

1.3.4.4 Comment l'homme produit les lois de la nature

L'homme postule une loi à partir d'un enchaînement de causes et de conséquences

Lorsque l'homme constate qu'une situation S a été plusieurs fois précédée d'une situation S_0 , il généralise par induction et postule que S_0 est *toujours* cause de S : toute situation future identique à S_0 produira S . Cela s'énonce sous forme de règle.

1.3.4.5 Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)

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

Cette règle postule que pour toutes les situations identiques à S_0 :

- *Il existe une loi d'évolution de la nature* qui produit une situation identique $S \equiv S_0$ au bout d'un certain temps ;
- Cette loi est *unique*, pour qu'une cause donnée ait toujours la même conséquence ;
- 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 sont identiques, ils le resteront dans toute évolution qu'ils subissent tous deux, quel que soit leur éloignement dans l'espace ou le temps.

1.3.4.5.1 Importance de la vitesse et de l'amplitude d'une évolution

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

- Une loi d'évolution décrit celle-ci à partir d'une situation initiale en appliquant des règles de calcul. Mais une variable (qui a une valeur initiale à un instant initial et des règles de calcul) n'est connue avec une précision parfaite que lorsque c'est une unité internationale, définie arbitrairement, comme la vitesse de la lumière $c = 299\,792\,458$ mètres/seconde *exactement* ; toutes les autres variables sont entachées d'erreurs, donc le résultat aussi : *la prédiction d'une évolution est, en pratique, entachée d'erreurs.*
- Un système est stable lorsque ses variations sont trop petites et/ou trop lentes pour être observées. Un système qui paraît stable en ce moment a peut-être évolué de manière perceptible dans le passé, mais de plus en plus lentement, ou avec de moins en moins d'amplitude jusqu'à paraître stable en ce moment ; et peut-être évoluera-t-il de plus en plus vite ou de plus en plus fort à l'avenir.

Exemple

Au début d'un cours d'astronomie on considère seulement la direction dans laquelle se trouve une étoile, en ignorant sa distance et son éventuel mouvement par rapport à la Terre. Les étoiles sont alors censées se trouver sur une immense sphère céleste appelée « sphère des fixes », modèle cosmographique qui postule la fixité de la direction de visée de chaque étoile. En effet, à l'échelle de quelques siècles et à

fortiori à celle d'une vie humaine, les étoiles paraissent immobiles sur la sphère des fixes : leurs directions et leurs positions relatives ne changent pas.

En fait, l'immobilité apparente des étoiles n'existe que si on mesure leurs directions angulaires avec une précision modeste, notamment lorsqu'un homme compare un ciel de sa jeunesse, vu à l'œil nu, avec un ciel de son âge mur. Dès qu'on effectue des mesures de vitesse précises par *effet Doppler* (déplacement des raies spectrales : voir ce titre en annexe) on s'aperçoit que les étoiles bougent par rapport à la Terre : les positions stables connues ont été complétées par des lois de mécanique céleste.

Conclusions

- La vitesse mesurée d'évolution d'un phénomène n'a pas de raison d'être constante. Une évolution lente aujourd'hui peut avoir été beaucoup plus rapide dans le passé. Exemples :
 - L'expansion de l'Univers, dont le rayon augmente aujourd'hui plus vite que la vitesse de la lumière, c , a été des milliards de fois plus rapide peu après la naissance de l'Univers (le Big Bang), pendant une phase appelée inflation. Cette expansion hyperrapide n'a duré qu'un très court instant, de l'ordre de 10^{-35} seconde.
 - Considérons un système physique fermé (n'échangeant rien avec l'extérieur) tel qu'un tube allongé plein d'air. Supposons qu'au début de l'expérience l'air de la partie gauche du tube a été chauffé, pendant que l'air de la partie droite restait froid. Lorsqu'on arrête le chauffage et qu'on laisse l'air du tube fermé évoluer sans intervention extérieure, sa température tend vers une température limite, uniforme, *en variant de plus en plus lentement*.
La température stable constatée au bout d'un temps assez long pour que notre thermomètre de mesure ne bouge plus est le résultat d'une évolution convergente, pas le résultat d'une absence d'évolution. Un observateur qui ne voit qu'un thermomètre qui ne bouge pas aurait tort d'en conclure que l'air du tube a toujours été à la même température.

En résumé : compte tenu de l'imprécision inévitable de toute mesure physique, on ne peut conclure d'un état actuel de stabilité ni qu'il n'a jamais évolué, ni qu'il n'évoluera jamais, ni depuis combien de temps il n'évolue pas, ni qu'il n'évoluera pas beaucoup plus vite dans l'avenir...

Exemple : si on photographie le balancier d'un pendule oscillant avec un temps d'exposition de un dixième de seconde lorsque ce balancier est au sommet de sa course, on aura une photo nette car il bouge alors lentement ; mais une photo de même temps d'exposition au point le plus bas du balancier sera « bougée ».

Du point de vue philosophique, on doit tenir compte de la possibilité qu'une évolution dans le temps ait une vitesse et une amplitude variables, c'est-à-dire décrites par des fonctions non linéaires. La vitesse et l'amplitude d'évolution d'un phénomène, trop petites pour être mesurables à un instant donné, ne l'ont pas nécessairement toujours été, et ne le resteront pas nécessairement toujours à l'avenir.

Complément important : voir *La sensibilité aux conditions initiales*.

1.3.4.6 Principe de raison suffisante (en abrégé : Principe de raison)

Ce principe est apparu chez Leibniz dans la seconde moitié du XVII^e siècle, avant d'être cité par Kant ([B149] page 58), puis étudié en détail par Schopenhauer [B11].

1.3.4.6.1 Nécessité d'une cause déterminée

La règle d'unicité et de stabilité ci-dessus : « *la même cause produira le même effet, partout et toujours* » suppose un préalable : que tout ce qu'on constate, situation ou évolution, ait, pour un système, une cause bien définie (on dit souvent : *déterminée*) :

- Dont la présence *est nécessaire pour que cette évolution ait lieu* ;
- Dont la présence *suffit pour déclencher une évolution*, qui sera toujours la même dans les mêmes circonstances, car régie par une loi ;

c'est-à-dire une cause répondant à une *condition nécessaire et suffisante*.

Pour comprendre le besoin d'une cause nécessaire en plus de la cause suffisante, nous devons d'abord préciser la notion de *cause* ; et comme une cause s'applique à un *état de système* (des circonstances), nous devons définir aussi la notion d'état.

1.3.4.6.2 Etat (situation) d'un système

L'état (situation) d'un système à un instant donné est défini par ses variables d'état

Appelons *situation* l'état d'un système physique quelconque à un instant *t*. Cet état est défini par l'ensemble des *variables d'état* (informations) nécessaires pour le construire par la pensée à partir de matière-énergie. Ces informations sont soit *internes* au système (inhérentes), soit *externes* (relatives à son environnement : mouvement et forces par rapport à lui, rayonnements échangés, etc.).

Matière-énergie

La *Relativité restreinte* d'Einstein enseigne depuis 1905 que la matière et l'énergie sont deux formes d'une même réalité physique, la *matière-énergie*, souvent désignée simplement par le mot *énergie* entendu au sens large.

L'équivalence entre une masse de matière *m* (en kg), supposée immobile, et son énergie *E* (en joules) est donnée par la célèbre formule d'Einstein :

$$E = mc^2$$

où *c* est la vitesse de la lumière dans le vide, *c* = 299 792 458 mètres/seconde.

Exemple

La transformation en énergie de la masse d'une enveloppe de 20 grammes donne $0.02 \times 299792458 \times 299792458 = 1\,797\,510\,357\,473\,635$ joules ; c'est l'ordre de grandeur (énorme !) de l'énergie que produirait la chute de l'eau d'une piscine pleine de 50 x 8 x 2 mètres d'une hauteur de 229 000 kilomètres (60% de la distance de la Terre à la Lune). Dans une centrale électrique nucléaire convertissant de la masse d'uranium en électricité il faut peu de matière pour produire beaucoup d'électricité.

Variables d'état internes et externes

L'évolution d'un système à partir d'un instant donné dépend à la fois de son état interne et (s'il n'est pas fermé) de l'environnement avec lequel il interagit : ses variables d'état sont donc de deux types : internes et externes.

L'Univers est tout ce qui existe

On postule que l'Univers étant fermé (parce que, par définition, il n'existe pas d'extérieur interagissant avec lui) il n'est défini que par des informations internes, et régi par les lois naturelles d'interruption et d'évolution définies plus loin.

1.3.4.6.3 Définition d'une cause suffisante – Domaine d'application

Une cause suffisante (on dit aussi : *efficace*) est une situation (état d'un système) qui entraîne son évolution selon une loi (dite *de causalité*) unique et universelle. L'ensemble des situations (causes efficaces) entraînant l'application d'une loi d'évolution particulière est appelé *domaine causal d'application* de cette loi, ou simplement *domaine d'application* ; la loi n'existe que dans ce domaine, mais dans ce domaine elle s'applique partout (en toutes circonstances).

Exemple : attraction universelle

La loi d'attraction universelle de Newton affirme que deux objets matériels de masses M et M' distants de d s'attirent avec une force F donnée par :

$$F = G \frac{MM'}{d^2}$$

où G est la constante universelle de gravitation, $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Cette attraction entraîne la chute des corps, le mouvement des planètes, etc. C'est une cause qui agit à distance sans contact, du seul fait des masses.

Cette loi d'attraction s'applique à toutes les masses séparées par une certaine distance, dans tout l'Univers ; et elle s'est toujours appliquée et s'appliquera toujours.

L'accélération communiquée par un champ de gravitation donné (comme celui qui règne à la surface de la Terre) est la même quels que soient la masse, le volume et les autres caractéristiques d'un corps. Son domaine d'application est donc :

- Pour l'origine et la cible d'une force d'attraction : tout ensemble de plusieurs masses considérées en tant que masses, à l'exclusion d'autres variables ;
- Pour le lieu où ces masses existent : tout l'Univers.

L'effet d'une cause suffisante n'existe que dans son domaine d'application

Le domaine d'application d'une loi de causalité comprend, par définition, toutes les situations où elle s'applique : dans ce domaine elle s'applique partout, en dehors de ce domaine elle ne s'applique pas ; la cause d'évolution d'une loi est donc à la fois suffisante et nécessaire pour toute situation du domaine.

Dans l'exemple ci-dessus de l'attraction universelle, considérons deux particules qui ont une masse : l'électron ($0.9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$) et le proton ($1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).

La loi d'attraction universelle s'applique bien entre ces particules, du fait de leurs masses.

Mais leurs charges électriques opposées provoquent une attraction selon une autre loi, *l'attraction électrostatique de Coulomb* entre des charges Q_1 et Q_2 (mesurées en coulombs) :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{d^2}, \text{ où :}$$

- F est la force en newtons ;
- d est la distance en mètres ;
- ϵ_0 est la permittivité du vide $8.854 \cdot 10^{-12}$ coulombs par (volt .mètre).

A une distance donnée d , l'attraction électrostatique étant beaucoup plus forte que l'attraction universelle (environ 10^{36} fois pour deux protons), le domaine d'application de ces deux lois est si différent que l'attraction des masses est négligeable par rapport à l'attraction (ou la répulsion) électrostatique lorsque les deux coexistent.

On voit sur cet exemple qu'en dehors de son domaine d'application (celui des masses n'agissant qu'en tant que masses gravitationnelles) la loi d'attraction universelle ne s'applique pas (exactement : n'a pas d'effet sensible). Autre conséquence : en physique atomique on ne calcule les évolutions de systèmes avec l'équation de Schrödinger qu'en tenant compte de la seule force électromagnétique, qui comprend celle de Coulomb (voir *Equations de Maxwell*).

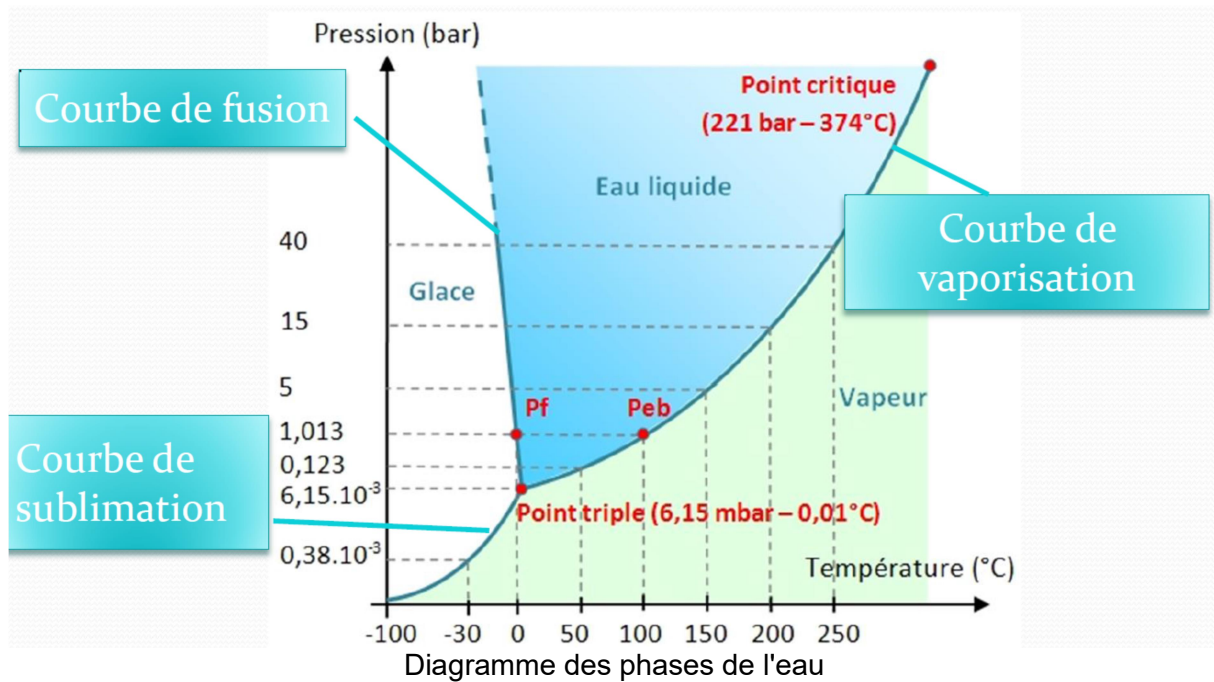
1.3.4.6.4 Limites d'application d'une loi d'évolution

Le caractère nécessaire d'une cause suffisante ci-dessus n'existe que parce qu'on a supposé une *évolution continue*. Si, comme le fait Kant lorsqu'il remonte par la pensée une chaîne de causalité (démarche appelée *régression*) sans supposer la continuité, on était passé d'une *situation* $S(t)$ à l'instant t d'un système à une *situation* $S(t-1)$ à l'instant $t-1$ qui en était la cause (il y en a une infinité, selon l'instant $t-1$ considéré), il y aurait eu un problème : selon le choix de l'instant $t-1$, la loi d'évolution de $S(t-1)$ à $S(t)$ aurait pu être différente et la condition suffisante (la cause efficace) n'aurait peut-être pas aussi été nécessaire : il aurait pu y avoir un changement de loi. Voici un exemple de changement de loi d'évolution : le *changement de phase*, appelé aussi *transition de phase*.

Changements de phase d'un corps pur

Un corps pur peut changer de phase, passant à un autre de ses trois états - solide, liquide ou gazeux - lorsque sa température et/ou sa pression varie(nt).

Si, pour une certaine évolution en température et/ou pression, on essaie d'expliquer l'état initial, à l'instant $t-1$, d'un corps dont l'état est connu à l'instant ultérieur t , selon qu'il y a eu ou non changement de phase entre $t-1$ et t il y a 0, 1 ou 2 changements de phase, transitions accompagnées d'un échange d'énergie et d'un changement de loi d'évolution. Voici le diagramme des phases de l'eau.



On voit que l'évolution de la phase d'une masse d'eau entre deux instants ne se fait pas nécessairement selon la même loi. Pour qu'un raisonnement de causalité s'applique correctement pour prédire l'avenir ou reconstituer le passé il faut que la loi d'évolution soit la même. Considérer des situations successives (c'est-à-dire une chaîne de causalité) sans certitude que leur relation est une même loi garantit seulement l'existence d'une cause.

1.3.4.6.5 Diagramme des phases d'un phénomène d'évolution

Pour représenter l'évolution d'un phénomène dont l'état est représenté par N variables interdépendantes on trace, dans un diagramme à N axes, la courbe reliant les points de proche en proche.

Ainsi sur le diagramme ci-dessus où $N=2$ phases (température et pression), à la pression constante de 5 bar (506 625 newtons/m²), lorsque la température augmente de -30°C à 200°C on passe successivement de l'état solide (glace) à l'état liquide, puis à l'état gazeux (vapeur). Les chaleurs spécifiques (quantités de chaleur par degré en joules par kg de masse) des 3 états sont différentes, et il faut aussi prendre en compte les deux chaleurs latentes (quantités de chaleur de fusion et de vaporisation par kg de masse) : il y a 5 lois d'évolution successives différentes.

Mais comme la transition liquide-vapeur s'arrête au *point critique* C, à une température supérieure à 374°C et/ou une pression supérieure à 221 bars l'état de l'eau ne fait plus de distinction entre liquide et vapeur : une évolution qui resterait au-delà du point C n'aurait pas de changement de phase et serait due à une condition initiale à la fois nécessaire et suffisante.

1.3.4.6.6 Continuité dans le temps des évolutions naturelles

Les évolutions naturelles sont continues

Le choix de Kant de se représenter les évolutions des systèmes par une succession de situations distinctes (une *chaîne de causalité*) en omettant l'hypothèse de continuité est malheureux ; et ce choix est d'autant plus étonnant qu'il savait que les

changements sont ininterrompus parce que leur cause est ininterrompue. Il écrit dans la *Critique de la raison pure* [B12] :

- Page 265 : "...ce n'est que dans les phénomènes que nous pouvons connaître empiriquement cette continuité caractéristique de la manière dont les temps s'enchaînent."
- Page 270 - "Tout changement n'est [...] possible que par une action continue de la causalité, laquelle, en tant qu'elle est uniforme, s'appelle un *moment*. Le changement n'est pas constitué par ces moments, mais il est produit par eux comme leur effet."

Kant et la physique de Newton

Au moment où Kant écrivait sa célèbre *Critique*, Newton avait déjà publié son ouvrage en latin *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, [B145]) depuis près d'un siècle, et les idées révolutionnaires de cet ouvrage s'étaient imposées à tous les savants, car à l'époque tous savaient lire le latin. On y apprenait notamment qu'une évolution physique (le déplacement d'une masse, par exemple) a une causalité exprimée par une fonction dérivée : la force F est la dérivée de la quantité de mouvement $p = mv$:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

Le paradigme « chaîne discontinue de causalité » que Kant utilise pour cette évolution aurait donc dû être remplacé par un paradigme « cause (situation) entraîne (sans interruption) fonction d'évolution, conformément à l'équation différentielle de la loi de Newton » : « cause entraîne fonction » et non « cause entraîne résultat ».

C'est pourquoi nous énonçons la condition suffisante du postulat de causalité sous la forme « cause entraîne évolution », qui est une prévision de changement, pas une prédiction de résultat.

Nous nous représenterons donc les évolutions causales comme continues :

- La conséquence certaine d'une situation S_0 sera une évolution continue, pas une situation S (dont la prédictibilité n'est pas garantie) ;
- Dans un passé infiniment lointain (à l'origine du monde : pour nous le *Big Bang*) toutes les évolutions auront un état initial – il n'y aura pas (comme pour Kant) de problème de chaîne infinie de situations dont la régression ne peut s'achever « parce qu'on ne peut compter jusqu'à l'infini ».

Justification de la continuité des évolutions physiques

La règle de stabilité : « La même cause produira le même effet, partout et toujours », qui s'entend pour toute comparaison de situations à des instants distincts, s'applique aussi à des intervalles continus de temps :

- Soit comme une action ininterrompue, d'un seul tenant, pendant une durée totale significative : c'est la *continuité dans l'intervalle de temps entre t_1 et t_2* .

(Continuité signifie ici absence d'interruption).

- Soit comme une action en cours à l'instant t qui a existé et existera encore à tout instant $t - \varepsilon$ ou $t + \varepsilon$, quelle que soit la petitesse de l'intervalle de temps positif ε : c'est la *continuité à l'instant t* .

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 je postule qu'une cause suffisante a pour conséquence l'application d'une loi d'évolution, celle-ci doit rester vraie aussi longtemps que sa cause, ni plus ni moins :

Toute loi d'évolution s'applique sans discontinuer aussi longtemps que sa cause suffisante existe (c'est-à-dire tant que l'état du système considéré reste dans le domaine d'application de la loi).

Nous verrons les conséquences de cette continuité plus bas, dans la présentation des *lois d'interruption*.

Une loi d'évolution continue ne garantit pas des résultats continus

L'applicabilité continue d'une loi n'implique pas la continuité des variables d'état qu'elle affecte, qui peuvent à l'occasion avoir un domaine de définition discontinu - par exemple un domaine quantifié comme celui des valeurs d'une charge électrique, toujours multiple de celle d'un électron : $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ coulomb.

(Lorsque je charge une batterie pendant un temps t - variable évidemment continue - le nombre de coulombs chargés est un multiple de e , pas un nombre réel ou fractionnaire à variation continue.)

Condition de continuité d'un résultat d'évolution

Une fonction $f(t)$, résultant de l'application d'une loi naturelle pendant un certain temps t ou à l'instant t , est continue si et seulement si son domaine d'application est continu : pendant un intervalle de temps dt petit la fonction $f(t)$ subit alors une variation df elle-même petite, qui est ou n'est pas proportionnelle à dt .

Exemple

La quantité d'électricité chargée dans la batterie précédente est discontinue quel que soit le temps de charge t si et seulement si la précision de nos mesures de charge permet d'apprécier des différences de l'ordre de « quelques e », sinon nous pouvons la considérer comme continue.

Les lois de Kepler gouvernant les orbites des planètes sont continues, un instant bref correspondant à un déplacement petit. Mais les lois de l'électromagnétisme de Maxwell (en annexe) ne sont continues qu'en apparence : les fonctions de leurs équations sont continues parce que la petitesse des quantités comme e et h (la constante de Planck $h = 6.6261 \cdot 10^{-34}$ joule .seconde) rend cette approximation acceptable.

C'est l'homme qui définit les lois de la nature, et ses définitions sont simples – notamment avec des lois continues – chaque fois que cette simplicité ne produit pas d'erreur décelable, particulièrement dans le domaine macroscopique.

Nous parlons donc de loi continue lorsque son énoncé admis utilise des variables et fonctions continues ; nous négligeons alors les aspects quantiques éventuels.