *représentation* et de *concept* sont deux manières complémentaires de décrire cet état, comme en physique la matière et l'énergie.

*Toute prise de conscience est accompagnée d'un affect*

Chaque arrivée d'une représentation en mémoire de travail provoque sa conceptualisation par l'entendement : elle devient présente à l'esprit sous forme de concept. Ce concept est accompagné d'une évaluation spontanée qui le juge « favorable » ou « défavorable », « prometteur » ou « inquiétant ». En fonction de cette évaluation et de son intensité, la raison intervient éventuellement pour approfondir le concept et ses conséquences, et chaque étape de cet approfondissement est accompagnée d'un jugement de valeur spontané.

Conscience (tout court)

La *conscience* (tout court) est l'ensemble des processus psychiques permettant la connaissance du monde et de soi-même à l'état d'éveil : attention, *conscience des autres* et de soi, fonctions psychiques, représentations et affects. Les fonctions psychiques manipulent des données abstraites (les représentations) pour les mémoriser, raisonner sur elles et commander des actions musculaires. Du point de vue physiologique les fonctions résultent d'états et d'excitations de neurones.

On se représente parfois cette forme de *conscience* sous forme d'*appareil virtuel* regroupant des fonctions psychiques ; on dit par exemple : « les fonctions nécessaires à l'entendement sont *dans la conscience* ». On parle aussi d'*appareil inconscient* pour le dispositif virtuel où se produisent les phénomènes psychiques inaccessibles à la *conscience* ; on dit par exemple : « la faculté de reconnaissance des visages fait partie de l'inconscient ».

*La conscience en tant que processus interpréteur*

Kant pense que la conscience fonctionne comme un interpréteur dont le logiciel est le même pour toutes les représentations et tous les raisonnements, donc indépendant de cas particuliers de phénomène ou de raisonnement. Nous avons aujourd'hui la même interprétation du fonctionnement de la conscience.

*Conscience des actes et des procédures*

L'esprit de l'homme a une conscience de ses actes et opérations mentales, en plus de celle de ses représentations évoquée à propos de la conscience de soi. Il se souvient de ses gestes et des procédures (suites de gestes ou d'opérations mentales) utilisées pour résoudre un problème particulier.

"Je me souviens du chemin pour aller à gare et de la méthode d'addition de deux nombres."

L'homme qui a conscience de ses actes et de ses pensées s'en souvient et peut les reproduire. Il peut y réfléchir et en induire des méthodes valables pour tous les cas semblables ; exemples : la méthode pour additionner deux fractions, la méthode de dérivation d'une fonction trigonométrique. Enfin, il peut reconnaître dans une suite d'actions ou de pensées un cas particulier d'une procédure plus générale : si on me présente un raisonnement en trois étapes, je sais reconnaître s'il s'agit d'un syllogisme.

## Interprétation - Processus de la conscience

Source : [43]

*Les pensées ne sont que des interprétations de l'état du cerveau par lui-même*

Notre psychisme est incapable de manipuler des objets physiques. Il ne manipule que des abstractions qui les représentent appelées concepts, et nos facultés n'ont que deux origines possibles : celles dont nous avons hérité de nos ancêtres en naissant, par notre génome [57], et celles que nous nous sommes construites depuis - notamment en nous représentant mentalement le monde que nous percevons.

Dans mon esprit, c'est une abstraction appelée *représentation* qui tient lieu d'objet, réel ou abstrait. Mon esprit ne peut pas voir ma maison physique, il "voit" son image abstraite (un phénomène dont est issue une représentation) et il la considère comme réelle. Et c'est sur le concept associé à cette représentation, sur ce qu'il en voit comme sur ce qu'il en imagine, qu'il raisonne si nécessaire ; c'est son seul accès à la réalité, c'est ce qui en tient lieu pour l'esprit. Voir *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets (doctrine)*.

Cette constatation réfute donc l'argument philosophique « *Aucune cause physique n'explique les abstractions humaines* » : c'est bien une telle cause, le fonctionnement de notre cerveau, qui explique toute notre pensée, avec sa conscience et ses abstractions ; nous l'avons vérifié à l'aide d'enregistrements de l'activité cérébrale.

Notre système nerveux transmet les perceptions de nos sens à notre cerveau, qui les interprète. La représentation en mémoire de travail d'une image perçue est interprétée en tant qu'image, parce que nous avons appris depuis la naissance à l'interpréter comme cela. Les lettres et mots d'un texte sont interprétés comme tels parce que nous avons appris à lire. Une sensation de brûlure est interprétée comme de la chaleur et une douleur à l'endroit correspondant du corps. Une suite de représentations correspondant à un ballon qui arrive vers moi est interprétée correctement, etc.

En outre, tous les événements perçus par nos sens externes et interne sont appréciés comme « Bons » ou « Mauvais » au fur et à mesure de leur interprétation, appréciation complétée par une prédiction « Prometteur » ou « Inquiétant ».

Le cerveau peut aussi créer des idées à partir de représentations et d'autres idées ; il n'a besoin d'aucune transcendance pour cela. Enfin, aucune expérience possible ne peut prouver une action transcendante, pas plus sur un cerveau que sur quoi que ce soit d'autre dans l'Univers ; nous allons développer cela.

### Modèle informatique du psychisme

Nous pouvons concevoir aujourd'hui les facultés de bas niveau du psychisme comme un ensemble de processeurs (ordinateurs) interconnectés fonctionnant en parallèle :

- Un processeur des informations provenant des sens, qui les met en mémoire de travail et les traduit en jugements qualitatifs de bas niveau : favorable/défavorable, prometteur/menaçant, etc. Ce processeur produit des perceptions.

- Un processeur d'intuition et d'entendement, qui interprète les perceptions et les suites de perceptions pour fournir des concepts de l'entendement, premier niveau de la compréhension. Ces concepts sont immédiatement jugés au sens favorable/défavorable.
- Un processeur de raisonnement, qui assemble rationnellement des concepts de l'entendement et de la raison, eux aussi appréciés au fur et à mesure de leur génération.
- Un processeur de la mémoire, au service des autres, avec des facultés de recherche, synthèse, analogie, conscience de soi, mémorisation des étapes de travail du processeur de raisonnement, etc. Ce processeur transfère sans cesse des représentations entre la mémoire de travail (à court terme) et la mémoire de long terme.
- Un processeur des affects, jugeant tout ce qui passe par la mémoire de travail et contrôlant le fonctionnement des autres processeurs, dont il lance et interrompt des traitements. C'est le *système d'exploitation* du psychisme, le siège des jugements de valeur, de la conscience et des émotions. Comme les autres, le processeur de raisonnement est à son service : ce n'est jamais la raison qui régit les choix d'une personne, contrairement à ce que pensait Descartes.

**« Nos choix ne sont pas régis par la raison, mais par les affects. »**

Tous ces processeurs fonctionnent comme des ordinateurs indépendants, partageant la même mémoire et se sous-traitant des raisonnements partiels sur des données fournies à chaque appel.

#### La rationalité scientifique préfère le matérialisme ou une doctrine équivalente

Le problème de la nature de la faculté humaine de conscience a une dimension philosophique : est-elle d'origine exclusivement matérielle, intérieure à notre Univers, ou a-t-elle en plus des causes non matérielles (transcendantes) comme l'influence divine ?

L'approche rationnelle adoptée par tous les scientifiques suppose la compréhension du monde et de ses lois physiques à partir de faits réels, ainsi que de théories dont nul ne peut prouver la fausseté (on ne peut jamais prouver la *vérité*, notion impossible à définir en toute rigueur, mais on peut prouver l'erreur d'un raisonnement ou la non-conformité d'une affirmation avec une expérience particulière).

#### *Une définition ou une théorie scientifique excluent l'influence et la volonté divines*

Qu'il soit ou non croyant, un scientifique ne peut invoquer l'influence de Dieu, de l'esprit ou de l'Idée pour expliquer un phénomène matériel qu'il étudie : il doit se comporter en matérialiste. S'il admettait la possibilité d'une origine ou d'une influence transcendante dans notre Univers, il renoncerait à en comprendre rationnellement certaines situations ou phénomènes à partir de faits vérifiables ou de théories falsifiables, donc à en prévoir l'évolution. Ayant besoin de comprendre les situations et de prévoir leur évolution, l'homme ne peut donc renoncer à postuler la rationalité du matérialisme, doctrine qu'aucune déduction logique ou causale n'impose. C'est pourquoi un scientifique cohérent peut aussi adopter la doctrine réaliste ou l'idéalisme transcendantal de Kant, tout aussi athées en matière de raisonnement scientifique que le matérialisme.

### *Infalsifiable*

Adjectif qui qualifie une affirmation dont on ne peut prouver la fausseté éventuelle ; c'est le contraire de *falsifiable*. Une hypothèse (ou une conjecture, ou une théorie) est dite falsifiable si on peut imaginer (ou mieux, créer expérimentalement) une situation où elle est prise en défaut, même si on ne peut pas imaginer de situation où elle se réalise - notamment parce qu'elle est indécidable ou spéculative. Exemples :

- La loi d'Ohm « L'intensité de courant électrique à travers une résistance est proportionnelle à la différence de potentiel entre ses bornes » est falsifiable ;
- L'affirmation « Ce feu de forêt a pour origine la volonté de Dieu » est infalsifiable.

Notre approche, dans ce texte, sera donc matérialiste. Nous postulerons que :

- La pensée est une conséquence du fonctionnement physique du cerveau, même si nous ne comprenons pas tous les détails de ce fonctionnement.
- Aucune influence sur la pensée (transcendante, spirituelle ou autre) ne s'exerce ou ne s'est exercée. La pensée et sa conscience supposent un cerveau vivant, et réciproquement un cerveau pense continuellement du seul fait qu'il vit, à l'état d'éveil ou de sommeil.

**« La conscience s'explique sans invoquer de transcendance. »**

*Une pensée non rationnelle, par exemple esthétique, a toute sa place*

Il ne faudrait pas déduire de ce qui précède que seule la pensée rationnelle est valable. J'aime la musique de Mozart sans savoir pourquoi ; comme toute impression esthétique, apprécier un morceau de musique ou une peinture se produit sans réflexion, spontanément et sans délai. Je ne vois d'ailleurs pas pourquoi il faudrait toujours comprendre *pourquoi* on éprouve ceci ou cela : souvent l'émotion suffit.

## **Le jugement humain**

### Vérité d'une connaissance d'objet

(Source : [20] page 148)

Si on définit la vérité d'une connaissance comme *l'accord de celle-ci avec son objet*, il n'existe pas de critère *universel* de vérité (=valable quel que soit l'objet de la connaissance). En effet, un tel critère devrait permettre de distinguer avec certitude entre les significations d'un objet et de la connaissance qu'on en a, ce qui est absurde par définition même du contenu d'une connaissance, qui est sa signification !

### *Vérité d'une proposition*

Mais qu'en est-il de la vérité d'une proposition ? Un texte que je lis dit-il la vérité sur son objet ? Pour en juger, je devrais connaître avec certitude la signification de l'objet ; mais si c'était le cas, pourquoi me donner la peine de lire le texte ? Pour vérifier si son auteur dit la vérité sur l'objet, c'est-à-dire comprend la même chose que moi ? Mais si, ne connaissant pas la vérité sur l'objet, je lis le texte pour l'apprendre de son auteur, je n'ai aucun moyen de savoir s'il dit vrai ; je peux tout au plus chercher dans le texte des contradictions avec des certitudes que j'ai par ailleurs, ou des erreurs *formelles*, problème abordé au paragraphe suivant. Arrêtons ici cette discussion, car elle sort du cadre de la métaphysique.

*Vérité formelle (qui a trait à la forme, indépendamment du sens)*

(Source : [20] pages 148-149)

Puisqu'une logique expose des règles *universelles* de l'entendement et de la raison, une proposition doit nécessairement les respecter toutes sous peine d'être fausse (de se contredire elle-même dans au moins un cas).

Mais un tel respect est *formel* : le fait qu'une proposition ne se contredise pas (=qu'elle soit formellement correcte) ne garantit pas qu'elle soit vraie, elle peut parfois contredire son objet. La logique pure n'a pas les moyens de découvrir, dans une proposition, une éventuelle erreur sur le contenu, mais seulement une erreur formelle.

Par définition, vérité *formelle* est synonyme de vérité *logique*.

*La vérité formelle d'un texte est l'absence de contradiction interne*

(Citation de [37] pages 56 à 58)

"La vérité *formelle* consiste simplement dans l'accord de la connaissance avec elle-même, en faisant complètement abstraction de tous les objets et de toute différence entre eux. Et par conséquent les critères formels universels de la vérité ne sont rien d'autre que les caractères logiques universels de l'accord de la connaissance avec elle-même, ou ce qui est la même chose - avec les lois universelles de l'entendement et de la raison.

Ces critères formels universels ne sont assurément pas suffisants pour la vérité objective, mais ils doivent cependant être considérés comme sa condition *sine qua non* [la satisfaction de tous ces critères est une condition nécessaire d'existence].

Car avant de se demander si la connaissance s'accorde avec l'objet, il faut d'abord se demander si la connaissance s'accorde avec elle-même (selon la forme). Et telle est l'affaire de la logique.

Les critères formels de la vérité en logique sont :

1. Le principe de contradiction, qui détermine la possibilité logique d'une connaissance ;

[Et le *principe de déterminabilité d'un concept*, conséquence du principe de contradiction ;]

2. Le principe de raison suffisante, qui détermine la réalité logique d'une connaissance.

*Principe de raison suffisante (aussi appelé Principe de raison)*

**« Tout ce qui existe (objet) et tout ce qui se produit (événement) doit avoir une cause due à une loi de la nature. »**

(Citation de [20] page 266)

"Le principe de raison suffisante [du déterminisme] est le fondement de toute expérience possible, c'est-à-dire de la connaissance objective des phénomènes relativement à la façon dont ils se rapportent les uns aux autres dans la succession du temps."

(Fin de citation)

Pour une étude complète voir [39].

La vérité logique d'une connaissance requiert en effet :

- Qu'elle soit logiquement possible, c'est-à-dire qu'elle ne se contredise pas. Mais cette marque de la vérité logique interne est seulement négative car une connaissance qui se contredit est assurément fausse, mais une connaissance qui ne se contredit pas n'est pas toujours vraie ;
- Qu'elle soit fondée logiquement, c'est-à-dire :
  - Qu'elle ait des principes :
    - ✓ qu'elle soit conforme au postulat de causalité
    - ✓ ou qu'elle soit une déduction logique d'une proposition certaine. (Voir *Les deux sortes de déduction causale*) ;
  - Qu'elle n'ait pas de conséquence fausse. C'est là un critère de vérité logique externe et de conformité à la rationalité.

Les deux règles suivantes s'appliquent :

Règle 1 De la vérité de la conséquence on peut conclure à la vérité de la connaissance *P* prise pour principe, mais de façon négative seulement : si une conséquence fausse suit d'une connaissance *P*, alors cette connaissance *P* elle-même est fausse. Car si le principe est vrai, la conséquence également devrait être vraie, puisque la conséquence est déterminée par le principe.

Mais on ne peut pas conclure à l'inverse : « si aucune conséquence fausse ne découle d'une connaissance *P*, cette dernière est vraie » ; car d'un principe faux on peut conclure des conséquences vraies.

*[Raisonnement apagogique (=par l'absurde)*

Ce mode de raisonnement, selon lequel la conséquence peut seulement être un critère négativement et indirectement suffisant de la vérité de la connaissance, est appelé en logique le mode apagogique (en latin : *modus tollens*).

*Apagogie – Apagogique*

- Apagogie : raisonnement par lequel on démontre la vérité d'une proposition en prouvant l'impossibilité ou l'absurdité de la proposition contraire.
- Apagogique : par l'absurde.

Conséquence importante :

Il suffit de tirer *une seule* conséquence fausse d'une connaissance pour faire la preuve de sa fausseté, alors que mille conséquences vraies n'en prouvent pas la vérité dans tous les cas.]

*Origine du critère moderne de vérité scientifique*

(Source : [20] page 650)

Kant remarque fort justement qu'il est plus facile et plus rigoureux de chercher si une proposition ou une thèse est *fausse* grâce à un seul contre-exemple, que de chercher si elle est *vraie* connaissant tous ses cas possibles d'application.

*La vérité par consensus*

Cette règle est d'une grande importance, car la méthode scientifique moderne de validation d'une théorie qui ne peut être prouvée de façon strictement déductive en résulte : *si aucun des spécialistes à qui la théorie a été soumise n'a pu la réfuter, par*

*expérience ou raisonnement, on admet qu'elle est vraie.* C'est là une vérité par consensus, essentiellement provisoire, mais c'est la démarche admise de nos jours.

**« Il suffit d'un contre-exemple pour prouver qu'une théorie est fausse. »**

Règle 2 *Si toutes les conséquences d'une connaissance sont vraies, cette connaissance est vraie jusqu'à preuve du contraire.* Car s'il y avait quelque chose de faux dans la connaissance, il devrait se trouver également une conséquence fautive.

Donc de la conséquence on peut conclure à l'existence d'un principe [la possibilité d'une affirmation], mais sans être capable de prouver ce principe [cette affirmation]. C'est seulement de l'ensemble de toutes les conséquences qu'on peut conclure d'un *principe* qu'il est vrai [d'une affirmation qu'elle est vraie].

*[Raisonnement positif et direct (en latin : modus ponens)*

Avec ce mode de raisonnement positif et direct, la difficulté vient de ce qu'on ne peut connaître *apodictiquement* la totalité des conséquences. Ce mode de raisonnement ne produit qu'une connaissance vraisemblable et hypothétiquement vraie [=vraie par hypothèse], c'est-à-dire une hypothèse inductive selon laquelle « si beaucoup de conséquences sont vraies, toutes les autres peuvent également être vraies jusqu'à preuve du contraire ».]

(Fin de citation de [37])

*Apodictique*

Qui paraît subjectivement nécessaire ; qui a le caractère convaincant, évident d'une proposition démontrée – mais sans être démontré en toute rigueur.

Exemple : affirmation apodictique.

*Différence entre vérité formelle et vérité sémantique*

Un théorème démontré dans le cadre d'une axiomatique est vrai, mais sa signification et sa valeur dans un domaine réel auquel on applique l'axiomatique ne sont pas établis par la démonstration ; celle-ci n'est que *formelle*. Ainsi, un théorème formellement établi en mathématiques peut se révéler faux ou dénué de sens dans certains cas en physique, lorsqu'on y modélise la réalité par des fonctions et équations relevant d'une axiomatique.

En somme, l'application correcte des règles de déduction et l'existence d'un théorème ne garantissent rien quant à la sémantique de ce théorème. Pour tout théorème (ou formule, ou équation...) il faudra ensuite effectuer des vérifications :

- Ce qu'il affirme ou prédit est-il conforme à la réalité expérimentale ? (l'expérience confirme-t-elle la théorie ?)
- Les conséquences qu'on en tire ne contredisent-elles pas une autre certitude ? Une seule contradiction suffit pour prouver qu'un énoncé est faux.
- Si le théorème, la formule ou l'équation décrivent une *réalité physique*, une vérification empirique (=expérimentale) s'impose pour vérifier l'absence de résultat constituant un démenti.

Rationalisme - Principe de raison - Principe d'universelle intelligibilité

*Définition du rationalisme*

C'est la doctrine selon laquelle on postule le principe de raison déjà cité, et dont voici un autre énoncé :

**« Tout ce qui existe (situation) ou qui se produit (événement) a une raison d'être ou de se produire ».**

*Principe d'universelle intelligibilité (en abrégé : principe d'intelligibilité)*

Conséquence de la présence du mot *raison* dans la doctrine du rationalisme :

**« Tout ce qui existe ou qui se produit est intelligible. »**

*Principe de raison*

Voici un autre énoncé de la doctrine du rationalisme, basé sur la causalité.

Le rationalisme est la doctrine philosophique (de Descartes, de Kant, etc.) basée sur le *principe de raison*, appelé aussi par Aristote *principe de raison suffisante* :

**« Tout phénomène a une cause ; tout ce qui existe a une raison d'être. »**

(Il existe, pour tout ce qu'on observe dans la nature, une raison qui a suffi pour que cela existe ou se produise.)

Un rejet de ce principe permettrait que quelque chose naisse du néant, ce qui nous paraît impossible.

*Expérience d'un objet – Connaissance empirique*

- L'expérience est d'abord une connaissance acquise par les sens, l'intelligence ou les deux, et s'opposant à la connaissance innée (a priori) de l'esprit.
- C'est aussi l'acte de prendre conscience d'un objet physique par perception ; l'objet est alors dans l'esprit sous forme de représentation que celui-ci interprète avec ses facultés d'entendement et d'intelligence. Une connaissance issue de l'expérience est dite empirique.

Selon le principe de raison, toute réalité s'explique par une expérience, ce qui la rend intelligible. Et puisque tout phénomène naturel a une cause et que toute cause est intelligible :

**« Tout phénomène s'explique. »**

En tant que doctrine métaphysique, la rationalité est une foi dans la raison, dans l'évidence et dans la démonstration.

Le principe de raison peut être appliqué pour tirer une conséquence d'un fait ou d'une hypothèse ; exemple : « Si  $x > 3$  alors  $x^2 > 9$  ».

Le principe de raison n'a de sens en physique que si on adopte aussi le postulat de causalité ; en pratique on pourra raisonner en invoquant directement ce postulat.

*Le rationalisme s'oppose à l'empirisme*

Le rationalisme s'oppose à l'empirisme, en postulant que toute connaissance vient de concepts a priori pouvant faire l'objet de raisonnements logiques, ne dépendant pas de l'expérience, et dont nous avons une connaissance innée.

[L'homme ne peut concevoir un objet (réel ou abstrait) qu'en construisant une représentation de cet objet à partir de concepts qu'il connaît déjà et auxquels il la relie, donc initialement à partir de *concepts de base* : c'est là une vérité scientifique. Ainsi, le concept de « ligne droite » est construit à partir de l'image d'une ligne tracée et des attributs « infinie à droite », « infinie à gauche » et « épaisseur nulle » ; la notion de « droite » est un concept de base, a priori.]

### *Concept de base*

C'est un concept *a priori* compris intuitivement, comme le *point* ou le *temps* : on ne peut le définir à partir de concepts plus simples, il est irréductible.

Descartes écrit dans [19] :

"Qu'il y a des notions d'elles-mêmes si claires qu'on les obscurcit en les voulant définir à la façon de l'École, et qu'elles ne s'acquièrent point par étude, mais naissent avec nous."

Un concept a un *nom* qui le distingue d'autres concepts : on dit qu'il est *nommé*. L'esprit ne peut raisonner qu'avec des concepts nommés.

### *Remarque*

L'esprit comprend un concept de base de manière innée, mais se le représente comme un de ses cas particuliers physiques donné dans l'espace et le temps : je ne peux me représenter une ligne droite que comme l'image à cet instant d'une ligne droite dessinée ; je ne me représente un nombre entier que comme une propriété de multiplicité d'un ensemble (appelée son *cardinal*) ou un rang (appelé *ordinal*) dans une suite ordonnée d'éléments.

### Rationalisme critique de Karl Popper

Le rationalisme critique est la méthode scientifique actuelle en trois étapes pour trouver les lois de la nature. Elle a été proposée par Karl Popper [55].

Voici sa mise en œuvre.

1. D'abord l'homme imagine des lois pour rendre compte de ce qu'il observe et prévoir ce qu'il pourra observer. Voir *C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et il les définit sans exception*.
2. Ensuite l'homme postule que la nature obéira à ces nouvelles lois, conformément au *Principe de la primauté de la connaissance sur les objets*.
3. Enfin, tous les scientifiques qui le peuvent vérifient les lois énoncées (leurs calculs théoriques et leurs prédictions expérimentales). Il leur suffit de trouver une seule erreur dans une nouvelle loi pour que celle-ci soit fausse.

La vérité scientifique est donc aujourd'hui une *vérité par consensus de non-erreur*.

- Tant qu'une nouvelle loi n'a pas encore résisté à des tentatives d'en prouver la fausseté, elle est provisoire, c'est une conjecture proposée.
- Une nouvelle loi peut être entièrement expérimentale, sans base théorique ; c'est souvent le cas dans les sciences de la vie. Si elle est bien falsifiable, elle pourra être considérée comme valable provisoirement tant qu'aucun scientifique n'a formulé d'objection rédhitoire.

C'est pourquoi l'auteur de la loi doit la publier pour susciter des commentaires, sur Internet (dans des sites internationaux comme <https://arxiv.org>) et/ou dans des revues de classe mondiale comme *Nature* (<https://www.nature.com/>).

- Plus généralement, une loi proposée n'exige pas d'être comprise pour être valable. Il suffit :
  - qu'elle soit falsifiable ;
  - qu'elle n'ait pas d'objection connue et ne contredise pas une loi existante ;
  - et qu'elle respecte la *Règle de stabilité* pour que ses résultats soient reproductibles.

### L'aptitude à réfléchir ne garantit pas des conclusions justes

Beaucoup de personnes très intelligentes ont une culture exclusivement littéraire. Leurs raisonnements peuvent alors être faussés par l'insuffisance de connaissances scientifiques : par exemple ce qu'ils croient impossible ne l'est pas, faute de certaines connaissances mathématiques ou physiques.

Symétriquement, beaucoup de personnes de culture scientifique ignorent à peu près tout de la culture humaniste, notamment de la philosophie. Elles ne savent pas qu'un grand nombre de problèmes qu'elles rencontrent dans leur vie sociale et personnelle ont été étudiés par les penseurs du passé, qui en ont proposé des réponses.

Le problème de la culture déséquilibrée nous concerne tous, en nous empêchant de profiter de réflexions et de solutions de valeur déjà publiées ; la disponibilité du Web ne compense pas l'ignorance, et aucune personne ne peut raisonner sur des sujets dont elle ignore jusqu'à l'existence.

Ainsi, le Prix Nobel d'économie 2002 a été attribué au psychologue Daniel Kahneman pour avoir étudié en détail ce danger et proposé des solutions [183].

Les problèmes de jugement basé sur des informations incomplètes s'aggravent lorsque notre raison se base sur l'apparence du phénomène (sa représentation dans notre esprit), fausse ou surtout incomplète, pour en utiliser les informations et conclure.

Pour minimiser le risque de ne pas prendre en compte des faits importants, il faut profiter des connaissances d'autrui, donc communiquer et interagir.

*Le jugement n'utilise que ce qu'il voit, comme si ce qu'il ne voit pas n'existait pas*  
Kant écrit dans [50] page 236 : "On se trompe, non parce que l'entendement unit sans règle les concepts, mais parce qu'on nie d'un objet le caractère qu'on n'y aperçoit pas, et que l'on juge que ce dont on *n'est pas conscient* dans une chose *n'existe pas*."

En France, Jean Tirole, prix Nobel d'économie lui aussi, a publié en 2016 un ouvrage remarquable qui aborde ce sujet, dont on trouvera un extrait intéressant dans [184].

### Valeur

Définitions selon le dictionnaire [3] :

- Evaluation d'une chose en fonction de son utilité ;
- Qualité objective correspondant à un effet souhaité, à un but donné ;
- Qualité de ce qui est désiré ou estimé, ou au contraire rejeté, redouté.

Exemples de valeurs : vérité, justice, amour, beauté, etc.

Toute valeur est en même temps objet d'un désir et objet d'un jugement : le désir est la cause, le jugement, l'arbitre ; si l'un de ces deux facteurs disparaît, il n'y a plus de valeur.

Dans l'esprit humain, chaque valeur est automatiquement associée à un ou plusieurs affects sur lesquels le jugement peut se baser.

En plus des valeurs positives précédentes, il y a bien entendu des valeurs négatives correspondant à ce qui est détesté, craint, etc.

Une valeur « secondaire » peut être créée par une réflexion ou une interprétation de situation, en respectant d'éventuelles valeurs plus fortes.

Les valeurs d'une personne qui s'appliquent à une situation donnée sont ordonnées ; en cas de choix entre deux valeurs, le jugement se base toujours sur la plus forte.

*Les valeurs d'une personne sont toujours accompagnées d'aprioris* issus de son héritage génétique, de sa culture ou de son expérience, et agissant dans son subconscient. En France, par exemple, beaucoup de gens craignent les OGM et les retombées de la science ou de la mondialisation.

Voir *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*.

Le caractère rationnel n'est pas une valeur, contrairement à l'opinion de Kant et de Descartes, ce n'est qu'un critère de jugement esthétique des pensées. Donc :

**« La raison n'a pas de pouvoir en soi, ce n'est qu'un outil au service des instincts, pulsions et désirs dominants du moment. »**

#### *Pouvoir de la raison*

Nous savons aujourd'hui que ce que l'homme veut (désire) à un instant donné ne dépend pas de sa raison, car *celle-ci n'est qu'un outil au service de désirs non raisonnés*. Ce qu'il veut dépend de son état psychique, lui-même dépendant seulement de son héritage génétique, de sa culture et des circonstances ; ces conditions déterminent des quantités de neurotransmetteurs, qui déterminent à leur tour l'état de neurones et de leurs interconnexions, état que la conscience interprète sous forme de valeurs critères de jugement. Nous ne savons pas déduire le détail des volontés humaines d'états psychiques, mais ce n'est pas une raison pour croire à l'existence d'une volonté indépendante transcendante, notion aussi imaginaire que celle d'âme siège du spirituel.

Un homme qui a conscience de penser et d'avoir une représentation présente à l'esprit ne fait que sentir un état psychique de son réseau de neurones, sensation accompagnée d'émissions caractéristiques de neurotransmetteurs et d'une impression de bon/mauvais, prometteur/inquiétant, etc.

#### Culture (définition)

##### *Au niveau d'un groupe humain*

Définition : la culture est l'ensemble des valeurs, croyances et coutumes partagées par les membres d'un groupe (peuple, fidèles d'une religion, etc.) depuis suffisamment longtemps pour que chacun les ait intériorisées : elles leur paraissent inconsciemment naturelles et indiscutables). Ce partage résulte :

- De l'histoire commune ;
- De l'environnement géographique et climatique où le groupe vit depuis des générations ;
- De la (ou des) religion(s) les plus répandues dans le groupe ;
- Des lois morales ;
- Des coutumes sociales ;

- De l'éducation transmise aux enfants par les parents ou l'enseignement ;
- Des informations diffusées par les médias ;
- Des formes d'art dominantes depuis des décennies (littérature, peinture, sculpture, danse, architecture, cinéma, cuisine, etc.) ;

Une culture comprend, par exemple :

- Des habitudes et préférences dans des domaines comme la manière d'élever des enfants, la nourriture et la cuisine, les expressions et gestes utilisés pour exprimer son opinion, les relations avec les autres dans la vie familiale ou au travail, et la discipline que chacun s'impose – par exemple pour faire des efforts ou aborder un problème complexe ;
- Des valeurs comme les canons de beauté et les critères d'honnêteté ;
- Des croyances en matière de médecine, de cosmologie, de religion et de vie après la mort ;
- Des idéologies et une éthique en matière d'économie, de politique, etc.

La culture d'un groupe humain est en rapport avec *l'ethnie*, définie par son héritage génétique et socioculturel (en particulier la langue), l'espace géographique et la conscience de ses membres d'appartenir à un même groupe.

#### *Au niveau d'une personne*

La culture (l'acquis) résulte de celle de son groupe, qui lui a transmis ses valeurs, croyances et coutumes, ainsi que des connaissances et expériences issues de sa propre vie.

Mais la culture d'une personne est sans rapport avec sa couleur de peau ou d'autres caractéristiques provenant de sa naissance : *c'est une caractéristique transmise par la vie en société.*

Voir aussi, pour ses différences avec une culture : *Civilisation.*

#### Civilisation (définition)

*Une civilisation est définie par*

- une *culture*,
- une *société* (institutions, législation, modèle économique, etc.)
- et des *réalisations collectives* (infrastructures, sciences et techniques, architecture et autres arts, etc.).

#### *Comparaison de civilisations*

On ne peut pas parler de la supériorité d'une culture par rapport à une autre, mais une civilisation peut être supérieure à une autre dans la mesure où elle permet aux hommes une vie plus conforme à leurs valeurs culturelles et sociales.

Ainsi, des *institutions* permettant le règne de la justice, la sécurité, la solidarité, la préservation de la santé, l'enseignement et la démocratie correspondent à des valeurs désirables ; il en est de même pour des *réalisations collectives* permettant de se soigner, de s'instruire, de se distraire, de voyager, de bénéficier d'avancées technologiques et de réalisations artistiques ambitieuses.

### Les 3 déterminants des valeurs selon la psychologie cognitive

#### *Problématique*

Kant croit que l'homme a le pouvoir de déterminer librement ses actes et d'imposer à sa volonté d'être bonne, c'est-à-dire d'être régie par la raison et le devoir en surmontant ses inclinations. Voici un point de vue moderne qui nie l'existence d'un tel libre arbitre.

**« Il n'y a pas de pensée qui ne vienne du corps. »**

(Toute pensée est une interprétation par le cerveau de son propre état ; voir ci-dessus *Interprétation - Processus de la conscience*)

*Toute pensée a pour cause une émotion, se poursuit et s'achève avec de l'émotion*

La pensée de l'homme n'est qu'un outil au service de ses pulsions et désirs du moment : chaque fois qu'il réfléchit, l'homme cherche une solution pour satisfaire un désir ; il n'existe pas de réflexion sans but affectif, et un tel but est caractérisé par une valeur qui domine toutes les autres pour cette réflexion. C'est là un principe de causalité de la réflexion humaine, une partie du déterminisme humain. La psychologie moderne enseigne que la raison, la rationalité, la logique et la cohérence ne sont pas des valeurs.

#### *Problème de la liberté*

Il y a des circonstances où un sujet se sent si peu concerné qu'il peut réfléchir librement (sans être perturbé par des émotions, inclinations ou préjugés), par exemple pour calculer quel jour de la semaine tombait le 14 juillet 1789. Mais, dès que le résultat attendu d'une réflexion a une importance ressentie, il apparaît un problème de liberté : l'homme peut-il réfléchir librement, sans contrainte ? Lorsque sa réflexion aboutit à une décision, est-il libre de choisir ce qu'il veut ?

#### *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*

Trois catégories de circonstances déterminent le contexte dans lequel notre psychisme (conscience et subconscient) fonctionne, c'est-à-dire ses valeurs :

1. L'inné (héritage génétique) [57] ;
2. L'acquis (culture reçue, formation et éducation, expériences vécues) ;
3. Les circonstances (contexte du moment), comprenant :
  - Une situation réelle (exemples : danger immédiat, opportunité, faim...).
  - Un futur imaginé ; ce dernier représente le sens de la vie ou de l'action (pourquoi me donner du mal, quel espoir ai-je, que peut-il m'arriver...).Ainsi, un homme jugera une même tâche insupportable, désagréable ou très supportable selon l'avenir qu'il imagine s'il l'accomplit ; par exemple :
  - ✓ *Insupportable* s'il est obligé de l'accomplir pendant très longtemps sans profit personnel identifiable, comme un condamné aux travaux forcés ;
  - ✓ *Désagréable* si en l'accomplissant il gagne de quoi vivre, ce qui justifie de supporter le désagrément ;
  - ✓ *Très supportable* si en l'accomplissant il participe à une œuvre admirable qui lui vaudra le respect de son entourage.
  - L'interprétation du contexte et de l'acquis par le subconscient, qui produit des jugements de valeur non exprimés par des mots, mais ressentis et pris en compte.

A un instant donné, l'héritage et l'acquis d'une personne déterminent *ce qu'elle est* ; les circonstances déterminent *des contraintes, des opportunités* et *l'avenir qu'elle imagine*.

L'inné ne change que très peu pendant la vie d'un individu, car l'adaptation de son génome et des mécanismes par lesquels il s'exprime à ses conditions de vie est modeste et lente [57]. L'acquis s'enrichit chaque fois que nous apprenons quelque chose et s'appauvrit à chaque oubli ou déformation des informations mémorisées. Les circonstances changent évidemment tout le temps.

Conclusion : L'homme agit exclusivement en réponse au désir dominant du moment, qui résulte de la valeur qui domine son ressenti ; en ce sens-là, il n'a pas de liberté. Si un militaire prisonnier préfère subir la torture au lieu de révéler un secret à l'ennemi, c'est que son patriotisme domine sa douleur.

### *L'imprévisibilité de l'homme*

Les mécanismes génétiques et psychiques peuvent créer des comportements humains imprévisibles du fait de leur complexité, de l'influence du subconscient, d'un acquis variant sans cesse et de contextes toujours différents. Cela n'a pas de rapport avec le déterminisme et ne prouve pas l'existence du hasard.

### Les universaux, part importante de l'inné humain

#### *Définition*

Dans ce texte on appelle « *universaux* » des concepts universels, applicables à tous les hommes, quelles que soient leur race, leur origine géographique et l'époque. Ils caractérisent la culture, la société, le langage, le comportement et la psychologie d'une manière semblable pour toutes les sociétés humaines connues dans l'histoire.

Les universaux *moraux* sont des concepts toujours associés à des affects provoquant automatiquement, instinctivement, un jugement de valeur dans tout esprit humain. Ils concernent notamment :

- Une distinction entre le bien et le mal ;
- L'interdiction de faire violence à autrui (assassinat, torture, viol...) ;
- La honte et les tabous ;
- L'aptitude à s'identifier à autrui ;
- Les droits et les devoirs ;
- La justice, l'équité, l'honnêteté ;
- Rendre le bien pour le bien et le mal pour le mal ;
- L'admiration de la générosité ;
- L'obligation de punir le tort fait à la société, etc.

Les universaux *culturels* ne représentent pas toute la culture ; ils ne représentent que la partie de chaque culture commune à toutes (en termes mathématiques on dirait « l'intersection des divers ensembles de valeurs, croyances et coutumes constituant les cultures particulières »).

### *Exemples d'universaux*

- Dans [149] pages 285 à 292 on trouve une liste de 202 universaux qui ont un rapport avec la morale et la religion. En voici quelques-uns :
  - *Affection exprimée et ressentie* (nécessaire pour renforcer l'altruisme et la coopération) ;
  - *Statut social des aînés* (élément vital de la hiérarchie sociale, de la dominance, du respect pour la sagesse des aînés) ;
  - *Anthropomorphisme* (base de l'animisme, des dieux anthropomorphiques des Grecs et Romains, attribution de traits moraux humains aux dieux) ;
  - *Anticipation* (vitale pour tenir compte des conséquences de la situation présente), etc.
- Liste de quelque 200 universaux parmi 373 identifiés par Donald E. Brown [150], dont voici un court extrait où les universaux sont classés par catégories :
  - time; cyclicity of time; memory; anticipation; habituation; choice making (choosing alternatives); intention; ambivalence; emotions; self-control; fears; fear of death; ability to overcome some fears; risk-taking;
  - daily routines; rituals;
  - adjustments to environment; binary cognitive distinctions; pain; likes and dislikes; food preferences; making comparisons;
  - sexual attraction; sexual attractiveness; sex differences in spatial cognition and behavior;
  - self distinguished from other;
  - mental maps; territoriality; conflict;
  - sweets preferred; tabooed foods;
  - childbirth customs; childcare; females do more direct childcare; preference for own children and close kin (nepotism)...

### *Origine des universaux*

Les universaux résultent d'une structure psychologique commune à tous les hommes, que les divers parcours historiques et ajouts culturels n'ont pu que compléter sans en modifier les caractéristiques.

L'existence des universaux s'explique par une base biologique et génétique commune à tous les hommes et une évolution identique. A un instant donné de l'histoire de l'humanité, les universaux sont des caractéristiques d'une nature humaine universelle, et de la partie de cette nature qui n'a pas été modifiée depuis des millénaires par une culture ou des faits historiques particuliers. Ils font donc partie de « l'inné » (par opposition au reste de la culture, qui fait partie de « l'acquis »). Historiquement, les universaux ont évolué au même rythme que l'espèce humaine, sous l'influence de la sélection naturelle puis socioculturelle, progressivement et sur une durée de l'ordre de dix à cent mille ans.

**« Les universaux constituent une part importante du déterminisme humain. »**

Source : [151]

*Conséquence de l'existence des universaux : dignité et égalité des droits*

*Tous les êtres humains ont la même dignité et les mêmes droits, quels que soient leur pays d'origine ou de citoyenneté, leur couleur de peau, leur sexe, leur religion, etc. Ces droits sont inhérents au fait même d'être homme et sont inaliénables.*

Cette égalité est inscrite dans la *Déclaration universelle des droits de l'homme des Nations unies* [152] adoptée le 10 décembre 1948 et reconnue aujourd'hui par *tous* les 193 états membres des Nations unies. Mais entre la reconnaissance écrite et la démocratie réelle...

### Le libre arbitre

*Qu'est-ce que le libre arbitre ?*

Le libre arbitre est le pouvoir de choisir un acte en toute indépendance ou de ne rien faire, en échappant (croit-on) au déterminisme causal de la nature.

Remarquons d'abord qu'une liberté absolue est impossible : pour choisir, l'homme doit d'abord vivre, ce qui suppose des facultés de raisonnement limitées et orientées par son héritage génétique et ses connaissances (culture, expériences) du moment. Et tout choix se fait dans un contexte, circonstances dont il faut aussi tenir compte. Ce contexte comprend d'abord les lois de la nature, dont aucune action physique ne peut s'affranchir ; il comprend ensuite les déterminants des valeurs humaines à la base de tous ses désirs (voir *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*).

Idéaliste, Kant croit aussi en une liberté de l'esprit, basée sur la Raison, qu'il considère aussi comme toujours libre. Mais la neuropsychologie moderne montre que la Raison n'a aucun pouvoir, c'est un outil soumis aux désirs humains issus des trois déterminants précédents : génétique, acquis (culture, expérience) et contexte de l'instant.

Concernant le déterminisme causal, celui des lois de la nature, il faut rappeler qu'aucune action transcendante n'est possible d'après notre science : la pensée humaine ne subit aucune influence d'un autre être pensant, fut-il divin ; elle naît et demeure dans les limites de notre cerveau. Elle est donc libre de toute influence transcendante.

La pensée humaine est limitée par les possibilités matérielles de l'appareil cognitif : l'homme ne peut penser que ce que son cerveau lui permet de penser, avec son pouvoir de réflexion, sa mémoire, son imagination, ses schémas mentaux... Il a l'impression d'être libre de choisir, mais cette liberté est bornée par ces limites mentales.

L'homme fait des choix parce qu'il a un désir à satisfaire : il choisit *comment* le satisfaire. Chaque choix qu'il croit possible est évalué par l'homme en fonction de ses valeurs du moment. Il a l'impression d'être libre de juger et de décider. Il n'est pourtant maître ni de son héritage génétique, ni de son expérience – dont une partie est intériorisée et se manifeste de manière subconsciente. Sa liberté est réduite aux choix qui dépendent des circonstances, qu'il évaluera en fonction de ses valeurs innées et acquises. Le choix est donc toujours ramené aux mêmes valeurs, l'inné et

l'acquis, dont l'homme n'est pas maître. Et son jugement n'est pas libre non plus : ce qu'il a de rationnel n'est pas libre par définition puisque soumis à la Raison universelle, et ce qu'il a d'irrationnel résulte d'affects non maîtrisables. L'impression de liberté de l'homme est donc illusoire, sa liberté ne peut être absolue.

Rappelons ici que la raison n'est pas une valeur, ce n'est qu'un outil au service des affects. Elle régit la découverte des possibilités et de leurs conséquences, ainsi que la manière d'évaluer celles-ci en fonction des valeurs, elle ne définit aucune valeur.

C'est ainsi que l'homme prend une décision (librement, croit-il) en fonction de ce qu'il sait, qu'il imagine et qu'il ressent au moment où il la prend. Mais ce qu'il sait, imagine et ressent peut être fortement influencé par son entourage, surmoi qui exerce une pression sociale, ou par des informations fausses, par exemple trouvées sur Internet.

De telles informations sont générées sur-mesure pour chaque internaute, par des applications qui connaissent son profil (ses désirs, ses craintes, ses coordonnées, ses achats passés, ses recherches, etc.) suite à des navigations précédentes ; ce profilage systématique des utilisateurs du Web est fait par les outils de recherche comme Google et Bing, par les réseaux sociaux comme Facebook, par des vendeurs comme Amazon, et par des centaines de sociétés spécialisées qui revendent ensuite les profils. Tous ces prestataires de services accumulent les données fournies par chaque utilisateur pour les utiliser en l'influençant, ou les revendre à des entreprises ou des organisations politiques. Ceux qui génèrent de telles informations sur-mesure, à chaque dialogue, ne le font pas pour diffuser la vérité mais pour servir leurs intérêts, et à force de recevoir encore et encore des informations allant dans le même sens beaucoup d'internautes sont influencés et perdent une part de leur liberté.

L'utilisateur du Web et des réseaux sociaux devrait donc savoir qu'il ne peut plus se faire confiance, parce qu'il est espionné, manipulé et le sera de plus en plus.

### *Considérations philosophiques sur le déterminisme et le libre arbitre*

Traditionnellement, la philosophie distingue deux cas :

1. Les décisions humaines sont libres parce qu'il n'y a pas de contrainte ou de loi ; rien n'empêche aujourd'hui un homme de faire ce qu'il veut :
  - ni les lois naturelles, le progrès scientifique et l'accumulation de moyens permettant à l'homme les actes les plus extraordinaires ;
  - ni les règles morales, les nombreux matérialistes athées ne se sentant pas tenus d'en respecter.
2. Les décisions humaines ne sont pas libres parce qu'il y a des lois morales, des coutumes et des lois juridiques.
  - Les lois morales ont une origine ancienne, sous l'influence des universaux et des religions ;
  - Les coutumes appartiennent aux ethnies, conséquences de leurs valeurs ;
  - Les lois juridiques ont été définies par les sociétés en même temps que se structurait leur civilisation.

### *La thèse d'absence de libre arbitre est combattue*

La thèse d'absence de libre arbitre de l'homme est combattue par certains philosophes, qui n'arrivent pas à admettre que l'homme soit une sorte de machine, que la vie et la pensée soient un ensemble de phénomènes soumis au déterminisme de la nature. Voici ce que le mathématicien René Thom écrit dans [63] :

"Si l'on essaye d'analyser pourquoi les esprits manifestent une telle réticence à l'égard du déterminisme, on peut, je crois, invoquer deux grandes raisons :

1. Il y a d'abord ceux qui tiennent à sauver le libre arbitre humain. [...]
2. Il y a enfin le groupe de ceux qui se sentent opprimés par la montée croissante des technologies, par la collusion de la science et du pouvoir."

La thèse d'absence de libre arbitre est aussi combattue par un matérialiste athée, le philosophe André Comte-Sponville dans le texte [45] pages 42-43 (où on trouve aussi l'excellent texte *De la vraie nature du matérialisme et de la séduction légitime qu'il exerce*). Ce philosophe affirme des choses fausses par compréhension insuffisante du déterminisme : il croit au hasard et à la contingence des événements.

### *Impossibilité d'expliquer le libre arbitre*

La liberté et le libre arbitre ne s'expliquent pas ; ils ne résultent d'aucune cause particulière, ils ne sont déterminés par rien car ce sont des absences de contraintes. L'homme est certain d'en profiter parce qu'il sait que rien ne l'empêche de penser, et il n'est pas conscient de ses aprioris et de ses mécanismes cognitifs et affectifs inconscients ; c'est une certitude purement psychologique.

Le déterminisme affirme une absence de liberté de la nature : chaque situation détermine l'évolution qui va la transformer, évolution soumise aux lois de la physique.

### *La volonté n'a pas de pouvoir en elle-même*

Pour échapper au déterminisme de sa nature, un homme doit avoir une volonté capable de dominer ses instincts et pulsions. Cette condition est irréalisable, dans la mesure où :

- la volonté n'est qu'un outil au service de valeurs existantes ;
- l'homme n'est pas conscient de certaines valeurs et mécanismes cognitifs et affectifs, qui pourtant orientent ses désirs et sa pensée.

### *L'homme est toujours insatisfait*

A tout moment, un homme a des aspirations du fait même qu'il vit, et il en est conscient. Lorsqu'il a l'impression que ces aspirations sont vraiment les siennes, qu'elles ne lui ont pas été imposées, et qu'il ne dépend que de lui d'agir pour tenter de les réaliser - et par là de se réaliser, *l'homme se dit libre* et on dit qu'*il jouit de son libre arbitre*. Ses libres choix se font en fonction de ses valeurs, certaines conscientes et d'autres non.

En fait, l'homme se dit libre de ses choix tout en sachant que la vie en société lui impose des lois, des coutumes et la pression de l'opinion des autres ; mais comme ces limites à sa liberté d'action lui paraissent normales, il n'en souffre pas trop et s'estime globalement libre de ses choix. Ou au contraire, s'il est de nature rebelle, il trouvera excessive l'obligation de conduire en respectant les règles de priorité ou de limitation de vitesse. Ces exemples illustrent le caractère subjectif de l'impression de liberté.

### *Le libre arbitre selon Sartre*

Sartre a montré dans [190] que la conscience de l'homme constate à tout moment une insatisfaction, un manque de quelque chose que Sartre appelle « *manque d'être* » ou « *non-être* ».

Cette opinion est confirmée par des recherches récentes : l'auteur de [191] confirme que le mécanisme biologique de satisfaction du cerveau humain rend hors d'atteinte une satisfaction totale, en ne permettant au mieux qu'une satisfaction partielle laissant subsister certains désirs.

Le psychisme de l'homme réagit à cette insatisfaction en générant sans cesse des besoins physiques et des désirs psychologiques. Certains de ces besoins et désirs franchissent le seuil de conscience, déclenchant ainsi une réflexion, d'autres restent inconscients tout en exerçant une influence.

Pour Sartre, *l'homme jouit d'un libre arbitre parce qu'il a une conscience* ; et sa conscience échappe au déterminisme, car elle lui permet de penser juste ou faux, et même d'être de mauvaise foi lorsque la bonne foi le conduirait à des conclusions qui le dérangent.

Pour Sartre, le caractère transcendant (c'est-à-dire échappant aux lois déterministes de la nature) du libre arbitre de l'homme n'a pas à être prouvé, c'est une simple conséquence de la manière de fonctionner de sa conscience. Celle-ci est libre *par nature*, ses désirs provenant du « manque d'être » de l'homme, c'est-à-dire de son psychisme qui constate à tout instant que quelque chose lui manque ou lui déplaît. En somme l'homme jouit de son libre arbitre, mais pas au point de pouvoir s'empêcher de désirer quelque chose : même sage, il souffrira toujours de manque d'être.

Le libre arbitre de l'homme le rend responsable de ses actes, bien sûr, mais aussi de ce qu'il cherche à devenir : pour Sartre, l'homme se fait lui-même, librement.

En constatant avec raison que l'homme ne peut jamais s'empêcher de désirer quelque chose, Sartre contribue à la compréhension de la nature humaine. Il suit aussi Freud, qui attribue à l'inconscient de l'homme tous ses désirs profonds. Aucun homme ne peut chercher à diriger sa pensée consciente dans une direction contraire à ses désirs inconscients, qui correspondent à l'idée qu'il se fait de ce qui est bien, pour lui-même et pour tous ses semblables.

### *Le problème de la responsabilité*

Si on admet que l'homme n'a qu'un libre arbitre illusoire il n'est jamais responsable de ses actes, qui peuvent toujours être imputés à un désir ou une pulsion dont il n'est pas maître et dont la valeur instantanée est prépondérante dans sa décision.

Ce raisonnement peut convenir à un individu, mais il est inacceptable pour la société où il vit. La vie en société n'est pas possible si les citoyens ne respectent pas des règles définies par la culture et par la loi. Il faut donc que le non-respect d'une telle règle soit reproché à son auteur, ce qui est impossible s'il n'est jamais responsable.

La société a donc prévu des « bons usages », règles de vie non écrites faisant partie de la culture, et des lois écrites prévoyant les sanctions des actes répréhensibles. Ces règles et lois se traduisent, chez tout citoyen, par des valeurs qui doivent le dissuader de les transgresser : je ne vole pas mon voisin parce que cela peut me faire mettre en prison ; on ne me pardonnera pas si j'invoque un désir irréprouvable de m'approprier son bien.

Avec ces bons usages et ces lois, les valeurs de chaque citoyen comprennent des garde-fous lui permettant de choisir parmi les possibilités permises... en principe. Son libre arbitre n'est plus aussi libre, au nom de la vie en société.

#### *Conclusions sur le déterminisme cognitif humain*

Schématiquement, le déterminisme cognitif humain regroupe :

- D'une part le déterminisme étendu, pour rendre compte de la faculté de raisonner logiquement ;
- D'autre part le déterminisme génétique avec ses universaux, pour rendre compte des mécanismes cognitifs innés. Mais ce déterminisme-là est lui-même au service des pulsions et désirs, et sujet à des erreurs, des jugements de valeur basés sur des aprioris et des fonctionnements subconscients.

### **Déterminisme cognitif humain**

Réflexions sur la connaissance, le jugement et la décision de l'homme.

#### *Remarques préalables*

A la différence du déterminisme de la nature, le déterminisme cognitif humain prend en compte les faits suivants :

- L'homme se souvient du passé et transmet des caractères par hérédité ; voir :
  - *Programme génétique et déterminisme ;*
  - *Les universaux, part importante de l'inné humain.*
- L'homme réfléchit, anticipe et s'adapte (par exemple par entraînement sportif), alors que la causalité naturelle est automatique et sans nuance.

Compte tenu des facultés humaines de mémoire et de pensée irrationnelle, le comportement humain ne peut être déterministe aux sens précédents.

- La mémoire est sujette à oublis partiels, erreurs, etc.
- La pensée humaine n'est pas souvent rationnelle, car le subconscient intervient constamment. En outre, l'esprit ne raisonne qu'en fonction de désirs dont sa raison est esclave ; il est aussi prisonnier de préjugés, d'archétypes et de valeurs culturelles.

Le déterminisme humain est donc très différent du déterminisme de la nature.

### Déterminisme du vivant

#### *Définitions du vivant*

- Parmi d'autres définitions, [131] définit l'être vivant comme « *un système chimique autonome capable d'évolution darwinienne* ». Cette définition simple

sous-entend la possibilité pour cet être de subsister dans son milieu, de se reproduire et d'évoluer d'une génération à la suivante sous le contrôle de la sélection naturelle. Mais elle ne rend pas compte des multiples autres caractéristiques d'un être vivant.

- Autre définition : « Un être vivant est une structure [...] constituée, pour tout ou partie, d'une ou de plusieurs molécules d'acides nucléiques (ARN et ADN) programmant le déroulement vital ; cette structure constitue le patrimoine génétique dont la propriété première est de pouvoir se répliquer. »

Un être vivant absorbe de la nourriture, la transforme en sa propre substance et en énergie thermique et mécanique. Il s'adapte à son milieu, se défend contre des agressions et se reproduit.

Une forme de déterminisme existe bien dans le domaine du vivant sous la conduite du programme génétique. Certains mécanismes déterministes assurent la vie des cellules, d'autres la réplication héréditaire, d'autres la résistance aux agressions de l'environnement, d'autres encore l'adaptation à des conditions de vie qui changent. Le programme génétique est auto-adaptatif dans certaines limites, cette auto-adaptation étant une caractéristique du déterminisme dans le cas des êtres vivants. Nous approfondissons ce sujet, qui impacte fortement la définition du déterminisme humain en annexe dans *Niveaux d'information biologique et déterminisme génétique*.

Mais d'ores et déjà nous pouvons affirmer que les êtres vivants sont soumis à un *déterminisme génétique*, qui est adaptatif et agit à long terme par mutation du génome dans l'hérédité, ou à court terme par modification de l'expression de gènes dans l'adaptation aux conditions de vie [57].

Voir aussi les universaux, à l'origine d'une part importante du déterminisme humain dans le paragraphe *Les universaux, part importante de l'inné humain*.

### Vie, organisation, complexité et entropie

En recourant à un dualisme simple, la vie est caractérisée par deux sortes d'organisations, dont l'ordre s'oppose au désordre du hasard ou à l'ordre plus simple de la matière inanimée :

- L'organisation *architecturale*, statique :
  - *du code génétique*, dont la structure constitue un programme qui détermine des fonctions comme la génération des protéines et la spécialisation des enzymes ;
  - *des cellules*, dont il existe de nombreux types spécialisés différents (les cellules du sang sont d'un type différent de celles des neurones...).
- L'organisation *fonctionnelle*, dynamique, qui coordonne par exemple les milliers de réactions chimiques des fonctions vitales de l'être vivant. Dans cette organisation, on trouve aussi bien des rythmes réguliers, périodiques, comme celui du cœur, et des mécanismes arythmiques comme les processus neurologiques du cerveau.

Ces deux sortes d'organisations sont intimement liées, chacune agissant sur l'autre.

Tout être vivant est un système dissipatif : il échange constamment de la matière et de l'énergie avec son environnement, d'où son instabilité permanente, thermodynamique et chimique, instabilité et échanges qui ne prennent fin qu'avec la mort. Pendant toute sa vie, des parties de cet être sont détruites et créées, l'instabilité étant une condition nécessaire du fonctionnement de ses processus vitaux et de l'auto-organisation qui lui permet de s'adapter constamment à son environnement [178].

L'élaboration d'un être vivant à partir de molécules (quand il se nourrit ou se développe) constitue une complexification, un progrès vers l'organisation de la matière. Cette complexification diminue l'entropie de l'être vivant qui s'organise, en augmentant celle de son environnement. Le deuxième principe de la thermodynamique (augmentation nécessaire de l'entropie *du système global*) est bien respecté, tandis que *la diminution d'entropie de sa partie être vivant résulte d'un processus particulier : la dissipation d'énergie et l'échange de matière par l'être qui vit et se trouve loin de l'équilibre thermique et chimique.*

En somme, la complexification des êtres vivants résulte d'une succession d'instabilités, sans lesquelles la vie ne peut subsister. *Notre conception du déterminisme doit donc tenir compte, dans ses lois d'interruption, des exigences d'instabilité et de dissipation d'énergie et de matière de la vie.*

**« Les systèmes dissipatifs peuvent évoluer par auto-structuration vers plus de complexité et plus de diversité. »**

*La thermodynamique ne contredit pas la doctrine matérialiste*

Certains idéalistes ont invoqué la thermodynamique pour faire triompher leur doctrine de création divine du monde contre celle des matérialistes :

« Puisque la vie naît et se développe en s'organisant, donc en diminuant l'entropie, elle ne peut résulter exclusivement de processus matérialistes dominés par la thermodynamique, car celle-ci s'oppose à une telle organisation ; donc la création et le développement du vivant ont lieu par des processus échappant à la thermodynamique, donc non exclusivement matérialistes ; donc Dieu est nécessaire ».

Ils oublient que la thermodynamique s'applique aux systèmes *au voisinage de leur équilibre thermodynamique et fermés*. Or le système d'un être vivant est en déséquilibre permanent ; en outre il n'est pas fermé, car il comprend aussi son environnement : il n'y a pas de vie sans échanges de nourriture, de travail, de chaleur, de déchets et de gaz. L'organisation à entropie décroissante de la partie vivante est plus que compensée par la désorganisation de ce qui l'entoure.

La nourriture inerte ne se transforme pas *toute seule* en être vivant complexe, elle le fait dans le cadre d'un système être vivant + nourriture + environnement ; la complexité qui se crée dans l'être vivant (par exemple lorsqu'un bébé qui grandit devient enfant) est accompagnée de désorganisation dans son environnement, l'entropie *de l'ensemble* augmentant bien.

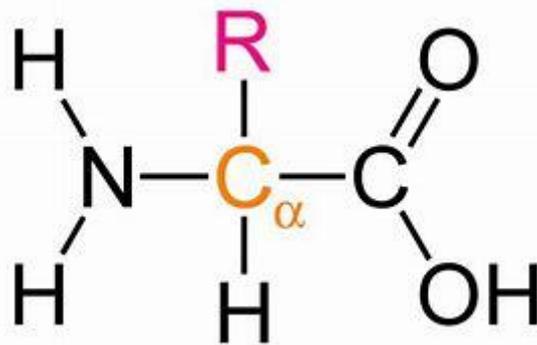
Programme génétique et déterminisme

Un corps humain a entre 50 et 100 trillions de cellules (50 à 100 .10<sup>12</sup>). Chaque cellule d'un corps humain comprend 23 paires de *chromosomes*, chaînes de

molécules responsables de l'hérédité et comprenant des sous-chaînes appelées *gènes*. Dans chaque paire, un des chromosomes provient de la mère et l'autre du père.

#### *Acide aminé*

Un acide aminé est une molécule contenue dans la plupart des protéines. Son nom vient de ce qu'elle porte une fonction acide COOH et une fonction basique amine NH<sub>2</sub>. Elle porte en plus un radical R qui caractérise les 20 acides aminés.



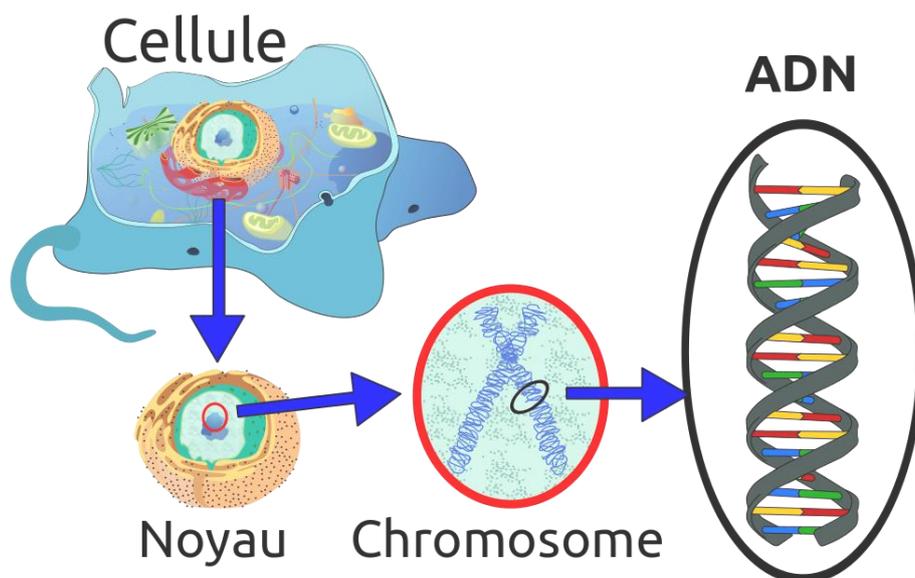
Structure d'un acide aminé (© Microsoft Bing Creative Commons)

#### *Gènes et programme génétique*

Les gènes sont des longues chaînes d'acides aminés porteurs des instructions (au sens programme informatique) de fabrication d'environ 100 000 protéines différentes intervenant dans la vie cellulaire.

Selon [267], chacun des quelque 21 000 gènes humains (chacun constitué par des millions de paires de bases formant un segment d'ADN) participe à un ou plusieurs caractères héréditaires, dont il contribue à la transmission.

La structure et les fonctions de chaque cellule sont définies par un *programme génétique* dont les instructions et données sont stockées dans les structures de molécules d'ADN des chromosomes, des plasmides, des mitochondries et des chloroplastes.



Localisation de l'ADN dans une cellule d'eucaryote - Licence Wikimedia Commons  
(Les eucaryotes sont les animaux, les végétaux verts et les champignons)

Le génome peut être considéré comme un programme dont l'exécution (un informaticien préciserait : *l'interprétation*) crée des protéines et des cellules vivantes par l'intermédiaire de mécanismes appropriés mettant en jeu l'ARN [268]. L'existence et le fonctionnement de ce programme génétique font de la création de ces protéines et cellules un phénomène déterministe.

Il y a une analogie entre le couple de mécanismes (génération des protéines par interprétation de l'ADN + régulation par l'ARN) et le couple (lois d'évolution + lois d'interruption) : une loi physique d'évolution est régie une loi d'interruption, qui peut en lancer l'exécution en lui passant des paramètres, puis l'arrêter. Malgré l'infinie complexité des mécanismes de la machinerie cellulaire, leur logique est entièrement décrite par les codes ADN, ARN et certaines séquences du reste du génome encore mal connues : il n'y a ni magie, ni intervention transcendante. Voir [57].

*Toutes les cellules d'un individu donné possèdent le même génome*, provenant d'une seule cellule initiale, l'œuf. Mais un mécanisme de différenciation permet, à partir de l'œuf fécondé initial et avec ce même génome, la création d'un grand nombre de types différents de cellules, environ 200 chez l'homme : cellules de la peau, des muscles, du sang, des neurones, etc. Chaque type est spécialisé et présente une morphologie et un fonctionnement propres. Le fonctionnement des divers gènes peut être bloqué ou activé par des commutateurs logiques, dont la position (oui/non) dépend du programme ADN et de la position de la cellule parmi d'autres cellules, dans une partie du corps.

#### Déterminisme étendu des fonctions vitales

Sources : [316], [317]

A l'échelle atomique le corps humain, comme celui de tout être vivant, fonctionne en formant des molécules, par exemple celles des protéines, ou en associant des molécules par liaison chimique. Ainsi, l'attachement d'un radical méthyl ( $\text{CH}_3$ ) sur un gène d'une cellule (opération appelée méthylation) peut inhiber celui-ci, l'empêcher de s'exprimer. La décision d'inhiber ou de désinhiber un gène est prise par interprétation du programme ADN et du contexte (comme la position de la cellule par rapport à des cellules voisines) ; la décision de la quantité d'une protéine qu'il faut produire est prise de la même façon.

Toute liaison chimique d'un attachement ou détachement, opération de biologie moléculaire, est régie par l'équation de Schrödinger, elle-même régie par le déterminisme statistique. A l'échelle atomique, la vie est donc régie par ce déterminisme.

**« A l'échelle atomique, la vie est régie par le déterminisme statistique. »**

La biologie moléculaire est une science exacte, dont les prédictions d'évolution sont statistiques. Une liaison moléculaire, par exemple, a une probabilité de s'établir et une probabilité de se défaire une fois établie ; selon le contexte (température, milieu ambiant...) elle sera plus ou moins facile à établir ou à rompre.

Mais connaissant les lois de la biologie moléculaire on ne peut pas en déduire celles des fonctions vitales ; exemple : le foie a plus de 500 fonctions différentes. Le passage des lois de l'échelle atomique à des lois de l'échelle macroscopique comme celles qui régissent les fonctions du foie est régi par la logique de l'ADN et des

mécanismes cellulaires, qui peut donc supporter une grande complexité. Le fonctionnement des êtres vivants est donc régi par des algorithmes, donc par le déterminisme étendu.

**« Les fonctions vitales sont régies par des algorithmes dans le cadre du déterminisme étendu. »**

Cela ne permet pas, hélas, d'affirmer que les actions d'un être vivant sont prévisibles, même au sens de la certitude statistique, dans la mesure où les décisions d'action dépendent aussi de fonctions impossibles à décrire avec précision comme celles du subconscient humain.

*Déterminisme de l'hérédité*

L'hérédité fait, par exemple, que des chats engendrent des chats de la même espèce : le programme génétique est donc transmis à la fois chez un même individu à partir de l'œuf initial, et d'un individu à ses descendants par hérédité. Il y a un déterminisme inscrit dans le programme génétique qui garantit la reproductibilité de ces deux types de transmissions, ainsi que la différenciation en types spécialisés de cellules.

Le programme génétique ne peut s'exécuter correctement que dans certains contextes. Ainsi, par exemple, certaines protéines ne sont synthétisées que si certaines parties du programme se sont déjà déroulées correctement auparavant : nous retrouvons ici une loi procédurale d'interruption.

Le programme génétique a donc pour fonction de générer des protéines. Mais cette génération elle-même exige la présence de certaines protéines. La logique de génération répond au schéma simple acteurs + régulateurs, analogue au schéma loi d'évolution + loi d'interruption. Comme nous l'avons vu plus haut, l'expression des gènes est régie par des commutateurs. A long terme, par exemple lors de la transmission entre générations, cette expression relève de l'épigénétique.

Gènes et comportement humain

Chaque mois qui passe, les chercheurs découvrent de nouvelles propriétés des gènes concernant leur influence sur le comportement humain. Parfois un seul gène est associé à un comportement, parfois il en faut plusieurs [57]. La terrible maladie de Huntington est associée à un seul gène, la mucoviscidose aussi.

L'ouvrage [57] pages 130-131 cite le gène D4DR, situé sur le chromosome 11 : le nombre d'occurrences de ce gène sur le chromosome détermine le niveau de production de *dopamine*, un *neurotransmetteur*.

*Dopamine*

Les sensations *positives* de désir, d'euphorie, etc. sont régulées dans le cerveau humain par une molécule, *la dopamine* ; (ne pas confondre *désir* et *plaisir* : ce dernier utilise d'autres mécanismes que le premier).

Les sensations *negatives* sont associées à *l'acétylcholine*, neurotransmetteur qui a des effets vasodilatateurs sur le système cardiovasculaire et agit sur le rythme cardiaque, des effets sur le système gastro-intestinal, des effets inhibiteurs sur l'activité du système nerveux central, etc.

Retenons aussi que dans notre cerveau, la comparaison à une valeur produit la présence détectable et l'abondance mesurable d'une molécule organique. La création de valeur (agréable=bon, désagréable=mauvais) en tant que conséquence d'une perception ou de pensées, et son utilisation dans les comparaisons nécessaires aux jugements, sont des phénomènes physiques automatiques, inévitables - bref déterministes.

#### *Neurotransmetteur*

Message chimique d'un neurone destiné à stimuler ou inhiber l'activité d'un autre neurone. La dopamine, par exemple, est un neurotransmetteur.

La dopamine stimule l'activité de l'organisme : son absence ou un trop faible niveau entraînent la léthargie, tandis qu'une surabondance entraîne la suractivité, la recherche de la nouveauté, le désir et la prise de risques. Exemple cité par [135] : des mésanges qui font preuve de plus de curiosité que les autres ont la même forme particulière du gène D4DR que les humains particulièrement curieux.

Mais il ne faut pas penser que les séquences de gènes D4DR expliquent à elles seules la tendance d'une personne à rechercher ou non la nouveauté et à être ou non hyperactive ; elles n'en expliquent qu'une petite partie. Dans la plupart des expériences sur la relation entre gènes et comportement, on trouve des explications partielles, des corrélations, et il faut plusieurs gènes pour expliquer un comportement. Plus généralement, la génétique intervient pour une partie du caractère inné d'un trait de personnalité ou d'une aptitude, mettons 20 % à 60 % de la variance ([57] page 4), et l'acquis culturel pour le reste. Et la proportion varie avec le trait considéré et l'individu. (Voir les exemples [136] et [137]).

*Un individu donné n'est donc que partiellement déterminé par son hérédité génétique à sa naissance.* Si un savant surdoué mais laid épouse une reine de beauté sotte il n'est pas certain que leur progéniture ait l'intelligence du père et la beauté de la mère. Cela peut arriver, mais il peut aussi arriver qu'un de leurs enfants ait la beauté du père et l'intelligence de la mère, en plus de caractères hérités de grands-parents...

#### Evolution du programme génétique

Au fur et à mesure du développement de l'individu (*ontogenèse*) et des circonstances de sa vie, et au fur et à mesure qu'on passe d'une génération à sa descendance, certains mécanismes de création de protéines et de création cellulaire peuvent se modifier : une partie du programme génétique est capable de se modifier et de s'adapter par autoprogrammation (en fait par mécanismes d'expression/inhibition relevant de l'épigénétique).

#### *Ontogenèse*

Ensemble des processus qui conduisent de la cellule œuf d'un être vivant à l'adulte reproducteur.

Cette adaptation par autoprogrammation génétique a été mise en évidence par les recherches publiées dans [138], dont voici une citation :

"Il ne faut que 15 générations pour que le génome de certaines mouches évolue dans un sens qui leur permette d'apprendre plus vite. Au début de l'expérience, il faut beaucoup d'heures aux mouches pour apprendre la différence entre deux

types d'aliments dont l'odeur est appétissante, mais dont l'un est nocif. Les mouches dont le génome s'est adapté à un apprentissage rapide n'ont besoin que de moins d'une heure."

### *Les mutations*

Autre exemple d'adaptation génétique, voici des extraits de [1r] article par Roger Durand, professeur de biochimie à l'université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) :

"Vers les années 1946-1948, Boris Ephrussi observait qu'une culture de levure diploïde ou haploïde donne après repiquage, dans les quelques jours qui suivent, une colonie identique aux cellules mères sauf, dans quelques cas, 1 à 2 % de cellules plus petites. Les mutants « petite colonie » ne donnent que des petites colonies. La mutation est irréversible. Le traitement des cellules de la souche sauvage par l'acriflavine fait passer le taux de mutation de 1-2 % à 100 %. Ces mutants poussent lentement car ils ne peuvent respirer, leur métabolisme est uniquement fermentaire, ils ont perdu la capacité de synthétiser un certain nombre d'enzymes respiratoires."

"Ephrussi devait arriver à la conclusion que la souche sauvage et les mutants « petites colonies » diffèrent par l'absence, dans le dernier cas, d'unités cytoplasmiques requises génétiquement pour la synthèse de certains enzymes respiratoires."

"En 1968, on devait démontrer que la mutation « petite colonie » est due à une altération importante de l'ADN mitochondrial. Cette molécule contient 75 000 paires de bases... la mutation « petite colonie » correspondrait à une excision et amplification de fragments d'ADN terminés par des séquences CCGG, GGCC."

Ces modifications, appelées mutations, sont parfois dues à des accidents (solutions de faible probabilité de l'équation de Schrödinger décrivant la formation de la molécule). D'autres sont dues à des agressions de l'environnement, comme l'absorption de substances chimiques nocives ou l'action de rayonnements ionisants (rayons X ou ultraviolets, par exemple). Souvent, les mutations sont inopérantes et leurs conséquences néfastes sont annulées par des mécanismes réparateurs de l'ADN comme les enzymes du « système S.O.S. » [139]. D'autres mutations sont nécessaires à l'adaptation de l'individu à son environnement, comme celles qui produisent des anticorps de résistance à une infection.

Autres exemples de mutations :

- L'adaptation de nombreux insectes aux pesticides, la résistance croissante de nombreuses bactéries aux antibiotiques et les mutations de virus.
- Les habitants des pays asiatiques qui ont depuis des siècles une alimentation plus riche en amidon que celle des Européens, ont dans leur génome des copies supplémentaires d'un gène facilitant la digestion de l'amidon, alors que les Européens n'ont pas ces copies : le génome s'adapte à des habitudes de vie et ces adaptations se transmettent entre générations.

### *Evolution d'une population*

Une population *évolue* quand des individus porteurs de certains caractères (exemple : la taille) ont une descendance plus nombreuse que les autres individus ; ces caractères deviennent alors plus fréquents dans les générations suivantes.

Lorsque les caractères génétiques d'une population se modifient avec le temps, on dit que cette population subit une *évolution biologique*. Lorsqu'une telle évolution correspond à une amélioration des capacités de survie ou de reproduction, on parle d'*adaptation* de cette population à son environnement. La sélection naturelle (étudiée par Darwin [140]) favorise la survie et la multiplication des populations les mieux adaptées et défavorise les autres.

Lorsque l'évolution d'une espèce vivante *A* produit des individus suffisamment différents de ceux de cette espèce, mais suffisamment semblables entre eux pour constituer une espèce *B*, on dit qu'il y a *spéciation*. Les individus de l'espèce *B* ont de nombreux points communs avec leurs ancêtres de l'espèce *A*. La biodiversité résulte de nombreuses spéciations successives.

Remarque : il est faux d'affirmer que « l'homme descend du singe » : la vérité est qu'ils ont un ancêtre commun.

### *Evolution due à une modification de l'expression de gènes*

Sources : [316], [317]

L'article [141] décrit les résultats de recherches récentes qui montrent que l'évolution darwinienne par mutations génétiques, qui agit à long terme (sur des milliers d'années), *est accompagnée d'une évolution due à une mutation de l'expression de gènes*, c'est-à-dire de la manière dont la machinerie cellulaire interprète le programme des gènes pour fabriquer des protéines. Cette mutation de l'expression provient parfois d'un processus très simple affectant un seul gène, et produisant un résultat dès la génération suivante, voire au bout de quelques mois ; parfois la mutation concerne un ensemble de gènes ; parfois même elle agit immédiatement [142].

Le compte-rendu de recherches [143] confirme qu'il suffit parfois qu'un simple radical méthyle ( $\text{CH}_3$  : 4 atomes seulement) se lie à un gène pour inhiber l'expression de celui-ci, produisant alors des effets considérables sur l'organisme. Il existe ainsi plusieurs types de « commutateurs chimiques » qui déclenchent ou inhibent l'expression d'un gène, avec des effets importants sur la plupart des affections non infectieuses (cancer, obésité, désordres neurologiques, etc.) Ces déclenchements ou inhibitions peuvent avoir un effet pendant toute la vie de l'organisme ou seulement pendant un temps. Ce sont des effets « tout-ou-rien », parfaitement déterministes et analogues aux effets de commutateurs logiciels sur des programmes informatiques et de l'action d'une loi d'interruption sur une loi d'évolution ou une loi de transition d'état.

Le développement d'un organisme par ontogenèse est déterminé par une hiérarchie de gènes, dont chaque niveau commande le niveau inférieur. Cette hiérarchie fonctionne en favorisant l'évolution de certaines formes d'organes et en interdisant certaines autres. Une hiérarchie de gènes donnée est le plus souvent héréditaire, conduisant à ce qu'à partir de la génération suivante tous les descendants aient la même hiérarchie, commandant la même expression de ses gènes.

Exemple 1 : les gènes de la famille PAX6 déterminent le développement des yeux dans des êtres aussi différents que l'homme et la mouche.

Exemple 2 : aux îles Galápagos, tous les fringillidés (oiseaux de la famille des pinsons, bouvreuils et chardonnerets) descendent d'un même ancêtre venu du continent. Mais ils sont très différents des fringillidés continentaux, par la forme

et la taille de leur bec (adapté aux nourritures disponibles dans ces îles), ainsi que par la taille générale de certains oiseaux, nettement plus importante et procurant plus de robustesse, et par d'autres caractéristiques témoignant d'une adaptation. Extrait traduit :

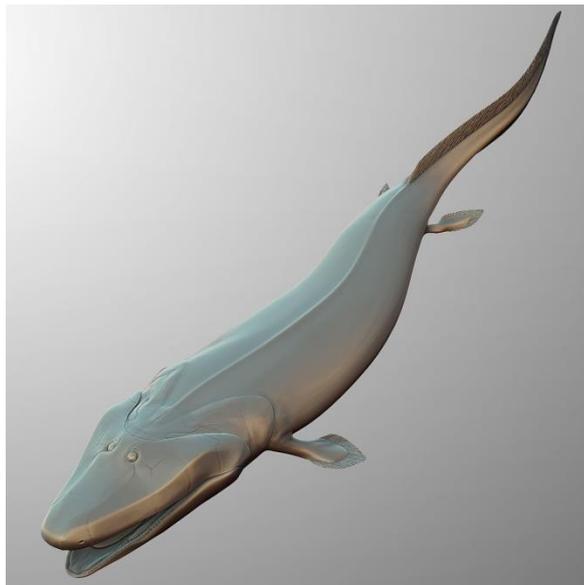
"En 30 ans, la mesure annuelle des fringillidés a montré que les tailles du bec et du corps ont toutes deux évolué de manière significative. Mais elles n'ont pas varié d'une manière continue et progressive ; la sélection naturelle a tâtonné, changeant souvent de sens d'évolution d'une année sur l'autre."

Les chercheurs ont découvert que toutes ces évolutions s'expliquaient par une expression plus importante du gène BMP4, qui produit une quantité de protéine (appelée aussi BMP4) proportionnelle à l'expression du gène. En augmentant artificiellement la production de cette protéine dans des embryons de poulets, ils obtinrent des poulets plus grands avec des becs nettement plus forts, ce qui confirmait que c'est bien le BMP4 qui est à l'origine de ces évolutions rapides.

La découverte de l'importance de l'expression des gènes dans l'évolution, et le fait qu'une modification d'expression (parfois d'un seul gène) peut déterminer une évolution à très court terme, constituent *un développement récent fondamental de la théorie de l'évolution*, qui ne considérait jusqu'à présent que la mutation du génome, avec ses effets à long terme.

Nous savons aujourd'hui que *de nouvelles espèces d'êtres vivants peuvent apparaître à la suite d'une évolution de l'expression de gènes existants, non mutés.*

Des scientifiques ont découvert que les gènes nécessaires à l'apparition des pattes et des doigts, indispensables pour qu'un animal aquatique puisse sortir de l'eau et se déplacer sur la terre ferme, existaient depuis longtemps dans de très anciens poissons (les *Tiktaalik*) lorsqu'une évolution dans leur expression a permis la croissance de ces nouveaux types d'organes et la sortie de l'eau des nouveaux animaux, les tétrapodes.



Tiktaalik, poisson à pattes © Microsoft Bing Creative Commons

Nous savons aussi qu'une habitude de vie, un changement important de mode de vie ou un entraînement intensif conduisent à une adaptation de l'organisme par

modification de l'expression de gènes chez l'individu concerné. Cette modification a des conséquences comme :

- L'adaptation de certains neurones, qui peuvent par exemple se multiplier et multiplier leurs synapses pour adapter l'organisme à une pratique fréquente (pianiste qui s'exerce 8 heures par jour, athlète qui s'entraîne fréquemment, etc.)
- L'adaptation d'organes (muscles, os, etc.).

### Conclusions sur le déterminisme génétique

Le déterminisme existe bien dans le domaine du vivant sous la conduite du programme génétique. Certains mécanismes déterministes assurent la vie des cellules, d'autres la réplication héréditaire, d'autres la résistance aux agressions de l'environnement, d'autres encore l'adaptation à des conditions de vie qui changent. Le programme génétique est auto-adaptatif dans certaines limites, cette auto-adaptation étant une caractéristique du déterminisme dans le cas des êtres vivants.

Nous pouvons affirmer que les êtres vivants sont soumis à un *déterminisme génétique*, qui est adaptatif et agit à long terme par mutation du génome dans l'hérédité, ou à court terme par modification de l'expression de gènes dans l'adaptation aux conditions de vie [57].

Voir aussi les universaux, à l'origine d'une part importante du déterminisme humain dans le paragraphe *Les universaux, part importante de l'inné humain*.

Il y a donc chez les êtres vivants un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. Le code génétique, reçu à la naissance et interprété pour générer les protéines des fonctions vitales, contient aussi l'information de structuration du cerveau, dont la conscience interprétera l'état de ses neurones dans toutes les fonctions psychiques. Le code génétique contient donc toute l'information du caractère humain : c'est un programme écrit avec les 4 lettres A, C, G et T ; tout l'héritage humain transmis entre générations peut donc être écrit sous forme de programme, sa complexité tenant dans 3 milliards de paires de bases.

**« Chez les êtres vivants c'est un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. »**

Le reste du caractère humain, notamment son besoin de vie sociale et les aptitudes correspondantes, provient de ce que chaque homme apprend depuis la naissance, qui est transmis entre générations par la culture et engendre un *déterminisme culturel*.

**« Au-dessus du niveau du déterminisme génétique il y a un déterminisme culturel acquis depuis la naissance. »**

### Objections idéalistes et leur réfutation

Les idéalistes refusent de croire que *la matière* biologique (cellules avec leur structure - quelle qu'elle soit - et leurs processus vitaux) peut à elle seule engendrer et supporter *la vie* sans intervention transcendante (divine ou autre, mais en tout cas échappant au déterminisme naturel). Ils pensent qu'il y a une *essence*, un *principe vital*, une sorte de « *cahier des charges* » immatériel, non déterministe et résultant d'une finalité qui préexiste à l'être vivant et en définit les caractéristiques.

La raison de leur refus est que le modèle matérialiste traditionnel, qui fait de la vie une conséquence de la matière, leur paraît incapable de rendre compte de la richesse, de la beauté et de la liberté qu'ils associent à l'essence de la vie.

Voir *De la vraie nature du matérialisme et de la séduction légitime qu'il exerce*.

Nous savons aujourd'hui que le modèle correct *comprend du logiciel en plus de la matière biologique dans laquelle ce logiciel exécute son code génétique*, et que c'est ce logiciel à base de code inscrit dans les gènes (c'est-à-dire cette information) qui détermine toutes les manifestations de la vie :

- Echanges avec l'extérieur de nourriture, de déchets, de chaleur, d'énergie mécanique et d'informations (perception et verbalisation) ;
- Réplication et réparation de code génétique endommagé ;
- Différenciation cellulaire permettant la création de cellules spécialisées à partir de cellules souches ;
- Adaptation aux évolutions et agressions de l'environnement, etc.

*C'est ce logiciel - les données et la logique du code génétique - qui constitue précisément l'essence de l'homme [57].* Une des raisons qui font que les matérialistes n'arrivent pas à convaincre les idéalistes est que, dans leur modèle du vivant, ils oublient de citer ce niveau logiciel entre le niveau de la matière biologique et celui des fonctions nobles comme l'esprit ; cet oubli leur interdit d'expliquer la richesse, la complexité et l'imprévisibilité du vivant. Nous savons aujourd'hui que les fonctions psychiques comme la conscience et la conscience de soi sont correctement décrites par des mécanismes de logiciel (voir *Conscience de*). De leur côté, les idéalistes, pour qui l'essence de l'homme est spirituelle – pas logicielle - n'acceptent pas de réduire l'homme à ses cellules, objets purement matériels, même pilotées par un programme génétique.

*Mécanismes psychiques non algorithmiques ou imprévisibles*

Lire *Les 3 catégories de circonstances qui déterminent la valeur dominante*.

**« La raison n'a aucune influence sur les décisions humaines, ce n'est qu'une faculté au service des désirs et pulsions d'une personne. »**

**« L'homme cherche souvent une bonne raison de faire ce qu'il a envie, ce n'est pas la raison seule qui lui dicte ses décisions. »**

#### Mécanisme psychique algorithmique

Un mécanisme psychique est qualifié d'*algorithmique* ou de *calculable* s'il peut être simulé par un ordinateur. C'est le cas, par exemple, du calcul mental arithmétique, et aussi du raisonnement déductif pur simulable par calcul des propositions ou des prédicats (qu'on enseigne en Logique). Il existe dans le psychisme [88] :

- Des nombres et des problèmes non calculables : voir dans [0] *Nombres réels et problèmes non calculables* ;
- Des mécanismes non algorithmiques, parfois subconscients, tels que :
  - Retrouver un souvenir dans sa mémoire ;
  - L'intuition ;
  - Les affects ;

- La reconnaissance spontanée d'images, de sons, de symboles, de structures ou de procédures ;
- Les associations d'idées, effectuées consciemment ou non, permettant des raisonnements par analogie, des intuitions et l'apparition inexplicable de pensées, de certitudes ou d'affects ;
- Les représentations de réalités telles que des images ou des procédures, et les représentations d'abstractions.

Au plus bas niveau, ces mécanismes psychiques sont déterministes, car comprenant exclusivement des mécanismes neuronaux de biologie moléculaire sous-jacents, qui sont déterministes. Mais *en pratique* ils peuvent être impossibles à décrire par un algorithme parce qu'on n'en connaît pas assez les processus d'interaction (notamment ceux qui sont subconscients), et parce que l'effort de rédaction de l'algorithme serait démesuré par rapport à son intérêt. Nous avons vu dans *Le déterminisme ne garantit pas la prédictibilité* que le caractère structurellement déterministe d'un processus n'entraînait pas nécessairement la prédictibilité de son résultat.

Ainsi, à partir des mêmes souvenirs d'une personne, un rapprochement d'idées, une intuition ou une certitude peuvent naître de son état du moment : santé, sensation de faim ou soif, affect récent, etc. L'instant d'avant ou l'instant d'après, dans un contexte un peu différent, les pensées seraient autres.

Nous savons aussi que l'inconscient entretient constamment des pensées qui échappent à tout contrôle de la conscience et à toute origine rationnelle.

## Annexe

### Lois de Newton

#### *L'univers de Newton*

Newton concevait l'Univers comme de la matière baignant dans un continuum spatial et un continuum temporel, mais sans position privilégiée pour la Terre : contrairement au modèle des Anciens, la Terre n'était plus le centre du monde et aucun repère d'espace et de temps n'était privilégié ; il n'y avait plus de distinction entre le Ciel et la Terre, plus de sphère parfaite, éternelle et immuable. Les lois physiques (limitées aux lois de la *Mécanique classique*, à l'époque) étaient les mêmes dans tout l'Univers : les mêmes lois d'attraction régissaient le système Terre-Soleil et la chute des corps sur la Terre ; les lois universelles du mouvement expliquaient la chute des pommes comme les orbites planétaires. Ces orbites que Kepler avait mis des années à déterminer par tâtonnements, Newton en redémontrait les équations en une heure.

#### *Les 4 lois*

Les lois de Newton, fondements de la *Mécanique classique* qui théorise les forces et les mouvements d'objets qui ont une masse, sont *déterministes* : elles permettent la prévision et la prédiction des mouvements des systèmes macroscopiques connaissant des conditions initiales. Elles sont aussi universelles : les mêmes partout, pour tous les corps (terrestres ou célestes), dans le passé, le présent et l'avenir. Ce sont donc des lois relevant du déterminisme scientifique.

Mais de nos jours les lois de Newton ne sont plus que des approximations, valables seulement à l'échelle macroscopique et à vitesse réduite :

- Ces lois ne s'appliquent pas telles quelles à l'échelle atomique, pour laquelle il y a la *Mécanique quantique* (qui relève du déterminisme statistique) ;
- Elles ne s'appliquent que pour les vitesses négligeables par rapport à la vitesse de la lumière. Pour les vitesses plus élevées, il y a la *Relativité restreinte* en l'absence de champ de gravitation et la *Relativité générale* en présence d'un tel champ.

Les trois lois du mouvement de Newton s'énoncent comme suit :

- **1<sup>re</sup> loi** : « **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** » : c'est la *loi d'inertie*.

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 étant, à l'échelle macroscopique, sa propre cause et sa propre conséquence est une abstraction humaine qui n'existe pas dans la nature ; l'homme l'a définie pour la simplicité de certains raisonnements.

- **2<sup>e</sup> loi** : « **Un corps de masse  $M$  animé d'une vitesse de vecteur  $v$  et soumis à une force de vecteur  $F$  subit une accélération de vecteur  $a$  telle que :**

$$F = Ma = dp/dt \text{ »}$$

où on a appelé :

- $v = dr/dt$  la dérivée du vecteur position  $r$  par rapport au temps ;
- $p = Mv$  le vecteur *quantité de mouvement*, et  $dp/dt$  sa dérivée par rapport au temps ;
- $a = d^2r/dt^2$  le vecteur accélération, dérivée de  $dr/dt$  par rapport au temps.

C'est la loi de proportionnalité de la dérivée de la quantité de mouvement à la force, valable à tout instant  $t$ .

- **3<sup>e</sup> loi** : « **Quand deux corps interagissent, la force de vecteur  $F_{12}$  exercée par le premier sur le second est l'opposé de celle du second sur le premier,  $F_{21}$**  » :

$$F_{12} = -F_{21}$$

C'est la loi d'égalité de l'action et de la réaction, valable à tout instant  $t$ .

*Loi de gravitation universelle (sur Terre : loi de la chute des corps)*

A ces trois lois on doit ajouter une quatrième, due elle aussi à Newton, celle de *gravitation universelle*, aussi appelée *loi d'attraction* :

« **Deux points matériels de masses  $M$  et  $M'$  distants de  $d$  s'attirent avec une force  $F$  donnée par :**

$$F = G \frac{MM'}{d^2} \text{ »}$$

où  $G$  est la *constante universelle de gravitation*,  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

*Constante universelle*

La valeur de  $G$  est la même dans tout l'Univers, pour tous les objets quelle que soit la matière dont est faite leur masse et quelle que soit l'importance de cette masse.

### *Classification des lois de Newton en tant que lois d'évolution ou lois d'interruption*

- La 2<sup>ème</sup> loi et la loi de gravitation sont des lois d'évolution, car elles décrivent des forces susceptibles de causer des accélérations.
- La 1<sup>ère</sup> loi et la 3<sup>ème</sup> loi sont des lois d'interruption, car elles décrivent des conditions sources de contraintes.

### Axiomatique et Système logique

#### *Définition*

Une axiomatique est une organisation formelle et syntaxique (un système logique) d'un ensemble d'énoncés en vue de raisonnements déductifs.

#### *Exemple : Axiomatique de la géométrie d'Euclide*

Source : les *Eléments* d'Euclide (IV<sup>e</sup> au III<sup>e</sup> siècle avant J.-C.) [36]

Les 5 axiomes à la base de la géométrie euclidienne sont :

1. Par deux points on peut faire passer une droite et une seule ;
2. Un segment de droite peut être prolongé indéfiniment ;
3. On peut construire un cercle en donnant son centre et son rayon ;
4. Tous les angles droits sont égaux ;
5. Par un point extérieur à une droite on peut faire passer une droite parallèle à elle et une seule.

L'abandon ou la modification du 5<sup>ème</sup> axiome a permis de définir d'autres géométries que la géométrie euclidienne, qui a une courbure nulle :

- La géométrie hyperbolique (à courbure négative) ;
- La géométrie elliptique (à courbure positive) ;
- La géométrie riemannienne (à courbure variant d'un point à un autre) utilisée par Einstein (1879-1955) dans la Relativité générale (voir [0] : 3-sphère)

#### *Exemple de postulat extrait du "Livre premier" des *Eléments**

« Si une droite, tombant sur deux droites, fait [la somme des] angles intérieurs du même côté plus petits que deux droits, ces droites, prolongées à l'infini, se rencontreront du côté où les angles sont plus petits que deux droits. »

La géométrie axiomatique d'Euclide constitue une représentation remarquablement précise et complète de l'espace physique habituel, sur laquelle reposent toute la physique classique et l'ensemble des travaux de Newton.

#### *Application d'une axiomatique à la description structurée d'une science*

L'*axiomatique* est une méthode de présentation structurée d'une science par déductions logiques à partir des principes qui la fondent. Le résultat de cette méthode est *une* axiomatique.

*Les théorèmes d'une axiomatique n'apportent donc pas de vérité nouvelle* : ils sont implicitement contenus dans ses définitions ; ils en sont des conséquences logiques et n'y ajoutent que des présentations nouvelles, des rapprochements nouveaux.

### *Cohérence (consistance) d'une axiomatique*

Une axiomatique est dite *cohérente* (ou *consistante* en français) si tout théorème déduit de ses axiomes (et/ou d'autres théorèmes précédemment démontrés) est lui-même non contradictoire et ne contredit aucun autre théorème ou axiome de l'axiomatique.

*Gödel a prouvé l'impossibilité de démontrer la cohérence d'une axiomatique en tant que théorème de cette axiomatique, c'est-à-dire sans recourir à des axiomes ou règles de déduction externes à l'axiomatique.*

### *Complétude d'une axiomatique*

Une axiomatique est dite *complète* si on peut démontrer que toute proposition logique qu'on y déduit (théorème), ou qu'on y énonce a priori en la formant à partir de ses notions de base conformément à ses règles de syntaxe, est soit vraie soit fausse ; la démonstration éventuelle doit être de longueur finie et ne doit utiliser que des axiomes, théorèmes et règles de déduction de l'axiomatique.

Mais hélas, Gödel a montré que *toute axiomatique définissant un minimum d'arithmétique des nombres entiers permet l'énoncé de propositions indécidables*. Une telle proposition est soit vraie soit fausse, mais il n'existe pas de démonstration basée sur les axiomes de l'axiomatique et appliquant ses règles de déduction permettant de la démontrer.

**« Certaines propositions logiques qui ont un sens sont indécidables : on ne peut ni les démontrer ni les réfuter. »**

### Physique quantique - Mécanique quantique

#### *Une quantité d'énergie électromagnétique est quantifiée – Photon*

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle les lois d'évolution de la physique, celles basées sur les lois de Newton comme celles basées sur les équations de Maxwell, étaient continues et s'exprimaient avec des équations différentielles. Mais en cherchant la distribution des intensités d'énergie rayonnée par un corps noir en fonction de la fréquence, Planck s'est aperçu qu'aucune fonction continue ne donnait satisfaction.

#### *Définition d'un corps noir*

On appelle *corps noir* un corps qui absorbe toute l'énergie de rayonnement qu'il reçoit, ne réfléchissant rien ; c'est pourquoi il paraît noir. Une surface recouverte d'une couche de noir de fumée est un corps noir à peu près parfait : il conserve 97% du rayonnement électromagnétique reçu.

En 1900 Planck a trouvé une solution mathématique qui convenait parfaitement, mais qu'il ne pouvait s'expliquer ; c'était la *Loi de quantification de l'énergie électromagnétique* :

**« Une quantité d'énergie électromagnétique de fréquence  $\nu$  ("nu") est une grandeur discontinue multiple d'un minimum proportionnel à  $\nu$ . »**

Planck a appelé ce minimum « quantum d'énergie ». Il a trouvé que, pour chaque fréquence rayonnée  $\nu$ , ce « grain d'énergie » était proportionnel à cette fréquence, avec un même coefficient de proportionnalité pour toutes les fréquences, coefficient qu'il a appelé  $h$  : l'énergie du quantum d'une fréquence  $\nu$  était donc  $h\nu$ .

$h$  est une constante universelle, une des plus importantes de toute la Physique. Elle a été appelée *constante de Planck* et vaut  $h = 6.62618 \cdot 10^{-34}$  joule .seconde ;  $h\nu$  est appelé *quantum d'action* (une action étant le produit d'une énergie par un

temps). Ce quantum d'énergie électromagnétique, ce « grain de lumière », a été ensuite appelé *photon*. L'énergie  $E$  d'un photon de fréquence  $\nu$  est donc  $E = h\nu$ .

$E = h\nu$  est la première équation de la Mécanique quantique.

#### *L'explication finale d'Einstein*

La solution de Planck, conforme aux constatations expérimentales, était purement mathématique : elle n'expliquait pas la raison physique de la quantification. Mais Einstein prouva en 1905 que, pour chaque fréquence  $\nu$ , c'est le rayonnement électromagnétique lui-même qui est constitué de « grains » d'énergie discrets, chacun d'énergie multiple de  $h\nu$  : la granularité de l'énergie électromagnétique était donc une réalité, pas un artifice mathématique.

Les très hautes fréquences ne transportent pas d'énergie thermique, ce qui exclut la possibilité paradoxale d'une énergie rayonnée infinie résultant des équations de Maxwell ; ces équations étaient donc remises en cause dans le cas des spectres de rayonnement thermique par la théorie de Planck-Einstein.

La puissance d'un rayonnement de fréquence  $\nu$  est proportionnelle au nombre de photons d'énergie  $E=h\nu$  par seconde, émis par une source et absorbés par une cible. Le raisonnement d'Einstein était basé sur *l'effet photoélectrique*, découvert en 1887 par Hertz : une surface métallique éclairée éjecte des électrons.

Mais cette éjection ne se produit que si, pour chaque métal, la fréquence lumineuse est suffisamment élevée ; avec une fréquence trop basse même une forte *intensité* lumineuse n'éjecte pas d'électrons. Or l'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  étant  $E=h\nu$  et la fréquence  $\nu$  caractérisant la *couleur* de la lumière, c'était donc cette couleur du rayonnement qui comptait, pas son intensité : la réalité de la granularité des ondes électromagnétiques était ainsi démontrée. Un électron n'est éjecté d'un atome d'un métal donné que si celui-ci reçoit une impulsion énergétique suffisante, dépendant du métal : un seul quantum  $h\nu$  suffit pourvu que  $\nu$  soit assez grand, une grande quantité d'énergie provenant de photons de fréquence trop faible n'agira pas.

**« La couleur de la lumière est la fréquence de ses ondes électromagnétiques. »**

Ainsi, en 1905, après avoir démontré l'hypothèse atomiste, granularité de la matière, en expliquant le mouvement brownien, Einstein a démontré la granularité des ondes électromagnétiques.

L'explication de l'effet photoélectrique valut à Einstein un prix Nobel de physique.

#### *Le prix Nobel d'Einstein*

Einstein n'a pas reçu de prix Nobel en 1921 pour la découverte de la Relativité ("restreinte" en 1905 et "générale" en 1915). La Relativité restreinte a été jugée trop simple pour valoir le prix, et la Relativité générale n'a pas trouvé, en Suède, de physicien capable de la comprendre pendant la première guerre mondiale.

#### *Conséquence fondamentale pour la physique des rayonnements électromagnétiques*

L'explication de l'effet photoélectrique eut une conséquence fondamentale : selon l'expérience, un rayonnement électromagnétique peut être considéré tantôt comme un phénomène *continu* régi par les équations de Maxwell, tantôt comme un phénomène *discontinu* (quantifié) décrit par Planck et Einstein.

**« Un rayonnement électromagnétique a deux comportements possibles : selon l'expérience il apparaît tantôt continu sous forme d'ondes, tantôt quantifié sous forme de particules. »**

#### *Lois de la nature justifiant l'existence d'une physique quantique*

Le paragraphe précédent montre que l'énergie électromagnétique est quantifiée, et qu'à l'échelle atomique il y a des phénomènes, comme l'effet photoélectrique, qui n'ont pas d'équivalent à l'échelle macroscopique. Il est donc important d'approfondir la physique de l'échelle atomique et la portée du phénomène de quantification.

Le XX<sup>e</sup> siècle a été pour les physiciens une époque révolutionnaire, à l'échelle cosmologique avec la Relativité, comme à l'échelle atomique avec la Mécanique quantique. Cette dernière a mis en évidence les 8 principes suivants.

#### 1. Rayonnement tantôt ondulatoire, tantôt corpusculaire

Il existe des lois physiques discrètes (=discontinues), comme la loi sur la quantification de l'énergie électromagnétique. Dans une telle loi, une ou plusieurs variables ne peuvent avoir que des valeurs multiples d'un quantum, contrairement par exemple à une durée, dont la valeur peut varier d'une quantité aussi petite que l'on voudra.

Selon l'expérience, un rayonnement électromagnétique peut se comporter tantôt comme une onde continue, tantôt comme un flot discontinu de photons.

#### 2. Interprétation nécessairement probabiliste des résultats d'évolution

Le caractère stochastique (=probabiliste) de certains résultats d'évolution, qui constituent nécessairement un ensemble dont les éléments ont des probabilités ou des densités de probabilité prédéterminées d'apparaître si on renouvelle l'expérience qui les mesure un grand nombre de fois. C'est pourquoi nous avons dû introduire un déterminisme particulier, le déterminisme statistique.

#### 3. Equation fondamentale d'évolution de Schrödinger et ses solutions

La Mécanique quantique a une équation fondamentale d'évolution, l'équation de Schrödinger. A l'échelle atomique, toute évolution dans le temps et l'espace est régie par cette équation qui peut avoir plusieurs solutions, voire une infinité.

Toute combinaison linéaire de solutions de l'équation de Schrödinger étant aussi une solution, certaines évolutions physiques produisent plusieurs résultats à la fois, voire une infinité, solutions qui existent toutes en même temps en un état particulier de la matière-énergie appelé superposition d'états. Une telle superposition est *cohérente*, en ce sens que ses divers états coexistants partagent l'énergie de départ de l'évolution. C'est ainsi que :

- La molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$  peut être synthétisée avec deux états à la fois, l'un où l'atome d'azote N est au-dessus du plan des 3 atomes d'hydrogène H et l'autre où il est en dessous.
- Une particule qui se déplace peut emprunter une infinité de trajectoires à la fois, chacune associée à une certaine densité de probabilité. Ainsi, un électron ou un photon peuvent passer par deux fentes à la fois, produisant des interférences.

A un instant donné une particule peut être à une infinité de positions à la fois, là aussi avec leurs densités de probabilité, et avoir une infinité de vitesses... Les notions de position ponctuelle, trajectoire (ligne) et vitesse (vecteur avec une certaine grandeur) sont remplacées en Mécanique quantique par des voisinages aux contours progressifs flous.

- Pendant une évolution, son résultat (simple ou multiple) n'existe pas : c'est la fin de l'évolution (appelé la décohérence), par exemple lors d'une mesure, qui génère ce résultat.

C'est ainsi que le "chat de Schrödinger" n'est pas « à la fois mort et vivant tant qu'on n'a pas ouvert sa boîte ». Il meurt quand il reçoit le poison (et s'il le reçoit), mais nous ne pouvons savoir ce qu'il est devenu qu'en ouvrant la boîte.

#### 4. Complétude de l'équation de Schrödinger

L'équation de Schrödinger est fondamentale : elle décrit toutes les évolutions possibles dans le temps et l'espace d'un système dont on ne prend pas en compte le spin (propriété de particules de "rotation sur elle-même" n'existant qu'à l'échelle atomique). Une telle description est celle de la fonction d'onde calculée par l'équation, fonction d'onde qui est *complète* : elle décrit tout ce qu'on peut savoir de l'état du système, trop petit pour être vu à l'échelle macroscopique.

#### 5. Conservation de l'information d'un système conservatif qui évolue

L'équation de Schrödinger est déterministe et symétrique par rapport au temps, c'est-à-dire invariable si on change le sens du temps en changeant la variable  $t$  en  $-t$ . A partir d'un état d'évolution selon l'équation de Schrödinger connu, où un système est parvenu, on peut en pensée remonter le sens du temps jusqu'à l'origine de cette évolution : *la nature « garde la mémoire » de son évolution*. L'état du système étant complètement décrit par la fonction d'onde calculée par l'équation, on peut (en théorie) retrouver toute valeur passée de cette fonction, notamment toute l'information descriptive initiale du système :

**« L'évolution d'un système conservatif conserve son information descriptive »**

#### 6. Correspondance entre échelles macroscopiques et atomique

Le caractère fondamental de l'équation de Schrödinger permet d'affirmer que toute évolution de l'échelle macroscopique (nécessairement régie par des lois du groupe des lois de Newton et/ou par des lois du groupe des équations de Maxwell) se ramène à des évolutions à l'échelle atomique régies par l'équation de Schrödinger.

- Les propriétés de symétrie de celle-ci existent donc aussi à l'échelle macroscopique.
- Il existe des méthodes de conversion d'équations d'évolution de l'échelle macroscopique en équations de l'échelle atomique. On peut donc étudier l'évolution d'un système de l'échelle atomique comme s'il était à l'échelle macroscopique en convertissant les équations d'évolution trouvées.

#### 7. Intrication et non-séparabilité de l'espace

Deux ou plusieurs solutions d'évolution d'un système, générées en même temps et partageant une même énergie, peuvent être intriquées, autre état original de la masse-énergie où le système peut s'étendre dans l'espace à l'infini pendant son évolution, tout en se comportant, du point de vue causalité, comme s'il était concentré en un point de l'espace. Toute action sur une partie du système (par exemple un photon d'un ensemble de photons intriqués) agit *en même temps* sur

toutes les autres parties, même si elles sont à des kilomètres [96]. L'espace occupé par le système est alors qualifié de *non séparable*.

*Expérience de pensée* ([272-4] page 126)

Considérons une boîte pleine de lumière dont l'intérieur est fait de miroirs tels qu'un photon ne puisse s'en échapper. Cette boîte est posée sur le plateau d'une balance hypersensible capable de mesurer l'énergie (donc la masse équivalente car  $E=mc^2$ ) d'un photon. A un moment donné un petit trou s'ouvre et un photon – un seul – sort de la boîte.

Question : la balance signale-t-elle la sortie du photon, la boîte étant désormais moins lourde ?

Réponse : non, pas tant que le photon n'a pas été absorbé. Tant qu'il existe et se déplace à la vitesse de la lumière son état est corrélé (intriqué) avec la boîte, dont le poids ne change donc pas. Mais dès qu'il est absorbé par quelque chose, après avoir parcouru hors de la boîte 1 cm, 1 m ou 100 km, la boîte a perdu son énergie et la balance le signale sans aucun délai, malgré la distance. L'intrication c'est cela.

## 8. Contraintes d'incertitude et d'indétermination - Fluctuations quantiques

Principe d'incertitude de Heisenberg : il est impossible de mesurer simultanément (dans une même expérience) les deux valeurs de certains couples de grandeurs d'un système : {position et vitesse selon une direction donnée}, {orientation angulaire et moment cinétique} ou {énergie et durée}.

L'incompatibilité de la détermination simultanée d'une énergie et d'une durée peut être interprétée comme *une instabilité* ou *une indétermination de l'énergie* : deux mesures identiques d'énergie séparées par un intervalle de temps trop bref ne sont pas nécessairement reproductibles. A l'échelle atomique, tout point de l'espace, dans un atome comme entre deux galaxies, a une énergie potentielle instable, sujette à des fluctuations quantiques d'autant plus importantes qu'on les mesure pendant un instant court.

### Equation de Schrödinger

*Définition du vecteur d'état d'un objet de physique quantique*

Le vecteur d'état d'un objet quantique regroupe toutes les variables descriptives de cet objet susceptibles d'évoluer avec le temps  $t$ . C'est donc un vecteur fonction de  $t$ .

*Evolution dans le temps du vecteur d'état d'un objet quantique*

L'équation de Schrödinger décrit l'évolution dans le temps du vecteur d'état d'un objet quantique en fonction de l'énergie totale du système. Elle peut avoir plusieurs solutions, voire une infinité, dont l'interprétation est probabiliste. Voir [0]

### Principe d'incertitude de Heisenberg

Une des lois les plus importantes de la Mécanique quantique est le *Principe d'incertitude de Heisenberg*, théorème qui limite la précision possible d'une mesure simultanée des variables de certains couples où elles sont dites « conjuguées ».

*Mesure simultanée d'une position et d'une quantité de mouvement selon un axe*

Ainsi, en désignant respectivement par  $\Delta x$  et  $\Delta p$  les incertitudes sur la position d'une particule en mouvement selon l'axe des  $x$  et sur sa quantité de mouvement (produit  $p=mv$  de sa masse  $m$  par sa vitesse  $v$ ), le principe d'incertitude impose que le produit

$\Delta x \cdot \Delta p$  soit au moins de l'ordre d'une valeur désignée par  $\frac{1}{2} \hbar$ , où  $h$  est la constante de Planck  $h = 6.6261 \cdot 10^{-34}$  joule .seconde (une des constantes fondamentales de l'Univers) et  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054589 \cdot 10^{-34}$  joule .seconde ( $\hbar$  se prononce h-barre).

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar, \quad \text{où } \frac{1}{2} \hbar = 0.527 \cdot 10^{-34} \text{ joule.seconde}$$

### Exemple

Un atome de fer ayant un rayon de 1.26 angström ( $1\text{\AA} = 10^{-10}$  m), supposons que l'imprécision sur la position d'un électron soit du même ordre, soit  $\Delta x = 1\text{\AA}$ . L'incertitude sur la quantité de mouvement de l'électron est alors d'au moins  $\frac{1}{2} \frac{\hbar}{\Delta x} = 0.53 \cdot 10^{-24}$  kg.m/s ; et puisque la masse au repos de l'électron est  $0.9 \cdot 10^{-30}$  kg, l'incertitude sur sa vitesse est  $0.6 \cdot 10^6$  m/s, c'est-à-dire 600 km/s ! Par contre, si l'on accepte une incertitude de 1mm sur la position (incertitude énorme par rapport à la taille d'un atome), l'incertitude sur la vitesse tombe à 6 cm/s.

L'incertitude sur deux mesures simultanées doit être comprise axe par axe. C'est ainsi que la composante selon l'axe Oz de l'impulsion,  $p_z$ , peut être mesurée en même temps que la composante selon l'axe Ox de la position,  $x$ , sans que la limitation  $\Delta x \cdot \Delta p_z \geq \frac{1}{2} \hbar$  intervienne.

*Le principe d'incertitude de Heisenberg ne s'applique qu'aux grandeurs physiques*

*Conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg sur des conditions initiales*

La doctrine du déterminisme physique définit l'évolution d'un système à partir de ses conditions initiales et de la loi d'évolution qui s'applique à elles. Et lorsqu'il est impossible d'intégrer une équation différentielle d'évolution, une solution approchée est calculée pas à pas à partir de conditions initiales.

Mais d'après le principe d'incertitude de Heisenberg il est impossible, à propos d'un système, de connaître au même instant avec précision les deux variables de certains couples comme {position + quantité de mouvement - c'est-à-dire position + vitesse}. Alors, comment disposer de conditions initiales acceptables ?

La réponse résulte de la différence entre *connaître par constatation expérimentale* et *définir arbitrairement* : le principe d'incertitude de Heisenberg ne peut interdire de définir, il ne s'applique qu'aux grandeurs physiques, notamment aux mesures.

*Pourquoi ne connaissons-nous pas déjà le principe d'incertitude de Heisenberg ?*

Le principe d'incertitude exprime une forme d'incompatibilité entre précisions des déterminations *simultanées* de la position selon un axe de coordonnées et de la quantité de mouvement (impulsion) selon cet axe. La quantité de mouvement  $p=mv$  n'est pas la vitesse seule, la masse y intervient tout autant. Si cette masse est minuscule, comme c'est le cas pour les particules de physique atomique, la limitation  $\geq$  est difficile à satisfaire ; mais si la masse est de l'ordre du kilogramme ( $\sim 10^{30}$  fois plus élevée que celle d'un électron) elle est satisfaite dans toutes les expériences de la vie courante : voilà pourquoi le principe d'incertitude de Heisenberg ne nous empêche jamais de mesurer simultanément (à l'échelle macroscopique) une masse et une vitesse avec une excellente précision.

### Mesure simultanée d'une énergie et d'une durée – Instabilité d'une énergie

La limitation de précision de deux mesures simultanées existe aussi pour un autre couple de variables conjuguées, l'énergie  $\Delta E$  et la durée  $\Delta t$  :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Cette dernière inégalité peut être interprétée comme *une instabilité ou une indétermination de l'énergie* : pour qu'une particule puisse rester à un certain niveau d'énergie (que ce niveau ne change pas trop, donc que  $\Delta E$  soit assez petit) il faut qu'elle (ou sa mesure) dispose d'un temps suffisant.

Cette condition était importante aux premiers instants de l'Univers pour que certaines synthèses atomiques soient possibles malgré les chocs provenant de photons de très haute énergie, qui pouvaient briser les particules composites créées.

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

*Ce paragraphe est assez technique : pour des explications voir [0]*

L'instabilité énergétique due au principe d'incertitude de Heisenberg permet au vide d'être le siège de « *fluctuations quantiques* » d'énergie. Chaque fluctuation peut se matérialiser (spontanément ou en réponse à une excitation reçue : particule ou rayonnement), en **créant de la masse-énergie par emprunt d'énergie  $\Delta E$  au vide environnant** pendant un temps de l'ordre de  $\frac{\hbar}{\Delta E}$  **et en la restituant ensuite.**

L'énergie  $\Delta E$  est celle de l'émission d'une paire particule-antiparticule ou d'un nombre entier de photons (ou plus généralement de bosons ou de fermions). Le champ électromagnétique éventuel exerce une force attractive ou répulsive sur tout objet chargé, et lui communique une énergie  $h\nu$  pour chaque photon de fréquence  $\nu$  échangé.

Le regroupement des particules d'une paire est rapide et inévitable dans un espace-temps plat ou à courbure très faible. Mais au tout début de l'Univers, lorsque l'espace-temps ultra dense avait une forte courbure, et particulièrement pendant la courte et brutale période d'inflation, les particules d'une paire ont pu se trouver séparées trop vite pour s'attirer et disparaître, elles ont pu perdurer. Ce phénomène se poursuit de nos jours lorsqu'un trou noir « s'évapore ».

La présence d'une telle paire de charges opposées crée une polarisation et une déformation relativiste du vide, donc un champ qui agit sur la charge électrique et/ou la couleur d'une particule.

L'action d'un champ sur une particule *décroît* avec la distance de la particule lorsqu'il s'agit du champ électrique ou gravitationnel. Mais lorsqu'il s'agit du champ de couleur agissant sur un quark, l'action *croît* avec la distance (ce qui est absolument contraire à l'intuition et au déterminisme traditionnel !) : pour séparer les quarks d'une paire on devrait fournir une énergie qui croît avec la distance entre ces quarks, et dès que cette énergie suffit pour séparer les deux quarks elle est absorbée par la création d'une nouvelle paire de quarks, un nouveau quark apparaissant pour se coller à chacun des deux anciens quarks séparés ! Ce phénomène interdit donc aux quarks d'être isolés pendant plus d'une infime fraction de seconde. Voir dans [0] *Confinement*.

L'apparition spontanée de masse-énergie extraite de l'espace environnant est de si courte durée qu'on ne peut pas observer les particules produites, d'où leur qualificatif de *virtuelles*. Elle n'en est pas moins prouvée indirectement par ses effets sur des particules ordinaires.

### *Conséquences philosophiques*

- Le phénomène des fluctuations quantiques ne relève donc pas d'une loi d'évolution, mais d'une loi d'interruption régissant la naissance spontanée d'une paire de particules sans cause autre que l'instabilité/indétermination de la densité ponctuelle d'énergie.
- C'est l'existence de ces apparitions de particules dans la fraction de seconde qui a suivi le Big Bang qui explique leurs combinaisons en matière qui ont perduré jusqu'à ce jour : sans elles nous n'existerions pas.

Il se peut même que l'Univers ait été créé par une fluctuation quantique [109].

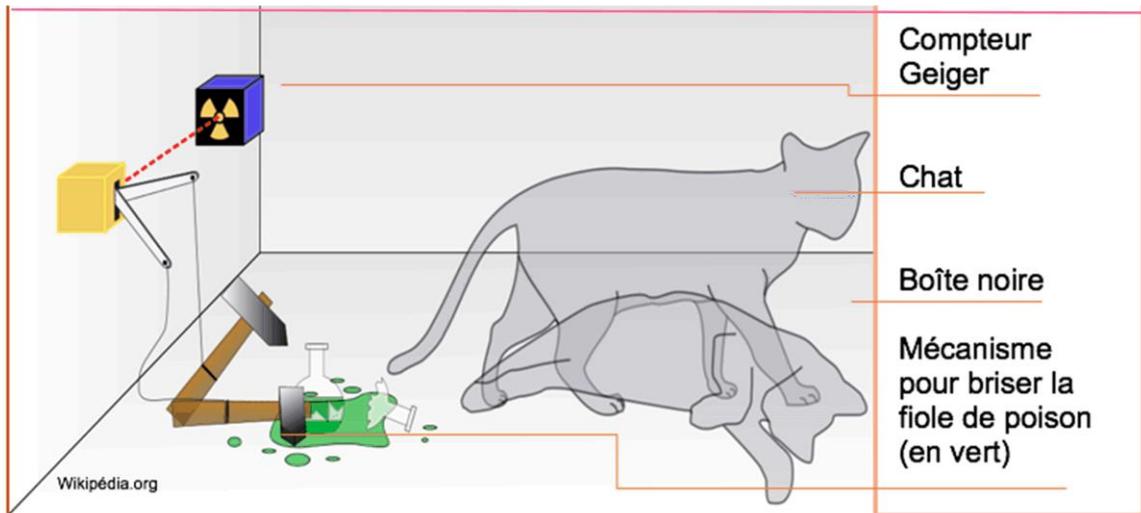
- **Le vide, espace sans matière ni énergie, n'existe nulle part** : ni au sein d'un atome, ni dans l'espace intergalactique (qui contient environ 6 protons/m<sup>3</sup>). Le moindre électron libre, par exemple, est constamment entouré d'un nuage de particules/antiparticules virtuelles, et leur champ électromagnétique affecte ses propriétés de manière perceptible.

### Le chat de Schrödinger

(Citation de [97])

L'expérience du chat de Schrödinger fut imaginée en 1935 par Erwin Schrödinger, afin de mettre en évidence des lacunes supposées de cette description du monde.

L'idée de Schrödinger consiste à placer un chat dans une boîte fermée [...]. Cette boîte est pourvue d'un système destiné à tuer le chat. Ce système est constitué d'un flacon de poison, d'une petite quantité de matière radioactive et d'un compteur Geiger. Lorsque la première désintégration d'un noyau radioactif se produit, le compteur Geiger réagit en déclenchant un mécanisme qui casse le flacon et libère le poison mortel. Ainsi, la désintégration d'un noyau radioactif, un processus microscopique, se traduit par la mort du chat, un événement macroscopique.



Expérience du chat de Schrödinger - © Wikimedia Creative Commons

La désintégration d'un noyau radioactif est un processus purement quantique qui se décrit en termes de probabilités. Il est impossible de prévoir quel noyau se transformera en premier ou quand cette désintégration se produira. La seule chose que nous puissions calculer est la probabilité qu'un certain nombre de noyaux se soient désintégrés après un temps donné. Nous pouvons par exemple choisir une substance radioactive de telle façon qu'après cinq minutes il y ait 50% de chances qu'un noyau se soit désintégré et 50% de chances que rien ne se soit produit.

*[Phase 1]*

Fermons donc la boîte et patientons cinq minutes. Puisque la désintégration radioactive s'exprime en termes de probabilités, le sort du chat ne peut être décrit qu'en termes similaires. Après cinq minutes, nous pouvons prédire qu'il y a 50% de chances que le chat soit mort et 50% de chances qu'il soit vivant, mais nous ne pouvons être certains de son état.

Dans l'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique, le chat n'est alors ni mort, ni vivant : il se trouve dans une superposition de ces deux états. Ce n'est que lorsque nous ouvrons finalement la boîte [Phase 2] que l'un des deux états possibles devient [pour nous] la réalité. Le chat est alors soit vivant, soit mort.

L'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique pose donc un problème. Il est possible d'imaginer qu'une particule se trouve dans une superposition d'états, chacun affecté d'une certaine probabilité. Ceci devient en revanche très difficile lorsque l'on considère un objet macroscopique comme le chat en question. L'idée d'un animal ni mort ni vivant, mais dans une superposition de ces états, est plutôt difficile à accepter.

(Fin de citation)

*Commentaires sur cette expérience et sa conclusion*

- Quel est l'état du chat ?

- Phase 1 : c'est un état dynamique, traduisant l'évolution : *superposition* d'un état "mort" (probabilité 50%) et d'un état "vivant" (probabilité 50%). Mais cet état ne peut être considéré comme un résultat, car tant que l'expérience dure (la boîte du chat reste fermée) son résultat n'existe pas. A l'échelle atomique un résultat est toujours créé par une mesure, avant il n'existe pas.
- Phase 2 : c'est un état macroscopique, OU mort OU vivant. L'ouverture de la boîte a mis un terme à l'expérience : son résultat peut être annoncé.
- L'idée d'une superposition d'états « chat vivant » + « chat mort » choque notre bon sens. La Mécanique quantique ne prévoit la superposition qu'en tant qu'état virtuel dont on sort par une interaction (comme une mesure) avec l'environnement du système.
- Mais de très nombreuses expériences d'états multiples ont été observées depuis 1935, par exemple [96]. Nous devons donc accepter la réalité, à l'échelle atomique, d'un mode d'existence virtuelle de type *états cohérents*, état de la matière où le système a conservé les valeurs de variables comme les totaux de masse et de charge électrique qu'il avait avant la génération des particules corrélées.
- La durée de vie d'une superposition d'états est en général extrêmement courte pour un système macroscopique, trop courte pour être mesurée. Pour un système à l'échelle atomique elle est d'autant plus courte que ses interactions avec son environnement macroscopique sont importantes, du fait de sa taille, de l'agitation thermique, du contact avec un instrument de mesure, etc.

Exemple : dans l'ordinateur quantique Rigetti, la durée d'une superposition d'états à une température de supraconductivité de 1°K est au maximum de 90  $\mu$ s (90 microsecondes) [98].

### *Conclusion*

L'interprétation des résultats de la Mécanique quantique n'est pas évidente. Il a fallu des années après la publication de l'équation de Schrödinger en 1926 pour la clarifier.

### Principe de correspondance

**« Il y a, entre les lois de la physique quantique et les lois de la physique macroscopique qui s'en déduisent, un principe de compatibilité appelé *Principe de correspondance*. »**

Selon ce principe, lorsque le système considéré est assez grand pour que les effets quantiques soient négligeables, les prédictions de la physique quantique doivent être les mêmes que celles de la physique macroscopique pour toutes les variables (appelées « observables ») de la physique quantique qui ont un équivalent limite en physique classique.

Les variables de la physique classique (position, vitesse, énergie, etc.) sont représentées, en Mécanique quantique, par des observables qui dépendent des dispositifs de l'expérience, d'où leur nom. En tant qu'être mathématique, une observable est une valeur propre, dont l'ensemble forme une base de l'espace des états. (Les définitions de ces termes sont dans [0]).

La continuité de passage entre physique quantique et physique macroscopique est due à l'élimination progressive des imprécisions probabilistes de la physique quantique par l'effet du nombre de particules prises en compte, leurs variations se compensant de mieux en mieux.

La correspondance entre les physiques de deux échelles différentes doit toutefois être comprise entre échelles *successives* :

- Entre la Physique macroscopique et la Mécanique quantique ;
- Entre la Mécanique quantique et l'Electrodynamique quantique ;
- Entre l'Electrodynamique quantique et la Chromodynamique quantique.

Ce principe de correspondance est une conséquence :

- De l'uniformité de la nature ;
- Du fait que *la nature ignore le concept d'échelle*, abstraction humaine utilisée pour représenter les phénomènes, les comprendre et en prévoir et prédire l'évolution.

Il y a aussi des règles mathématiques permettant de passer d'équations de la physique macroscopique à des équations à opérateurs non commutatifs de la Mécanique quantique, puis de là à l'Electrodynamique quantique, etc.

*Remarque sur les phénomènes n'apparaissant qu'en physique quantique*

L'existence du principe de correspondance n'interdit pas que certains phénomènes n'apparaissent qu'en physique quantique. Cela n'a rien d'étonnant : lorsqu'on regarde un objet au microscope, certains détails n'apparaissent qu'au-delà d'un grossissement minimum ; en deçà, ils existent mais sont négligeables.

### Principe de complémentarité

Le principe de correspondance ci-dessus est complété par le *principe de complémentarité*, énoncé en 1928 par Niels Bohr. Exemple : le comportement de phénomènes comme la lumière est tantôt corpusculaire tantôt ondulatoire, selon l'expérience ; il n'y a pas de contradiction, il y a une *dualité onde-particule* : la loi d'évolution qui s'applique dépend de l'expérience en plus de la nature de son objet physique.

*Enoncé du Principe de complémentarité*

**« 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. »**

Analogie : il n'existe pas d'expérience permettant de *mesurer avec précision* à la fois la position et la vitesse d'une particule (principe d'incertitude de Heisenberg). Mais pour faire des raisonnements et des calculs rien n'empêche de se donner à la fois la position et la vitesse.

### *Conclusion*

La Mécanique quantique est valable même pour des systèmes grands et complexes ; mais son utilisation en tant qu'outil mathématique n'est pratique que pour les systèmes à l'échelle atomique.

## Interprétation métaphysique de Copenhague

L'Interprétation de la Mécanique quantique dite « de Copenhague » est celle de Niels Bohr, qui était danois. Bohr et ses collègues pensaient que :

- L'homme ne peut connaître la réalité, il n'a accès qu'aux représentations qu'il s'en fait : c'est la doctrine de Platon (allégorie de la caverne) et de Kant (idéalisme transcendantal). Il ne doit donc pas raisonner sur la réalité, mais seulement sur les phénomènes qui lui sont accessibles. Il doit même accepter que des lois physiques soient probabilistes, comme les résultats de l'équation de Schrödinger, et ne permettent donc pas de prédire un résultat unique.

Ainsi, la valeur d'une variable de l'état quantique *n'existe pas* entre deux mesures (circonstances où seule existe l'inaccessible réalité) ; elle n'existe qu'après une mesure qui l'a créée.

**« A l'échelle atomique c'est la mesure qui crée la valeur ; avant elle n'existait pas. »**

On peut même aller plus loin : les particules n'existent que lorsqu'elles interagissent. Un électron d'atome d'une couche donnée peut être n'importe où sur son orbitale (=orbite), chaque position ayant une densité de probabilité ; même remarque pour un électron libre en mouvement : tant que rien n'interagit avec lui tout se passe comme si l'électron n'existait pas. On n'est certain de l'existence d'un électron que lorsqu'il interagit avec une autre particule, révélant alors sa position, sa vitesse et son moment cinétique aux imprécisions dues au principe d'incertitude de Heisenberg près. De même, on n'est certain de l'existence et des caractéristiques d'un photon que lorsqu'il est capturé ou émis.

**« L'existence des particules n'est certaine que lorsqu'elles interagissent. »**

On peut énoncer cela autrement :

**« A l'échelle atomique toute mesure perturbe les grandeurs mesurées ; elle est irréversible et il faut en tenir compte en concevant les expériences. »**

L'inaccessibilité de la réalité est d'autant plus forte qu'à l'échelle atomique nous ne pouvons voir que des équations – *nos* équations.

La description humaine des phénomènes et lois de l'échelle atomique est donc la seule que nous ayons, parce que ses mathématiques sont notre seule manière de les « voir ».

- Les 6 postulats de la Mécanique quantique ne décrivent pas la réalité, ils ne sont qu'une axiomatique dont les résultats s'avèrent conformes aux mesures. Ils permettent des calculs prédictifs des valeurs probabilistes des variables.

La fonction d'onde d'un système conservatif contient toute l'information disponible sur lui jusqu'à ce que l'évolution soit interrompue par une décohérence. Cette fonction d'onde étant unitaire, la quantité d'informations est conservée dans l'évolution.

- Conseil de Niels Bohr : il ne faut donc pas perdre son temps à spéculer sur la signification philosophique de la physique quantique, il faut s'en tenir aux outils de la Mécanique quantique et faire confiance à leurs résultats.

Cette doctrine est aujourd'hui "officielle", en ce sens qu'elle est la plus acceptée. Elle refuse l'interprétation métaphysique des postulats de la Mécanique quantique,

considérée comme un simple outil à appliquer sans se poser de questions ontologiques.

### Niveaux d'information biologique et déterminisme génétique

On explique de nos jours certains mécanismes vitaux, par exemple chez l'homme, par un modèle qui s'est avéré fécond : les traitements d'information qui leur sont associés.

Au niveau le plus élevé et en première approximation, notre esprit fonctionne comme un programme dans un ordinateur qui est notre cerveau : penser, c'est traiter de l'information. *Tout processus mental conscient peut être décrit sous forme du traitement d'information dont il est indissociable*, qu'il s'agisse de lire un livre, de réfléchir avant d'acheter un produit, de faire des mathématiques, d'écouter de la musique, etc. C'est là une description de première approximation, assez déterministe, aussi évoquée dans *Mécanismes psychiques non algorithmiques*.

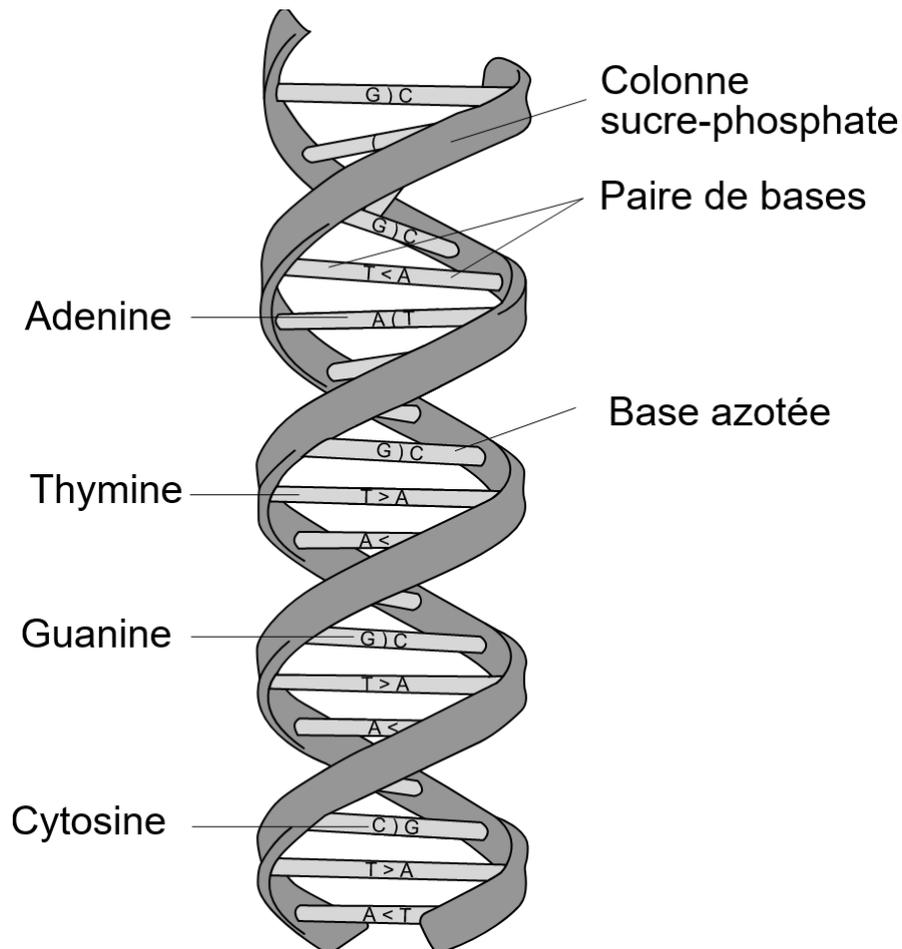
Remarque : le fonctionnement du programme-esprit dans le cerveau a une certaine robustesse : dans une certaine limite, des neurones peuvent mourir ou perdre des connexions sans que le programme et ses résultats en soient affectés.

### *Information du logiciel génétique*

Dans la constitution de l'ADN, le traitement de l'information met en jeu des structures moléculaires *complémentaires* : une molécule donnée ne peut interagir qu'avec une molécule dont la structure lui est complémentaire, c'est-à-dire qui peut former des liaisons chimiques avec elle. La structure d'une molécule définit donc avec quelles autres molécules elle peut interagir : *la structure définit la fonction, qui définit les actions* que la molécule peut exécuter. Une hiérarchie de structures et de fonctions apparaît ainsi, de haut en bas :

- Toute cellule contient un noyau (diamètre de l'ordre de  $6\mu\text{m}$ , soit  $6 \cdot 10^{-6}$  m) dans lequel on trouve des chromosomes (23 paires chez l'homme), dont la structure porte l'information contrôlant les fonctions biologiques. Un chromosome humain mesure environ  $8\mu\text{m}$  de long pour un diamètre de  $0.5\mu\text{m}$ .
- Un chromosome contient environ la moitié de son poids d'ADN (*acide désoxyribonucléique*). La molécule d'ADN, géante, a une forme de double hélice comprenant environ 3 milliards de paires de bases chez l'homme. Chacune des hélices est copie exacte de l'autre, redondance qui permet de réparer d'éventuelles "erreurs" lors de la reproduction de cellules.
- La molécule géante d'ADN contient des séquences de bases (segments) appelés gènes, molécules plus petites dont la structure (l'ordre d'apparition des bases dans un parcours de la séquence) représente l'information nécessaire à :
  - toutes les structures du corps, par exemple celles du cerveau ou de l'œil ;
  - toutes les fonctions biologiques, comme les instructions d'un programme et leur ordre définissent la logique de ce programme.

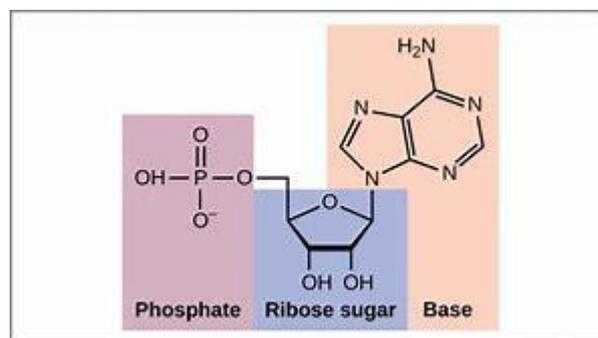
Le langage dans lequel est codée l'information génétique est extrêmement simple : son vocabulaire n'a que 4 « mots » de base, avec lesquels on écrit les « instructions » des séquences des gènes. Ces mots sont 4 bases azotées appelées adénine ( $\text{C}_5\text{N}_5\text{H}_5$ ), cytosine ( $\text{C}_4\text{N}_3\text{H}_5\text{O}$ ), guanine ( $\text{C}_5\text{N}_5\text{H}_5\text{O}$ ) et thymine ( $\text{C}_5\text{N}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ), représentées par les lettres A, C, G, T.



Structure et bases de l'ADN © Wikipedia.org

Chaque brin de la double hélice de l'ADN est une chaîne d'unités élémentaires appelées nucléotides. Un nucléotide est constitué d'un sucre, d'un groupe phosphate et d'une des bases azotées *A*, *C*, *G* ou *T*.

Les deux brins de l'ADN sont reliés par des liaisons hydrogène entre une base de l'un des brins et une base complémentaire de l'autre. Une base *A* est toujours associée à une base *T*, et une base *C* est toujours associée à une base *G*.



Nucléotide (Licence CC Microsoft Bing)

Une séquence de code génétique peut, par exemple, contenir la chaîne de mots *ATTCGCA*, et une chaîne peut être extrêmement longue, suffisamment pour décrire une logique aussi complexe que l'on voudra.

- Les gènes font construire des protéines par l'ARN (*acide ribonucléique*) selon les programmes codés dans leur structure ; on peut les considérer comme de minuscules ordinateurs qui pilotent la formation de protéines par la machinerie cellulaire.
- Les protéines sont les constituants des muscles, des poumons, du cœur, des os, etc. Tous les mécanismes de notre corps mettent en jeu des protéines.

La modélisation des mécanismes vitaux non psychiques par des traitements d'information effectués par des programmes est si satisfaisante que ces mécanismes apparaissent aussi déterministes qu'un logiciel informatique.

La complexité des processus vitaux et celle d'un logiciel peuvent être considérables sans impacter leur parfait déterminisme, qui n'en dépend pas.

Dans le fonctionnement cellulaire, la biologie moléculaire nous apprend que l'information génétique est transmise dans un sens unique, des séquences ADN vers les protéines, et que ce processus est parfaitement déterministe dans sa manière d'enchaîner les événements à partir de leurs causes.

Les séquences de code génétique ne doivent pas être interprétées comme des suites de phrases ne contenant que des instructions. En effet, en informatique il n'y a pas de distinction nette entre *instructions* (exécuter telle opération) et *données* (nombres, chaînes de caractères, images, etc.), les instructions manipulant des données. Un ordinateur peut travailler en interprétant des données dans un programme ad hoc appelé « interpréteur » ; alors, si les données interprétées changent, la logique du programme qu'elles constituent change et le résultat final aussi.

Exemple d'interpréteur : logiciel de calcul scientifique MAPLE [145].

Il existe aussi des logiciels *générateurs de programmes*, qui interprètent des données qu'un homme leur fournit pour écrire à sa place un programme dans un langage de haut niveau. Ce langage sera ensuite *traduit* par un compilateur en langage exécutable par le processeur de l'ordinateur, ou *interprété* par un programme interpréteur spécifique. L'intérêt de cette approche est de simplifier au maximum ce que l'homme doit exprimer pour obtenir un programme adapté à des besoins particuliers, en adaptant cette expression à l'application (analyse statistique de données, par exemple).

Il en va de même pour l'ADN, *que l'on peut considérer aussi comme des données interprétées par la machinerie cellulaire*. C'est pourquoi, par exemple, on peut prélever un gène (donc son code) dans une espèce vivante et l'introduire dans l'ADN d'une autre espèce pour améliorer sa résistance à une maladie, ce qui produit un organisme génétiquement modifié (OGM). En fait, l'ADN et la machinerie cellulaire forment un ensemble matériel + logiciel capable d'adaptation et d'auto-organisation - tant fonctionnelle que structurale - parce qu'il fonctionne tantôt comme un interpréteur, tantôt comme un générateur de programme.

Voir aussi *Evolution due à une modification de l'expression de gènes*.

## Conclusion

Il y a donc chez les êtres vivants un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. Le code génétique, reçu à la naissance et interprété pour générer les protéines des fonctions vitales, contient aussi l'information de structuration du cerveau, dont la conscience interprétera l'état de ses neurones dans toutes les fonctions psychiques. Le code génétique contient donc toute l'information du caractère humain : c'est un programme écrit avec les 4 lettres A, C, G et T ; tout l'héritage humain transmis entre générations peut donc être écrit sous forme de programme, sa complexité tenant dans 3 milliards de paires de bases.

**« Chez les êtres vivants c'est un *déterminisme génétique* qui contrôle toutes les fonctions vitales. »**

Le reste du caractère humain, notamment son besoin de vie sociale et les aptitudes correspondantes, provient de ce que chaque homme apprend depuis la naissance, qui est transmis entre générations par la culture et engendre un *déterminisme culturel*.

**« Au-dessus du niveau du *déterminisme génétique* il y a un *déterminisme culturel* acquis depuis la naissance. »**

## Références

[0] *Philosophie des sciences, métaphysique du XXI<sup>e</sup> siècle* de Daniel Martin (<http://www.danielmartin.eu/Philo/Metaphysique.pdf>) : c'est l'ouvrage dont celui-ci est extrait.

[1] Encyclopédie Universalis 2012

[1a] Article *Aristote 385 environ-322 avant J.-C.* par Pierre Aubenque

[1b] Article *Antiquité – Naissance de la philosophie* par Pierre Aubenque

[1c] Article *Descartes (René) 1596-1650* par Ferdinand Alquie

[1d] Article *Emmanuel Kant (1724-1804)* par Francis Wybrands

[1e] Article *Âme*

[1f] Article *Boscovich*

[1g] Article *Cinétique des fluides (théorie)*

[1h] Article *Spectroscopie*

[1i] Article *Statistique (Mécanique)*

[1j] Article *Démographie*

[1k] Article *Populations animales (dynamique des)*

[1l] Article *Particules élémentaires – Fermions*

[1m] Article *Ondes gravitationnelles*

[1n] Article *Nucléosynthèse*

[1p] Article *Trous noirs*

[1q] Article *Génome – introduction*

[1r] Article *GENOME - Le génome mitochondrial*

[3] Dictionnaire sur PC *Ortolang* du CNRTL (CNRS), comprenant les dictionnaires de l'Académie française jusqu'à la 9<sup>ème</sup> édition. <https://www.cnrtl.fr/definition/>

- [9] *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* par Isaac Newton (1687)  
Traduction française : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* -  
<https://www.e-rara.ch/download/pdf/556172?name=Principes%20math%C3%A9matiques%20de%20la%20philosophie%20naturelle>
- [12] *Dictionnaire des idées de Kant - Vocabulaire de la Critique de la raison pure, des Prolégomènes, du cours Logique et de la Fondation de la métaphysique des mœurs - avec Les Principes (actuels) des mathématiques et la Critique de la philosophie des mathématiques de Kant (complément du cours Logique)* par Daniel Martin  
Chez [Amazon](#) sous le titre :  
*Vocabulaire de la Critique de la raison pure - Dictionnaire des idées de Kant*
- [17] *Méditations métaphysiques* (1641) par Descartes  
[http://abu.cnam.fr/cgi-bin/donner\\_html?medit3](http://abu.cnam.fr/cgi-bin/donner_html?medit3)
- [19] *Principes de la philosophie* (1644) par Descartes  
[https://fr.wikisource.org/wiki/Principes\\_de\\_la\\_philosophie](https://fr.wikisource.org/wiki/Principes_de_la_philosophie)
- [20] *Critique de la raison pure* par Emmanuel Kant (1781) – Traduction Alain Renaut - Flammarion, 3<sup>e</sup> édition, 2006 – Ce gros ouvrage, qui s'étudie à la vitesse moyenne d'une à deux pages par jour, est une base du raisonnement philosophique rationnel.
- [21] *Qu'est-ce que les Lumières ?* par Emmanuel Kant (1784)  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Lumieres.htm>
- [36] *Eléments d'Euclide* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110982q.image>
- [37] Emmanuel Kant – *Logique* (1800) – Librairie Vrin, 2007
- [39] Daniel Martin - *Principes de logique : causalité, homogénéité, raison suffisante, etc.* <http://www.danielmartin.eu/Philo/CausalitePPS.pdf>
- [42] Stanislas Dehaene - *Le code de la conscience* - Odile Jacob, octobre 2014 (427 pages) - Le professeur Dehaene est normalien (mathématiques), docteur en sciences cognitives et titulaire de la chaire de Psychologie cognitive expérimentale au Collège de France.
- [43] Daniel Martin - *Conscience et conscience de soi - Eléments de psychologie cognitive* - <http://www.danielmartin.eu/Psychologie/Conscience.pdf> (2015, 54 pages)
- [44] Michel Bitbol - *La conscience a-t-elle une origine ? : Des neurosciences à la pleine conscience : une nouvelle approche de l'esprit*, Flammarion 2014 - 748 pages
- [45] André Comte-Sponville et Luc Ferry - *La sagesse des Modernes - Dix questions pour notre temps* – Editions Robert Laffont (1998)
- [50] Emmanuel KANT – *Œuvres philosophiques – Tome 1 (1747-1781)*, Gallimard (La Pléiade, 1980)

[51] Michael S. A. Graziano - *Consciousness and the Social Brain* - Oxford University Press, 2013, 268 pages - Compte-rendu de recherches récentes en matière de conscience, cet ouvrage présente une théorie nouvelle sur sa nature et son fonctionnement, ainsi que sur le fonctionnement de la « conscience de l'autre » et de la « conscience de soi ». Directeur d'un laboratoire de psychologie à Princeton University ( <http://www.princeton.edu/~graziano/> ), le professeur Graziano nous offre là un texte de neuroscience cognitive extrêmement clair.

[52] Steven Pinker - *How the Mind Works* (Penguin books - 2015, 660 pages)  
L'auteur est professeur de psychologie à Harvard et chercheur en psychologie cognitive. Il a enseigné au MIT et à Stanford.

[55] Renée Bouveresse - *Karl Popper ou le rationalisme critique* (Vrin, 1998)

[57] Sir Michael RUTTER - *Genes and Behavior – Nature-Nurture Interplay Explained* (Gènes et comportement – Mécanismes des interactions entre inné et acquis, mars 2008) - Blackwell Publishing. - Citations :

▪ Page 14 :

"...l'action des gènes étant indirecte il n'est pas possible de réduire tous les phénomènes au niveau moléculaire. Les organismes sont organisés sous forme de hiérarchie de niveaux. Il y a une chaîne causale précise reliant le produit d'un gène aux actions de ce gène dans l'organisme, mais cette chaîne causale passe par divers niveaux organisationnels. A chaque niveau, la chaîne est transformée et suit des règles différentes. La complexité commence avec le fait qu'un gène donné quelconque peut avoir plusieurs effets assez différents.

[...] Les protéines produites par l'interprétation des gènes n'agissent pas de manière isolée ; elles participent à la formation de réseaux et structures complexes intégrés à leur tour dans une organisation hiérarchique. De plus, dans le cadre des caractéristiques multifactorielles de l'individu (qui expliquent la grande majorité des comportements intéressants) il y a des interactions avec l'environnement qui peuvent mettre en jeu des *corrélations* gène-environnement, des influences génétiques sur la sensibilité à l'environnement, et des effets de l'environnement sur l'expression des gènes."

*Corrélation (substantif)*

- Rapport existant entre deux choses, deux notions, deux faits dont l'un implique l'autre et réciproquement ;
- Relation nécessaire qui s'établit entre une notion et son opposé.

▪ Page 83

"...l'influence de ses gènes peut rendre une personne plus ou moins émotive dans son comportement, plus ou moins impulsive dans ses réactions, plus ou moins sociable et extravertie, d'humeur plus ou moins stable ou labile (sujet à changer ou à se transformer), et plus ou moins assurée ou agressive dans ses rapports avec autrui. Tous ces traits de caractère sont quantitatifs plutôt que présents ou absents. Autrement dit, la population ne se subdivise pas en individus agressifs et individus qui ne le sont pas ; mais d'une personne à une autre, la probabilité qu'elle soit agressive varie."

▪ Page 222

"Le fonctionnement de l'esprit est nécessairement basé sur celui du cerveau, dont la structure et le développement sont façonnés à la fois par les gènes et l'environnement, comme ceux de tout organe. Nous devons à tout prix nous débarrasser de l'idée que certains comportements résultent de causes externes au corps, idée sans fondement biologique. Les effets des gènes sont omniprésents – ce qui n'implique pas, bien entendu, qu'ils prennent le pas sur ceux de l'environnement."

(Fin des citations)

[62] Pierre-Simon de Laplace *Essai philosophique sur les probabilités*, page 2

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96200351/f1n294.pdf?download=1>

[63] René Thom, mathématicien médaille Fields - Article *Halte au hasard, silence au bruit* publié dans *La querelle du déterminisme* (1990), éditions Gallimard.

[65] Henri Poincaré *L'invention de la topologie – Poincaré* – Collection « Génies des mathématiques » - RBA Coleccionables, Barcelone, Espagne.

[67] INSEE - *Note de conjoncture, décembre 2013 - Reprise poussive - Conjoncture française* - Page 76

[88] Calcul des propositions ou des prédicats

Ces sujets de logique formelle sont abordés dans l'ouvrage [12] au paragraphe *Logique – Compléments modernes et critique des idées de Kant sur ce sujet*.

[96] Article *Cette étonnante Mécanique quantique*, discours d'Alain Aspect du

17/06/2002 - [http://www.academie-sciences.fr/pdf/membre/s170602\\_aspect.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/membre/s170602_aspect.pdf) .

Deux photons jumeaux, dits « intriqués » car produits ensemble d'une façon qui leur confère un état quantique global, *se comportent comme une particule unique, inséparable* : toute mesure de l'état de l'un correspond toujours à l'état de l'autre, quelle que soit leur distance ; et une action sur l'un d'eux se répercute sur l'autre en un temps nul – donc inférieur au temps qu'il faudrait à la lumière pour l'atteindre.

L'état quantique décrivant les deux photons est unique : il ne s'agit pas de deux états identiques, mais d'un état représentant les deux photons *ensemble* ; c'est ainsi, par exemple, que leurs directions de polarisation opposées sont prises en compte toutes deux en tant qu'ensemble. Lorsqu'une expérience agit sur la polarisation de l'un des photons, elle agit aussi instantanément celle du second photon, même s'il est loin du premier, car la polarisation de l'ensemble doit rester la même. Si on mesure les polarisations des deux photons, les résultats sont toujours corrélés, conformément aux équations de la Mécanique quantique.

On sait même produire des groupes de plus de 2 photons intriqués, puisqu'en 2004 on a réussi à produire un tel groupe avec 6 photons

(Source: *Scientific American* - August 2007 pages 78-79, article *The Gedanken Experimenter- Quantum Weirdness*)

C'est ainsi que des chercheurs ont réussi à transmettre l'un des photons à 144 km de l'autre sans détruire l'intrication avec son jumeau resté au laboratoire.

Par contre, *cette propriété de corrélation préservée lors d'une évolution d'un des photons ne peut servir à transmettre instantanément un message* : le récepteur d'une suite de photons ne peut en déduire quoi que ce soit concernant le message de l'émetteur du fait de la corrélation ; celle-ci se constate après coup, en comparant l'émission à la réception, elle ne permet aucune transmission instantanée d'information. La transmission instantanée de messages n'existe qu'en science-fiction.

L'expérience d'Alain Aspect prouve que pour certains phénomènes :

**« L'espace n'est pas séparable : il existe des phénomènes pour lesquels les notions de lieux différents ou de taille finie ne s'appliquent pas. »**

C'est là une modification fondamentale du principe de causalité et du déterminisme.

Cette expérience illustre le *Principe de correspondance* selon lequel *certaines équations et certains modèles de raisonnement de la physique quantique sont également valables à l'échelle macroscopique*. Dans l'expérience précédente, tout se passe comme s'il existait une propriété fondamentale de la physique appelée « conservation de l'intrication des photons d'une paire indépendamment de leur distance », propriété due au fait que ces photons sont décrits par la même fonction d'onde de Mécanique quantique.

Un raisonnement sur l'indépendance entre deux événements et leur relation de causalité montre que des observateurs différents peuvent voir deux événements *A* et *B* dans l'ordre *A puis B* pour l'un et *B puis A* pour l'autre !

[97] Site *Astronomie & Astrophysique - Chat de Schrödinger* :  
<https://www.astronomes.com/le-big-bang/chat-schrodinger/>

[98] Température de supraconductivité utilisée dans la technologie mémoire de l'ordinateur quantique Rigetti : environ 1°K (-272.15°C), la température critique de supraconductivité de l'aluminium étant de 1.175°K.  
Voir <https://www.rigetti.com/solutions>.

[109] Article *Is the Universe a Vacuum Fluctuation?* par Edward P. Tryon  
*Nature* 246, pages 396-397 (14/12/1973) - <https://www.nature.com/articles/246396a0>  
Résumé

"The author proposes a big bang model in which our Universe is a fluctuation of the vacuum, in the sense of quantum field theory. The model predicts a Universe which is homogeneous, isotropic and closed, and consists equally of matter and anti-matter. All these predictions are supported by, or consistent with, present observations."

[131] Définitions de la vie utilisées en astrobiologie  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3005285/>  
Exemple : *Life is a self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution*

[135] Article *Proceedings of The Royal Society* - 22/07/2007 - Compte-rendu de recherches *DRD4 gene polymorphisms are associated with personality variation in a passerine bird* - <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1914334>

[136] Gènes et participation aux votes

- Compte-rendu de recherches *Genetic Variation in Political Participation* (05/2008) - [http://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN\\_ID1082665\\_code646904.pdf?abstractid=1008036&mirid=3](http://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN_ID1082665_code646904.pdf?abstractid=1008036&mirid=3)
- *Scientific American* de novembre 2007, article *The Genetics of Politics - A study finds that biology strongly governs voter turnout.*
- *The New York Times* - 8 juillet 2014, article *How Much Do Our Genes Influence Our Political Beliefs?* - <http://www.nytimes.com/2014/07/09/opinion/thomas-edsall-how-much-do-our-genes-influence-our-political-beliefs.html?mabReward=RI%3A5&action=click&pgtype=Homepage&region=CColumn&module=Recommendation&src=rechp&WT.nav=RecEngine>

[137] *Newsweek* du 04 juin 2007 - Interview de James Dewey Watson, prix Nobel de médecine 1962 pour la découverte de la structure de l'ADN.

*A Nobel Winner Pioneers the Personal Genome* <http://www.newsweek.com/id/34370>

Extrait : « If personal-genome sequencing becomes widespread, » he says, «it will make people more compassionate. We'll understand why people can't do certain things,» he continues. «Instead of asking a child to shape up, we'll stop having unrealistic expectations. If a child's genome shows that his awkwardness or inattention or limited intelligence has a genetic basis, we'll want to help rather than be mad. If a child doesn't finish high school, we treat that as a failure, as his fault. But knowing someone's full genetic information will keep us from making him do things he'll fail at. »

[138] Article *Lots of Animals Learn, but Smarter Isn't Better*

*The New York Times* du 06/05/2008 -

[http://www.nytimes.com/2008/05/06/science/06dumb.html?\\_r=1%26th=%26oref=slogin%26emc=th%26pagewanted=print](http://www.nytimes.com/2008/05/06/science/06dumb.html?_r=1%26th=%26oref=slogin%26emc=th%26pagewanted=print)

[139] La femme ayant deux chromosomes X et l'homme un seul, plusieurs maladies neurologiques sont plus répandues chez l'homme que chez la femme, car celle-ci a moins de chances d'avoir subi des mutations des deux exemplaires d'un même gène. Il y a là un effet réparateur : chez la femme, la présence de l'exemplaire sain d'un gène annule parfois l'effet d'une mutation de l'autre.

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

[141] Article *From a Few Genes, Life's Myriad Shapes*

*The New York Times* du 26/06/2007

<http://www.nytimes.com/2007/06/26/science/26devo.html?th=&emc=th&pagewanted=print>

[142] Article *Effect of active smoking on the human bronchial epithelium transcriptome* - *BMC Genomics* du 29/08/2007 - <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/8/297>

Extrait traduit: "Fumer altère de manière irréversible l'expression de certains gènes, notamment parmi ceux qui contribuent à la réparation des chaînes ADN et ceux qui

combattent le développement du cancer du poumon. Cette altération se produit chez certains fumeurs en quelques années. Elle est accompagnée d'altérations réversibles et d'altérations partiellement réversibles."

[143] Compte-rendu de recherches *A Changing Portrait of DNA* Newsweek du 17/12/2007. <https://www.newsweek.com/changing-portrait-dna-94585>

[145] Logiciel d'application MAPLE 2017 - <http://www.maplesoft.com/> - Ce logiciel permet de faire des calculs mathématiques formels comme la dérivation de fonctions ou la résolution de systèmes d'équations différentielles. MAPLE interprète des chaînes de caractères tapées au clavier en y reconnaissant des commandes (ordres d'exécution) et des données, et en affichant à l'écran le résultat de l'exécution de ces commandes avec ces données. C'est ainsi que si on lui demande la dérivée de la fonction  $ax^2$  par rapport à  $x$ , MAPLE répond  $2ax$ .

Autre programme d'application du même genre :

MATLAB - <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>

[149] Gènes et comportement

- Livre *The Science of Good and Evil - Why People Cheat, Gossip, Care, Share, and Follow the Golden Rule* par Michael Shermer (Times Books, 2004). Ce livre est un compte-rendu de recherches récentes sur l'avènement des règles morales.
- Article citant des recherches qui confirment celles de ce livre : "*Is 'Do Unto Others' Written Into Our Genes?*" - *The New York Times* du 18/09/2007, <http://www.nytimes.com/2007/09/18/science/18mora.html?th=&emc=th&pagewanted=print>

[150] Liste de quelque 200 universaux parmi 373 identifiés par Donald E. Brown extraite de l'ouvrage *Human universals*. New York: McGraw-Hill  
<http://condor.depaul.edu/~mfiddler/hyphen/humunivers.htm>.

[151] Universaux :

- Article *The Moral Instinct* - *The New York Times* du 13/01/2008  
[http://www.nytimes.com/2008/01/13/magazine/13Psychology-t.html?\\_r=1&th=&oref=slogin&emc=th&pagewanted=print](http://www.nytimes.com/2008/01/13/magazine/13Psychology-t.html?_r=1&th=&oref=slogin&emc=th&pagewanted=print).
- [149] page 60.

[152] Déclaration universelle des droits de l'homme des Nations unies  
[http://www.ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR\\_Translations/frn.pdf](http://www.ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR_Translations/frn.pdf).

[177] Edward N. Lorenz - *The Essence of Chaos* - University of Washington Press (1993)

[178] Article *Self-Organization in the Physico-Chemical and Life Sciences* (29/03/1996) <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/faces/viewItemFullPage.jsp?itemId=escidoc:601715>  
**Abstract:** Experimental and theoretical analysis have by now established the existence of self-organization, from the molecular (e.g. self-assembly) to the macroscopic level (e.g. chemical oscillations and pattern formation). There is

increasing awareness that self-organization is likely to provide the key to understanding the marked polymorphism of matter in the mesoscopic and macroscopic levels as well as many phenomena in the life sciences such as evolutionary processes, the development of patterns and the principles underlying the brain function. This publication concentrates on phenomena observed in the life sciences that take place far from equilibrium. Also included are oscillating chemical reactions because they provide a well characterized paradigm for self-organization of direct relevance to biology. Furthermore, some specific ordering processes operating near chemical equilibrium, such as molecular recognition, are included in the essay because they are a prerequisite for the biological function.

[183] Daniel Kahneman, prix Nobel d'économie 2002 - *Thinking, Fast and Slow* - Penguin Press (2012)

[184] Jean TIROLE, prix Nobel d'économie 2014 - *Economie du bien commun* – Editions PUF (2016)

Cet ouvrage présente les problèmes actuels d'économie (chômage, déficit, inégalités, fiscalité, marchés...) dans un style remarquablement facile et agréable à lire. La principale difficulté des décisions économiques venant aujourd'hui d'une information insuffisante des décideurs, il présente ce sujet dans l'extrait ci-dessous.

(Citation de la page 32)

*Nous croyons ce que nous voulons croire,  
nous voyons ce que nous voulons voir*

Nous croyons souvent ce que nous voulons croire, pas ce que l'évidence nous conduirait à croire. Comme l'ont souligné des penseurs aussi divers que Platon, Adam Smith ou le grand psychologue américain du XIX<sup>e</sup> siècle William James, la formation et la révision de nos croyances servent aussi à conforter l'image que nous voulons avoir de nous-même ou du monde qui nous entoure. Et ces croyances, agrégées au niveau d'un pays, déterminent les politiques économiques, sociales, scientifiques ou géopolitiques.

Non seulement nous subissons des biais cognitifs, mais qui plus est, il arrive assez fréquemment que nous les recherchions. Nous interprétons les faits au prisme de nos croyances, nous lisons les journaux et recherchons la compagnie de personnes qui nous confortent dans nos croyances, et donc nous nous entêtons dans ces croyances, justes ou erronées. Confrontant des individus à des preuves scientifiques du facteur anthropique (c'est-à-dire lié à l'influence de l'homme) dans le réchauffement climatique, Dan Kahan, professeur de droit à l'université de Yale, observa que les Américains qui votent démocrate ressortent encore plus convaincus de la nécessité d'agir contre le réchauffement climatique, tandis que, confrontés aux mêmes données, de nombreux républicains se voyaient confortés dans leur posture climatosceptique<sup>1</sup>. Plus étonnant encore, ce n'est pas une question d'instruction ou d'intelligence : statistiquement, le refus de faire face à l'évidence est au moins aussi ancré chez les républicains disposant d'une éducation supérieure que chez les républicains moins instruits ! Personne n'est donc à l'abri de ce phénomène.

1 - Dans son article «*Ideology, Motivated Reasoning, and Cognitive Reflection, Judgment and Decision Making*», 2013, n° 8, page 407-424. Plus précisément, Kahan montre que les capacités de calcul et d'analyse réflexive n'augmentent pas la qualité de la révision des croyances sur le facteur anthropique. Rappelons

qu'en 2010 seulement 38% des [électeurs] républicains acceptaient l'idée d'un réchauffement climatique depuis l'ère préindustrielle et seulement 18% y voyaient un facteur anthropique (c'est-à-dire une cause humaine).

(Fin de citation)

[190] Jean-Paul Sartre - *L'Être et le néant* - Gallimard (1943)

[191] Gregory Berns - *Satisfaction: The Science of Finding True Fulfillment* – chez Henry Holt & Company, New York (2005)

[200] Article *Du monde quantique au monde macroscopique : la décohérence prise sur le fait* (CNRS - 15/12/1996) - <http://casar.pagesperso-orange.fr/Du%20monde%20quantique%20au%20monde%20macroscopique%20%20la%20decoherence%20prise%20sur%20le%20fait.htm>.

[201] (Bible) *Épître de Paul aux Romains* 11.33  
"O profondeur de la richesse, de la sagesse et de la science de Dieu ! Que ses jugements sont insondables, et ses voies incompréhensibles !"

[203-1] Livre *Our Mathematical Universe* par Max Tegmark - (Alfred A. Knopf, New York, 2014).

[267] Article *How many genes are in a genome?* par Ron Milo et Rob Philips <http://book.bionumbers.org/how-many-genes-are-in-a-genome/>  
extrait du livre *Cell Biology by the Numbers* (décembre 2015).

[268] Source : *Encyclopédie Universalis* [1q]

La notion de cellule s'applique aux systèmes où coexistent deux types différents d'acides nucléiques liés à des structures protéiques [l'ADN et l'ARN]. Dans ce cas, c'est l'ADN d'un chromosome qui va être *le dépositaire* de l'information génétique, tandis que l'ARN interviendra dans *l'expression* de cette information, en fait sa traduction en protéines au niveau de ribosomes, particules cytoplasmiques chargées d'ARN. L'ARN agit comme un interrupteur marche-arrêt pour autoriser ou inhiber l'expression de chaque gène. Il peut agir comme un enzyme en catalysant des réactions.

Comme l'ADN, l'ARN est composé de nucléotides, mais c'est une classe de molécules dont la forme est tantôt un brin replié (comme une protéine), tantôt une double hélice comme l'ADN.

[272-4] Carlo Rovelli – *Par delà le visible : La réalité du monde physique et la gravité quantique* (2015)

[301] *Relational Quantum Mechanics* (octobre 2019)  
*The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2019 Edition)  
<https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-relational/>

[313] Livre *La révolution inachevée d'Einstein – Au-delà du quantique* par Lee Smolin (Dunod 2019). C'est un excellent ouvrage, didactique et passionnant à lire. C'est aussi un livre à thèse défendant le réalisme naïf d'Einstein et de Smolin lui-

même contre l'interprétation antiphilosophique de Copenhague défendue par Bohr et Heisenberg et résumant des pistes de recherche dans ce domaine.

[315] Article *Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique* de Henri Poincaré dans *Acta Mathematica* 13, 1890, pages 1-270  
<http://henripoincarepapers.univ-lorraine.fr/chp/hp-pdf/hp1890am.pdf>

Voir aussi : *Note on the Quantum Recurrence Theorem* dans *Physical Review A* 18, N° 5 (11/78) - <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.18.2379>

[316] Livre *Epigenetics – How Environment Shapes Our Genes* par Richard C. Francis W. W. Norton & Company, New York, London.

[317] Livre *The Genetics Revolution – How Modern Biology is Rewriting Our Understanding of Genetics, Disease and Inheritance* par Nessa Carey – Icon Books, London