

## 2. Déterminisme : étude détaillée

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

#### Lois générales de la physique régissant l'existence de lois particulières

La physique a des lois générales régissant *l'existence même* de lois particulières.

Exemples :

- Aucune loi physique ne peut violer la conservation de l'énergie, du moment cinétique ou de la charge électrique.
- Théorème de Noether (voir *Invariances et lois de conservation (lois fondamentales de la nature)*) : l'invariance d'une théorie physique par rapport à une transformation continue se traduit toujours par l'existence d'une loi de conservation d'une quantité.
- Le principe d'incertitude de Heisenberg limite la détermination précise de certains couples d'observables et la stabilité de certaines mesures.

#### Enchaînement dans le temps des lois d'évolution d'un système

Nous avons vu dans l'étude du principe de raison suffisante que le domaine d'application d'une loi d'évolution particulière à un système donné est borné par des situations de déclenchement et d'arrêt. A part la situation particulière de déclenchement du Big Bang, début d'évolution de l'Univers et situation de déclenchement de toutes les lois d'évolution qui s'appliquaient à cet instant-là :

- Toute loi d'évolution régissant un système est déclenchée lors de l'arrêt d'une loi précédente ;
- Tout arrêt de l'application d'une loi d'évolution est suivi par le déclenchement de l'application d'une autre loi.

Cela signifie que :

- Tout ce qui existe et tout ce qui évolue dans l'Univers a pris naissance au même moment, lors de la situation déclenchant le Big Bang ;
- Tout objet ou système de l'Univers est en évolution perpétuelle, comme l'Univers lui-même, dont l'expansion constante accompagne les déplacements et évolutions des systèmes stellaires, le tout régi par des lois de la Thermodynamique, de la Mécanique quantique, de la Relativité, etc. Nous reviendrons sur ce sujet.
- Le déterminisme régit deux types de lois d'un système :
  - Des *lois d'interruption* :
    - ✓ qui définissent ou interdisent l'existence d'une loi d'évolution ;
    - ✓ qui déclenchent ou arrêtent éventuellement des lois d'évolution lorsque des conditions particulières sont satisfaites ;
    - ✓ qui définissent des ruptures de stabilité du système provoquant des transformations brutales : transition de phase ; désagrégation ; décohérence ; décomposition chimique ; formation d'une étoile naine, d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir, etc.

Chacune des parties résultantes évolue ensuite selon une loi d'évolution adaptée aux circonstances.

- Des *lois d'évolution* :
  - ✓ qui modifient l'état et/ou la position et l'orientation spatiale du système,
  - ✓ qui décrivent toutes les propriétés du système en fonction du temps : structure, formules de calcul de variables, interactions avec son environnement, etc.

Compléments dont la lecture est recommandée avant celle du paragraphe *Lois d'interruption* ci-dessous :

- *La nature est complète* ;
- *Symétries et lois de conservation des 4 types fondamentaux d'interaction.*

### 2.1.1 Lois d'interruption

Les lois d'interruption du déterminisme étendu sont un modèle théorique de la manière dont la nature peut « décider » des évolutions à lancer ou arrêter dans les circonstances les plus complexes. Ce pouvoir de décision couvre toutes les combinaisons de paramètres concevables, exactement comme l'esprit humain peut raisonner logiquement dans tous les cas possibles.

#### Définition des lois d'interruption

Une loi d'interruption répond à trois types de nécessité concernant les lois particulières de la physique :

- La nécessité d'exister ou de ne pas exister ; exemples :
  - « Dans telles circonstances, il doit exister une loi sur tel sujet ».  
Exemple : Théorème de Noether (voir *Invariances et lois de conservation (lois fondamentales de la nature)*).
  - « Dans telles circonstances, il ne peut exister de loi sur tel sujet » ;  
Exemple : « En matière de décomposition radioactive spontanée d'un élément il ne peut exister de loi de déclenchement de la décomposition au niveau d'un atome, mais seulement d'une population d'atomes. »

Sachant que c'est l'homme qui définit les lois qui s'appliquent à ce qu'il perçoit de la nature, les lois d'existence ci-dessus régissent le domaine de sa perception de la nature, dans lequel il peut légiférer.

Mais ces *méta-lois* elles-mêmes sont définies par l'homme pour régir son besoin et sa possibilité de légiférer : la réalité est inaccessible à l'homme, qui ne peut raisonner que sur des perceptions ; au-delà du modèle de réalité de la Caverne de Platon, il y a aujourd'hui la physique quantique, dont la petitesse de l'échelle atomique nous interdit de voir plus que nos propres équations descriptives de Mécanique quantique.

- La nécessité de respecter des contraintes entre résultats de lois distinctes ; exemple : respect du principe d'incertitude de Heisenberg sur la précision des déterminations de variables qui ne commutent pas, ou sur la stabilité d'un résultat observé dans un certain contexte.

- La nécessité de déclencher ou d'arrêter l'application d'une loi d'évolution d'un système lorsqu'une situation déterminée (les valeurs de ses variables d'état et des variables d'environnement) est atteinte.

Ce besoin est permanent et ininterrompu, et il ne souffre pas de délai de réaction. On peut se représenter ce type de loi d'interruption comme un *agent de surveillance continue* du système ; dès qu'une situation qu'il doit reconnaître apparaît :

- l'agent arrête ou lance instantanément des lois d'évolution auxquelles le système est soumis, en communiquant aux évolutions lancées les paramètres initiaux nécessaires ;
- l'agent déclenche la décomposition du système, la fusion de certaines de ses parties ou le changement de son état, puis applique aux résultats de cette action les lois d'évolution adaptées.

Le domaine d'application d'une loi d'évolution de système est donc régi par des lois d'interruption. A un instant donné, un système est soumis à l'action de toutes les lois d'évolution particulières qui s'appliquent ; ces lois sont définies par l'homme, qui postule que la nature en fait toujours la synthèse instantanée : à tout moment, un système particulier est soumis à sa loi *globale* d'évolution, synthèse par la nature de toutes les lois particulières.

Exemple (voir dans *Hypothèse géodésique – Temps propre* le sous-titre *Déviations de trajectoire dues aux champs électrique et gravitationnel*) : Une particule de masse  $m$  et de charge électrique  $q$  est soumise, dans un spectromètre de masse, à la force d'inertie de Newton et à la force électromagnétique de Maxwell. La trajectoire de la particule résulte de ces deux forces : l'homme postule que la nature en fait la synthèse, qu'elle applique à la particule.

Voir aussi plus bas *Contrôle de l'évolution et Lois d'évolution simultanées*.

Il appartient donc à l'homme de vérifier, lorsqu'il en est capable, que la synthèse qu'il constate pour l'évolution d'un système particulier correspond à la synthèse qu'il peut faire, en raisonnant, des lois d'évolution particulières qui s'appliquent au système. L'homme procède toujours ainsi : d'abord il postule l'existence d'une loi d'évolution qu'il décrit, puis il vérifie son adéquation. C'est pourquoi, pour de nombreux phénomènes, l'homme a « essayé » des lois successives pour décrire de façon complète et précise ce qu'il constate : valeurs de diverses grandeurs, évolutions, relations, etc.

Exemple d'essai de théories successives : voir *Rupture spontanée de symétrie*.

#### *Analogie informatique*

Un système d'exploitation d'ordinateur est un exemple de ce genre d'agent de surveillance. Il surveille en permanence l'activité de l'ordinateur en détectant des situations où il doit arrêter ou lancer un programme : saisie sur un clavier ; arrivée d'un message par le réseau ; demande d'un programme  $A$  adressée à un programme  $B$  ; fin d'un intervalle de temps avant déclenchement d'une certaine action, etc. Quand il lance un programme, le système d'exploitation lui passe si nécessaire des paramètres d'exécution.

### Détection des situations de rupture et réponse

En plus du début et de la fin de toute évolution, une loi d'interruption définit aussi les conditions dans lesquelles un objet doit passer d'un état stable à un état instable ou réciproquement.

*Exemple : décomposition spontanée par radioactivité alpha (décrite plus haut)*

Une loi d'interruption décrit les conditions d'une décomposition spontanée (comme celle de l'uranium 238, noté  $^{238}\text{U}$ ), où :

- Les *forces de Coulomb* (décrites par une loi d'évolution) poussent les protons du noyau d'un atome naturellement radioactif à se séparer parce que leurs charges électriques identiques les font se repousser ;
- Mais ces forces sont équilibrées par les *forces nucléaires* d'attraction entre ces protons qui tendent à les rassembler en un noyau d'un seul tenant, forces décrites aussi par une loi d'évolution.

La loi *statistique* d'équilibre prévoit une probabilité pour que 50% des noyaux d'un échantillon se décomposent spontanément au bout d'un certain temps appelé « période de demi-vie », sans pouvoir préciser lesquels ; dans le cas de  $^{238}\text{U}$  cette période est de 4.5 milliards d'années.

Le déclenchement effectif de la décomposition d'un atome donné ne devient pas déterministe par l'application de cette loi d'interruption, bien entendu, la cible de la loi étant la population entière du corps radioactif : il n'existe aucune loi déterministe de décomposition applicable à un atome particulier ; nous devons accepter la réalité d'une cause statistique de décomposition applicable à toute une population, même si une telle cause contrarie notre intuition. C'est parce qu'il existe de telles causes que le *déterminisme statistique* est nécessaire et régit des lois naturelles dont le résultat serait sans cela imputé au hasard.

### Détection des conditions de changement ou de persistance d'une loi d'évolution

Une loi d'interruption énonce des limites :

- Au-delà desquelles une loi d'évolution ne s'applique plus et une nouvelle loi d'évolution doit commencer à s'appliquer ;

Exemple : la température d'ébullition d'un liquide chauffé à pression constante, au-delà de laquelle sa chaleur spécifique est celle de la vapeur au lieu de celle du liquide ;

- Au-delà desquelles une valeur de variable d'état n'est plus calculable ou change de loi de calcul ;
- Qu'une évolution ne peut franchir ou violer, comme :
  - les principes de la thermodynamique ;
  - les lois de conservation (lois fondamentales de l'Univers) : conservation de l'énergie, de la charge électrique, du moment cinétique, etc.
  - le principe d'incertitude de Heisenberg ;
  - le principe d'exclusion de Pauli, etc.

### Rôles respectifs de l'homme et de la nature dans les lois d'évolution

Dire que la nature fait la synthèse de plusieurs lois de détail inventées par l'homme est un abus de langage : on ne peut pas supposer que la nature « obéit » à l'homme. Il est plus exact de postuler que la nature a une *Loi globale d'évolution* qui s'applique à tout objet considéré par l'homme, fut-il petit comme un électron ou grand comme une galaxie. Cette loi n'est pas formulable par l'homme, qui n'en observe que des comportements de phénomènes particuliers et conçoit des lois particulières, dont il vérifie la conformité avec ses observations et prédictions. L'homme fait des lois qui s'appliquent aux représentations des phénomènes qu'il constate, pour des systèmes arbitraires définis par lui. Le déterminisme est une doctrine qui concerne les lois physiques créées par l'homme, et c'est un postulat commode mais indémontrable que de supposer que la nature évolue selon ces lois.

Adoptons désormais l'hypothèse de travail que les lois humaines d'évolution décrivent fidèlement les évolutions de la nature. Sachant alors que cette nature fait à tout moment, dans sa Loi globale d'évolution, la synthèse de toutes les lois nécessaires à un système auquel nous nous intéressons, nous imaginerons les conditions d'existence et d'application des lois d'évolution partielle de la Loi globale.

### Complexité d'une loi d'interruption

Une loi d'interruption est la synthèse d'un certain nombre de conditions, indépendantes ou non. Un ensemble de telles conditions a une logique algorithmique correspondant à un raisonnement aussi complexe que l'on voudra, avec autant de variables que nécessaire, logique représentable par un programme.

La nature n'est pas régie par un ordinateur, mais quelle que soit la complexité d'une situation elle "sait" immédiatement comment réagir, quelle(s) évolution(s) interrompre et quelle(s) évolution(s) lancer, avec les paramètres adéquats ; or

**« Tout raisonnement logique peut prendre la forme d'un programme ».**

### *Traitement des indéterminations et des équilibres*

Certaines lois physiques prennent la forme d'indéterminations, comme le principe d'incertitude de Heisenberg ou les variations d'énergie à l'origine des fluctuations quantiques. D'autres décrivent des équilibres, qui peuvent s'établir ou se rompre, comme l'équilibre des noyaux atomiques radioactifs susceptibles de se décomposer.

Les expressions mathématiques de ces lois existent, elles permettent de *prévoir* ce qui peut se passer, mais pas de *prédire* quand et avec quelle(s) valeur(s) numériques cela se passera. La prévision est alors régie par des conditions de déterminisme statistique calculables et par une loi d'interruption, mais aucune prédiction n'est possible, il faut se faire une raison : les décompositions radioactives et l'état à long terme d'un système dynamique chaotique, par exemple, ne sont déterministes que statistiquement, pour une population entière.

### **2.1.2 Lois d'évolution**

Une *loi d'évolution* décrit :

- La manière dont un système se transforme et/ou se déplace lorsque ses conditions d'application sont remplies (et seulement tant qu'elles le sont, une loi d'interruption n'ayant pas interrompu l'évolution) ;

- Une structure du système, une formule de calcul d'une variable, etc.

Une loi d'évolution permet, par exemple, de :

- Décrire un objet ou une structure ;  
exemple : « L'atome d'hydrogène a un proton autour duquel tourne un électron ». C'est une loi, car elle décrit *tous* les atomes d'hydrogène.
- Calculer, pour un système donné dans des circonstances données et à un instant donné, une variable d'état faisant partie des informations descriptives du système ; exemple : calcul de la force électrostatique entre deux charges électriques par la loi de Coulomb.

#### *Prévision d'une évolution*

Une loi d'évolution permet ainsi de calculer la valeur d'une variable d'état d'un système en fonction d'une autre variable comme le temps, par exemple de la prévoir 1 seconde après le début d'une expérience.

Exemple 1 : évolution en fonction du temps

L'abscisse  $x$  d'un corps subissant une accélération  $g$ , lancé à l'instant  $t=0$  à vitesse initiale  $v_0$  d'une position  $x_0$  sera, à l'instant  $t$  :

$$x = \frac{1}{2}gt^2 + v_0t + x_0 \text{ où } g \text{ est l'accélération de la pesanteur, } 9.81 \text{ m/s}^2.$$

Une telle loi, toujours ininterrompue car due à une cause ininterrompue, prévoit donc toutes les conséquences d'une situation donnée aussi longtemps qu'elle s'applique.

#### Remarques importantes

- Une situation initiale d'un système a pour conséquence causale une évolution, non une situation conséquence ; c'est là une différence essentielle avec le paradigme d'évolution kantien par succession de situations distinctes (causes ou conséquences, selon le sens de parcours).
- Si la loi est symétrique par rapport au temps (inchangée quand on remplace  $t$  par  $-t$ ), elle permet aussi de calculer des valeurs du passé, c'est-à-dire de remonter des conséquences aux causes.

Voir *Principe de conservation de l'information d'un système fermé*.

Exemple 2 : évolution indépendante du temps

La loi des gaz parfaits à température constante (Loi de Boyle-Mariotte) relie le volume  $v$  d'un gaz à sa pression  $p$  par l'équation

$$pv = \text{constante.}$$

« La pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume ».

- Une évolution peut être intrinsèquement discontinue et passer par des étapes imposées ; exemple : la population d'un pays, comptée au 1<sup>er</sup> janvier de chaque année. Si on en connaît une loi d'évolution comme « la population augmente de 0.18% par an » on peut prévoir et prédire la population des années  $n+1$ ,  $n+2$ , etc. connaissant celle de l'année  $n$  :

$$pop_{n+i} = r^i pop_n$$

où  $r$  est la raison de la progression, 1.0018 dans l'exemple précédent

Nous avons vu dans l'étude du *Chaos* comment le déterminisme gouverne des évolutions de ce type. Sous cette forme itérative elles peuvent concerner des phénomènes naturels comme des modèles d'évolution d'origine humaine.

#### Règles d'application des lois d'interruption et des lois d'évolution

Une loi d'évolution s'applique (à partir d'une situation initiale) tant qu'une loi d'interruption ne vient pas arrêter l'évolution pour la remplacer par une autre.

Voir *Changements de phase d'un corps pur* au paragraphe *Limites d'application d'une loi d'évolution*.

Une loi d'évolution prévoit ce qui arrivera *si l'évolution a lieu, et aussi longtemps qu'elle a lieu* : c'est une prévision soumise à des conditions de déclenchement et de non-interruption. Lorsqu'une prédiction est possible avec une loi d'évolution, elle fournit des valeurs exactes, à la différence d'une loi d'évolution qui ne décrit que des changements de valeurs possibles.

#### **2.1.2.1      Contrôle de l'évolution**

L'application d'une loi d'interruption peut déclencher ou arrêter l'exécution d'une loi d'évolution : en ce sens-là, c'est une *loi de contrôle de l'évolution d'un système*.

- A chaque lancement d'une loi d'évolution, la loi d'interruption qui la contrôle lui communique les paramètres (valeurs initiales) d'exécution.  
Si les circonstances l'exigent, une loi d'évolution peut être arrêtée et relancée immédiatement avec de nouveaux paramètres.
- Tout objet naturel considéré par l'homme, simple ou complexe, évolue sous le contrôle d'une loi d'interruption.