

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 81 (1992)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Par bonheur, les dés sont pipés : ergodicité et épistémologie  
**Autor:** Fivaz, Roland  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-279861>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **Par bonheur, les dés sont pipés: ergodicité et épistémologie**

*par*

*Roland FIVAZ<sup>1</sup>*

*Abstract.*—FIVAZ R., 1992. Luckily, the Dice are Loaded: Ergodicity and Epistemology. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 81: 99-118.

Epistemology is the study of acquisition and validation of knowledge, which includes the discovery of the atomic nature of all existing matter. Yet inert matter and living matter feature irreconcilable dynamics, especially by the different organization they set up among atoms. The contradiction is removed by morphodynamics. This theory is a new extension of thermodynamics where the ergodic hypothesis applies recurrently to each organization level. The main result is a general growth principle for complexity. Thus, the lineage from atoms to ideas can be traced within the standards of rigor belonging to system dynamics. Physical constraints are thereby discerned on knowledge, its objectivity and purpose.

*Résumé.*—FIVAZ R., 1992. Par bonheur, les dés sont pipés: ergodicité et épistémologie. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 81: 99-118.

L'épistémologie étudie l'acquisition et la validation des connaissances, parmi lesquelles figure la découverte de la nature atomique de toute matière. Pourtant, matière inerte et matière vivante ont révélé des dynamiques irréductiblement différentes, notamment par l'organisation qu'elles instaurent entre atomes. La morphodynamique lève cette contradiction; il s'agit d'une nouvelle extension de la thermodynamique où l'hypothèse ergodique est appliquée par récurrence à tous les niveaux d'organisation. Elle aboutit à un principe général de croissance de la complexité. Il est alors possible de tracer le chemin reliant les atomes aux idées avec la rigueur reconnue à la dynamique des systèmes. Ce chemin fait état des contraintes que la physique impose à la connaissance, à son objectivité et ses finalités.

---

<sup>1</sup>*Institut de physique appliquée, Ecole Polytechnique Fédérale, CH-1015 Lausanne.*

*Le devenir est au-dessus de l'être*  
Paul Klee, Journal 1914

## 1. INTRODUCTION

Pour être validé, tout savoir doit non seulement prévoir mais aussi démontrer qu'il est compatible avec les multiples savoirs validés auparavant. C'est une part du problème épistémologique, qu'il faut reprendre à chaque découverte afin d'assurer la cohérence interne de la connaissance. Ainsi, le premier Bulletin de la Société traite déjà d'une des questions les plus ardues de la physique des corps, à savoir les «changements de phases»: comment se fait-il que les substances comme l'eau passent brusquement du liquide au solide ou au gaz tout en émettant ou absorbant de grandes quantités de chaleur (WARTMANN 1844) ? A cette époque, on considérait la chaleur comme un fluide mystérieux et il était légitime d'évoquer son éventuel lien avec l'électricité (WARTMANN 1842). Avec les années, les physiciens ont accumulé les données expérimentales sur les changements de phase, mais ils n'ont compris la relation avec la chaleur qu'après avoir inventé les atomes au tournant du siècle: à elles seules, les collisions entre ces particules hypothétiques fournissaient une explication aisément recevable pour l'esprit; surtout, elle s'étendait à toutes les propriétés de la chaleur, qu'elles soient mécaniques, physiques ou chimiques. La mécanique statistique formalisa ce qui devint l'exemple idéal de l'explication unitaire et cohérente de phénomènes multiples; cette théorie associe les plus grands noms, comme Boltzmann, Gibbs et van der Waals, et elle constitue sans doute le standard le plus exigeant qu'on puisse concevoir dans l'épistémologie de la physique.

Or, la situation se répète de nos jours. Pour les systèmes très complexes comme les systèmes vivants, mentaux ou sociaux, on a accumulé les propriétés empiriques en grand nombre, mais l'explication unitaire manque toujours: jusqu'à maintenant, il n'a pas été possible de remonter au niveau des mécanismes responsables de cette complexité. La raison est de nature idéologique. Les doctrines religieuses ont effectivement pris en charge les phénomènes à expliquer, et ils sont si nombreux et si intriqués que les observateurs scrupuleux concluent que le problème n'est pas de nature scientifique. Pourtant, il s'agit d'identifier des mécanismes fondamentaux, tâche qui est assurément l'apanage par excellence de la physique.

Aujourd'hui, la confrontation avec les systèmes complexes est même urgente parce qu'elle touche aux fondements épistémologiques de la discipline. En effet, la physique a établi que la matière simple est faite d'atomes obéissant aux lois de la mécanique, et que ces lois lui confèrent une dynamique très restrictive qui est décrite par la thermodynamique. Mais la physique a aussi établi que la matière complexe est faite des mêmes atomes; pourtant, la dynamique y apparaît irréductiblement différente: elle instaure d'elle-même des organisations entre atomes qu'elle ne cesse de perfectionner. Tant que cette disparité reste inexplicquée, elle menace la cohérence interne de la discipline: la physique ne peut ignorer qu'elle constitue elle-même un système mental qui est en dernier ressort porté par des atomes; pourtant, la dynamique de ce système complexe contredit sans appel celle qu'il a élaborée pour ses propres constituants! Einstein avait reconnu la profondeur de cette

contradiction épistémologique lorsqu'il s'étonnait que le monde physique fût intelligible: *ce qu'il y a de plus difficile à comprendre, c'est pourquoi nous sommes capables de la moindre compréhension.*

Aux yeux du physicien, le problème épistémologique a donc des tenants et aboutissants *matériels* encore inconnus mais qui doivent faire partie intégrante de sa formulation. Par conséquent, avant même le problème épistémologique se pose le problème de *la complexification des structures atomiques* qui a présidé à l'évolution: cette évolution a vu naître la vie au sein de la matière inerte, puis l'intelligence au sein de la matière vivante; enfin, mention également nécessaire, l'évolution a vu naître la méthode scientifique comme moyen d'exercer l'intelligence par des observateurs enclins à la rigueur et à l'objectivité. Ces événements sont tous des révolutions dans la manière de plus en plus complexe que la nature adopte pour assembler les atomes. Non seulement le comment de ces révolutions vers le complexe est un mystère, mais plus encore le pourquoi: quelles sont les causes premières qui sont en jeu, et quelles finalités cette course inexorable à la complexité peut-elle bien poursuivre? Il s'agit incontestablement de l'énigme la plus intrigante que l'homme puisse se poser en cette fin de siècle.

Or, le physicien qui s'intéresse à cette énigme a une petite longueur d'avance: il sait comment les atomes s'assemblent dans les systèmes simples et il en sait aussi le pourquoi. S'il parvenait de quelque façon à extrapoler ce savoir aux systèmes très complexes, il détiendrait une des clefs de l'énigme. Il pourrait alors tracer le chemin qui relie les atomes aux idées en passant par le problème épistémologique; il pourrait enfin explorer les limites que la physique peut éventuellement opposer aux ambitions de la connaissance humaine, voire aux exigences de l'éthique. Il se trouve que l'extrapolation est aujourd'hui possible: elle engendre une théorie générale de l'évolution de la matière à l'esprit; elle garde pourtant la rigueur reconnue à la dynamique des systèmes. Cet article est consacré à cette théorie; il en souligne les aspects de rigueur plutôt que la validation, que les applications ont déjà confirmée dans divers domaines des sciences humaines (FIVAZ 1989-1992).

## 2. LES FONDEMENTS DE LA COMPLEXITÉ

Cet article expose donc les jalons essentiels qui marquent le chemin vers la complexité. Il part de deux faits expérimentaux bien connus et de l'interprétation que la thermodynamique leur donne actuellement. Le premier fait est que, dans des circonstances externes adéquates, les systèmes atomiques ont des comportements coopératifs par lesquels ils s'ordonnent spontanément. Or, la thermodynamique tient un raisonnement irréfutable: l'ordre n'est compatible avec la nature particulière de la matière qu'en conjonction avec *l'hypothèse ergodique*, hypothèse qui implique qu'une source de chaos, endogène et permanente, existe dans ces systèmes. Le deuxième fait expérimental est que les circonstances externes conditionnant l'ordre sont à leur tour chaotiques en permanence dans l'environnement naturel où les systèmes complexes prospèrent. Bien qu'exogène, cette deuxième source de chaos permet de répéter le raisonnement thermodynamique: l'hypothèse ergodique s'applique à nouveau, de sorte que ces systèmes connaissent aussi un comportement coopératif par lequel un ordre global se construit; cet ordre est hiérarchique-

ment supérieur à l'ordre atomique et, par conséquent, susceptible de porter la complexité dans le système (voir tableau 1).

A suivre fidèlement la théorie connue, on conclut que cette deuxième étape doit être semblable à la première. Ainsi, la thermodynamique établit des principes qui régissent l'évolution des systèmes physiques en laboratoire, et des principes correspondants vont maintenant être établis: la théorie permettra effectivement de prédire *l'évolution spontanée des systèmes complexes dans leur environnement naturel*. L'étape finale consistera à décrire ce dernier comme l'agrégat de multiples systèmes complexes en interaction mutuelle, situation type où les lois de la dynamique engendrent des comportements chaotiques; ainsi, on comprendra en retour l'observation préalable que les systèmes complexes baignent dans un environnement chaotique. Puisque la thermodynamique est bâtie sur l'hypothèse atomique, on vérifie que cette théorie de la complexité relie les comportements très complexes à leur support physique; elle peut ainsi franchir le fossé rationnel qui sépare irrévocablement la matière de l'esprit. Mieux encore, ses lois héritent du caractère rigoureux et inéluctable qui marque les principes de la thermodynamique elle-même.

La thermodynamique tire son nom du fait qu'elle régit les mouvements de la *chaleur*; construite en strict parallèle, la présente théorie sera appelée la *morphodynamique*, car elle régit de la même manière les mouvements de la *forme* au sens de l'étymologie d'*informer*. En effet, les interprétations qui en découlent portent sur la connaissance et les codes dans lesquels elle s'exprime, tels que le code génétique de la biologie ou les langages. L'impact de la morphodynamique sur la compréhension des systèmes complexes sera donc à la mesure de ce que la thermodynamique a fait pour les systèmes physiques en liant leurs niveaux microscopique et macroscopique. Effectivement et malgré que le saut de complexité puisse surprendre, on prouvera des propriétés générales aujourd'hui tenues pour les bases empiriques des sciences de la vie; parmi celles-ci, il faut comprendre la biologie, l'économie et la sociologie, ou encore la psychologie et l'épistémologie.

Les sections qui suivent exposent les bases physiques de la morphodynamique, ainsi que les interprétations comportementaliste et cognitiviste qu'elle impose. Il sera alors possible de démontrer les principes d'évolution à partir d'observations banales de la vie quotidienne. Enfin sera discuté l'impact que les contraintes matérielles peuvent avoir sur le problème épistémologique.



Tableau 1.—Le tableau illustre la construction de la théorie générale de l'évolution à partir des propriétés physiques des particules matérielles. Dans la colonne de gauche, la thermodynamique considère un ensemble de particules matérielles et établit les propriétés du système physique ordonné; certains ensembles de systèmes ordonnés constituent des systèmes complexes. Dans la colonne de droite, la morphodynamique considère un tel ensemble, comme indiqué par la flèche pointillée, et elle établit les propriétés du système complexe; l'ensemble des systèmes complexes constituent à leur tour l'environnement réel dans lequel nous vivons. Les deux dynamiques sont donc construites en strict parallèle: l'application répétée de l'hypothèse ergodique aboutit à la création de niveaux d'ordre superposés, accompagnée d'émissions d'entropie successives. En morphodynamique, la source d'ergodicité réside dans l'environnement aléatoire comprenant les systèmes complexes déjà produits, comme indiqué par la flèche traitillée; le parcours de cette boucle est récurrent et il entraîne l'évolution vers des niveaux de complexité toujours plus élevés.

# THEORIE GENERALE DE L'EVOLUTION

## SYSTEMES PHYSIQUES

## SYSTEMES COMPLEXES

Dynamique des particules  
tridimensionnelle

Dynamique des structures  
unidimensionnelle

Interactions répulsives  
et attractives

Interactions répulsives  
et attractives

Chaos déterministe  
endogène

Chaos déterministe  
exogène

COMPORTEMENT ERGODIQUE ET MELANGEUR

THERMODYNAMIQUE

MORPHODYNAMIQUE

Equation d'état  
Conservation de l'énergie  
Maximalisation de l'entropie

Equations d'état  
Conservation de la propriété  
Maximalisation de la complexité

Formation de structures  
ordonnées

Formation de hiérarchies  
à niveaux multiples

EMISSION D'ENTROPIE

Ensemble de systèmes  
physiques interconnectés

Ensemble de systèmes  
complexes interconnectés

Système complexe

Environnement réel

### 3. LES BASES PHYSIQUES DE LA MORPHODYNAMIQUE

La morphodynamique reprend la description de la matière au point exact où la thermodynamique l'a laissée: lorsque les atomes d'un système ont des *interactions mutuelles répulsives et attractives*, ils forment des ensembles qui s'ordonnent pour des valeurs convenables des paramètres externes. Par exemple, l'eau est une phase plus ordonnée que la vapeur à partir de laquelle elle se forme à basse température et haute pression. La construction spontanée de cet ordre est l'explication maîtresse fournie par la mécanique statistique.

Selon cette théorie, les collisions mutuelles entre les atomes constituent un mécanisme générateur de *chaos* (voir Glossaire), rôle devenu particulièrement clair depuis l'apparition des théories du *chaos déterministe* (SCHUSTER 1984); la production permanente de ce chaos fait que tout état microscopique peut être atteint à partir de n'importe quel autre, de sorte qu'à longue échéance le système et son environnement atteignent tous les états possibles avec la même probabilité. Ce comportement mélangeur dirige donc inexorablement l'ensemble vers le plus grand désordre global qui exclut toute évolution ultérieure. C'est le contenu de *l'hypothèse ergodique*, non démontrée mais jamais mise en défaut à ce jour: elle postule qu'un insoluble problème d'évolution dans le temps est remplaçable par un simple problème de statistique sur les états qui participent au désordre global.

Cette hypothèse a trois conséquences importantes, dont la première est l'existence de *l'équilibre thermodynamique*: l'énergie cinétique est un invariant de la dynamique qui tend à se répartir uniformément entre tous les atomes présents, et la *température* repère la densité moyenne de cette énergie. La deuxième conséquence est la *maximalisation d'une fonction* mesurant le désordre et désignée en physique par *entropie*. Enfin la troisième conséquence apparaît lorsque les atomes peuvent se lier entre eux dans le système: les liaisons qui se forment libèrent de l'énergie que seules les collisions peuvent évacuer vers les atomes de l'environnement; c'est une des raisons pour laquelle l'ordre ne se produit dans un système physique qu'en présence d'une source de chaos. Il s'en suit le comportement coopératif qui accroît *l'ordre* au sein du système, mais le *désordre* s'accroît dans l'environnement qui recueille l'énergie libérée. La maximalisation de l'entropie totale entraîne alors le transfert d'énergie mesuré comme chaleur latente: techniquement, on parle de *flux d'entropie*, à la fois *moteur et conséquence* de la construction de l'ordre.

C'est la raison générique que donne la mécanique statistique pour expliquer l'ordre entre atomes. Au delà de cette raison, il se construit par un *processus non rationnel* et fait d'essais-erreurs en nombre indéfini: il n'existe effectivement pas de raisonnement formel, ou d'algorithme, qui prédise la structure de l'ordre à partir des constituants. Il faut encore la conjecturer pour appliquer la mécanique statistique, et l'observation directe reste la plupart du temps la seule source de renseignement.

Sur cette base strictement thermodynamique, trois hypothèses (FIVAZ 1992) suffisent pour bâtir la morphodynamique:

**Hypothèse constructive 1:** le système complexe est formé d'une multitude de sous-systèmes physiques distincts et tels que la thermodynamique les a décrits; les sous-systèmes s'ordonnent donc au gré des valeurs prises par les paramètres externes.

**Hypothèse constructive 2:** chaque sous-système est un système ouvert qui produit à l'extérieur une fonction spécifique à un débit dépendant seulement de son ordre; les fonctions du système complexe sont donc opérantes dès que l'ordre est acquis.

**Hypothèse constructive 3:** le système complexe est en contact avec un environnement chaotique, c'est-à-dire où les paramètres externes fluctuent aléatoirement dans le temps et dans l'espace; sous leur influence, le système évolue par des changements d'ordre interne chaotiques qui satisfont donc l'hypothèse ergodique.

La conjonction de ces trois hypothèses fait visiblement du système complexe un système doué non seulement d'une panoplie de réponses fonctionnelles au contexte, mais aussi d'un comportement ergodique qui implique une forme de maximalisation. La morphodynamique décrit donc un système capable *d'optimiser son adaptation à l'environnement*: bien que le critère d'optimisation reste à découvrir, on reconnaît qu'il s'agit d'un système vivant, qu'il soit biologique, mental ou social. Ainsi rendues plausibles, les hypothèses constructives doivent encore être validées *a posteriori* par comparaison de leurs conséquences avec la réalité. Celles-ci se déduisent par la démarche familière de la thermodynamique:

a.—les deux premières hypothèses dotent les sous-systèmes de variables d'ordre et de débit qui constituent des paires de *variables conjuguées* comparables à celles de la dynamique des atomes; de plus, une dynamique non linéaire couple ces variables et elle reprend le rôle que joue la dynamique des particules en thermodynamique. On établit ainsi que, comme les atomes, les sous-systèmes sont dotés *d'interactions mutuelles répulsives et attractives*;

b.—la troisième hypothèse fonde l'existence d'états stationnaires stables vers lesquels le système complexe tend nécessairement. Dans ces états se réalise *l'équilibre morphodynamique*; les moyennes prises sur tous les sous-systèmes sont alors constantes dans le temps et définissent le jeu des *variables morphodynamiques* qui décrivent entièrement ces états.

#### 4. L'ÉQUILIBRE MORPHODYNAMIQUE

L'accès à l'équilibre morphodynamique est d'abord tributaire des *interactions répulsives* qui jouent ici le même rôle que les collisions entre les atomes; elles représentent en fait des *interactions de concurrence* entre sous-systèmes exécutant la même fonction. On démontre qu'elles conservent une forme d'énergie potentielle, invariant qui se répartit uniformément dans le système complexe. Cet invariant engendre le premier concept crucial de la théorie: une variable morphodynamique, la *température complexe*, se trouve dotée du rôle central que la température joue en thermodynamique. Après calculs, la température complexe  $T$  s'avère représenter une moyenne de tous les paramètres externes  $I$  pondérée par les coefficients qui décrivent la dynamique des sous-systèmes:

$$(1) \quad T \propto \left\langle \frac{K}{D^2} I^{2/3} \right\rangle$$

où  $D$  mesure le seuil de sensibilité de chaque sous-système à ces paramètres et  $K$  l'amplitude de la réponse fournie par chacun d'eux. Encore comme en thermodynamique, l'équilibre se caractérise par une *équation d'état* qui relie les variables observables de l'extérieur à la température. La plus simple est *l'équation des systèmes complexes parfaits* où les sous-systèmes ont des interactions de concurrence dominantes:

$$(2) \quad p V = R T .$$

Dans cette équation,  $V$  mesure le *débit fonctionnel* moyen que le système délivre et  $p$  est la *tension* mesurant l'effort nécessaire pour acquérir les ressources externes utilisées; enfin  $R$  est une *constante* proportionnelle au nombre de sous-systèmes. Bien que l'interprétation en soit totalement différente, on reconnaît dans l'Eq. (2) la forme familière de l'équation des gaz parfaits de la thermodynamique. Cette forme est la signature macroscopique, certifiée et exclusive, de la nature particulière des constituants; elle est *universelle* car elle est indépendante de toutes les autres caractéristiques de ces constituants. L'Eq. (2) a par exemple été appliquée pour établir un modèle mathématique de la loi de l'offre et de la demande en économie de marché (FIVAZ 1992a).

De leur côté, les *interactions attractives* tendent au contraire à regrouper les sous-systèmes qui exécutent des fonctions semblables, c'est-à-dire à les classer par fonctions. Par exemple, un outillage standard comprend des gammes d'outils de même fonction mais de taille différente, et l'ouvrier en change pour accélérer le travail. De telles *interactions d'association* modifient l'équation d'état, mais la parenté des dynamiques retenues pour les systèmes physiques et les systèmes complexes impose de formaliser les effets de manière semblable. On aboutit ainsi à des équations d'état du type des *lois des états correspondants* bien connues en thermodynamique (LANDAU et LIFSCHITZ 1967), et dont la plus simple est *l'équation de van der Waals*. Ces lois sont singulières et multiformes, et par conséquent susceptibles de décrire les comportements coopératifs qui s'instaurent dans des *groupes* de sous-systèmes: des variables morphodynamiques supplémentaires font leur apparition au niveau hiérarchiquement supérieur. A nouveau, ces équations sont *universelles*, c'est-à-dire applicables quelle que soit la nature des sous-systèmes et de leurs interactions. Toutefois, l'ordre réalisé reste comme avant un *processus non rationnel*: il n'est pas prévisible par la seule logique et l'observation directe reste le plus souvent indispensable.

En vertu même de l'universalité, il est possible de répéter ce premier pas hiérarchique autant de fois qu'on veut, et la récurrence aboutit à une hiérarchie d'équations d'état. En conséquence, la morphodynamique prédit que les systèmes complexes sont capables de s'organiser spontanément en *niveaux hiérarchiques superposés*. La seule condition exigée est que l'hypothèse ergodique soit satisfaite à chacun d'eux, c'est-à-dire que le système garde le contact avec un environnement suffisamment riche en fluctuations. Or, comme on l'a déjà souligné, l'environnement naturel se constitue d'une multitude de systèmes complexes en interaction permanente: un tel système hypercomplexe est nécessairement le siège d'innombrables comportements chaotiques et le spectre des fluctuations est très vaste. Cette diversité justifie l'ambition de la morphodynamique de s'appliquer jusqu'aux plus hauts niveaux de complexité observés dans la nature. L'organisation en niveaux hiérarchiques est effective-

ment l'une des marques distinctives des systèmes complexes, que ce soit les êtres vivants au sein de leur niche écologique ou les systèmes mentaux dans leur contexte socio-culturel.

## 5. L'INTERPRÉTATION COGNITIVISTE

Cependant, dans un environnement perpétuellement changeant, la terminologie physique est malcommode car elle masque les relations dynamiques entre les variables internes et les paramètres externes. Le premier signe en est que l'Eq. (1) lie la grandeur interne  $T$  aux champs externes  $I$ . Cette relation est bien sûr inconnue en thermodynamique où l'on étudie les systèmes physiques dans des conditions contrôlées et fixes. Elle implique, au contraire, que *les systèmes complexes sont par essence inséparables de l'environnement* et qu'ils perdraient leurs qualités de systèmes morphodynamiques s'ils en étaient isolés. Puisque la première de ces qualités est l'adaptation aux conditions variables de l'environnement, on infère que les champs  $I$  agissent comme des *champs informationnels*: ils renseignent le système sur l'état de l'environnement auquel il doit s'adapter en changeant momentanément ses structures internes; aux grandes valeurs de  $I$  correspondent donc des *signaux* clairs sur les conditions imposées.

La température complexe fait aussi intervenir les paramètres internes  $D$  et  $K$  qui caractérisent les propriétés fonctionnelles des sous-systèmes; ces paramètres ont visiblement pour rôle de sélectionner dans la masse des signaux disponibles dans l'environnement *les informations pertinentes du point de vue des fonctions* du système. Effectivement, les signaux n'ont en eux-mêmes aucune signification prédéterminée à l'égard du système, et il lui revient de leur assigner un sens qui le concerne: il le fait en leur associant les comportements spontanés qui tirent le meilleur parti des conditions signalées, entre autres les comportements qui servent les intérêts de la survie au sens darwinien. A la longue, ces associations s'accumulent pour aboutir à un *code spécifique* du système où se correspondent des configurations particulières de signaux et des schèmes d'action optimisés. Par exemple, on reconnaît sans peine dans les paramètres  $D$  et  $K$  les capacités de *l'appareil sensori-moteur* des espèces animales et le code spécifique est l'ensemble des comportements étudiés en *éthologie*. De façon générale, on peut considérer métaphoriquement que les systèmes complexes ont tous des capacités sensori-motrices, et leur variété est à la mesure de la variété des systèmes cohabitant dans le même environnement. Par exemple, telle entreprise développe les moyens d'étudier le marché (paramètres  $D$ ) et de mettre en œuvre des stratégies de vente (paramètres  $K$ ). Les systèmes complexes se distinguent donc par des températures complexes qui s'étalent sur une vaste échelle, et les températures sont d'autant plus élevées que les systèmes développent des réponses vigoureuses et différenciées aux aléas du contexte.

Cette perspective comportementaliste suggère clairement de concevoir *la température complexe comme la valeur fonctionnelle de l'information sélectionnée par le système sur son contexte*. Pour les systèmes mentaux, c'est l'interprétation cognitive qui s'impose: *la température complexe repère le niveau de connaissance ou l'expertise atteinte dans le domaine d'activité*; ces systèmes accèdent donc à l'équilibre morphodynamique en se *familiarisant*

avec les contingences qui surgissent dans l'environnement naturel et en complétant le registre des réponses avantageuses.

Visiblement, il faut à ce point se résoudre à changer de langage: deviennent pertinentes les notions comportementalistes réservées aux systèmes qui puisent leurs raisons d'agir dans le contexte. Les interprétations qui en découlent frapperont peut-être les lecteurs habitués au langage traditionnel de la physique; ils devraient cependant retenir que la dynamique microscopique reste inchangée, et que la thermodynamique elle-même a dû se doter d'un langage approprié au niveau macroscopique, et comprenant des termes étrangers à la dynamique atomique, comme chaleur, entropie ou irréversibilité.

## 6. LES PRINCIPES D'ÉVOLUTION

Les principes sont des lois d'évolution macroscopiques et les méthodes statistiques peuvent les établir sur la base des propriétés des sous-systèmes comme la mécanique statistique le fait sur la base des propriétés atomiques. Cependant, l'histoire de la thermodynamique est différente: les principes ont d'abord été établis au niveau macroscopique à partir d'observations évidentes qui ont consacré leur caractère de lois intangibles. Cette démarche est équivalente à celle de la mécanique statistique mais elle est bien plus séduisante. En effet, pour la morphodynamique aussi, les observations évidentes qu'elle invoque sont accessibles à chacun, et elles ont l'intérêt de revêtir les nouveaux principes du même caractère intangible.

Ainsi, la thermodynamique considère des systèmes partenaires qui se transforment en échangeant de l'énergie: les principes distinguent d'abord deux modalités pour ces échanges, travail et chaleur, qui se reconnaissent à la coordination entre variables microscopiques. De même, les principes de la morphodynamique régissent les transformations au cours desquelles le système complexe échange des biens avec les partenaires habitant son environnement. Ces échanges modifient à tout moment la somme des biens dont chacun est propriétaire. En conformité avec *notre expérience quotidienne*, les principes distinguent d'abord deux modalités pour ces échanges; elles sont aussi reconnaissables à la coordination entre variables des sous-systèmes:

1.—l'échange de *services*, créés par l'activité délibérée et planifiée en vue d'un résultat utile aux partenaires. La production de tels services modifient les variables dynamiques des sous-systèmes du producteur de façon *coordonnée*; cela vaut aussi pour le récepteur qui désactive simultanément les structures qui produisent les services acceptés. Les services revêtent la forme de *savoir-faire reproductibles*; ils sont transmissibles tels quels, ou incorporés dans des supports matériels transmissibles comme systèmes expérimentés ou comme produits manufacturés. Par exemple, on transmet la technique d'impression de circuits électroniques en cédant un brevet, en déléguant un technicien entraîné, ou encore en livrant les circuits imprimés;

2.—l'échange de *messages codés*, concernant des éventualités d'intérêt, survenues mais encore ignorées, et contenant informations, instructions ou injonctions dans une suite *non prévisible ni reproductible*. Par conséquent, les variables dynamiques des sous-systèmes varient de façon *non coordonnée*

aussi bien dans le système émetteur qui formule le message que dans le système récepteur qui l'assimile: les contenus sont continuellement *nouveaux*. Ils sont aussi *pourvus de sens*, mais le sens n'est pas nécessairement le même pour les deux partenaires. Par exemple, le partage du manteau a pour Saint-Martin une tout autre signification que pour le mendiant, et une tout autre incidence sur leurs destinées respectives.

Cet exemple montre aussi que les deux modalités se superposent dans les échanges réels: le geste est à la fois déclaration et service rendu. De plus, elles s'avèrent transformables l'une dans l'autre. En effet, la *description* est la transformation d'un savoir-faire en un message; par contre, *l'exécution* est la transformation d'un message en un savoir-faire. *Notre expérience quotidienne* démontre que ces transformations se pratiquent sans gain ni perte, ce qui est formalisé comme suit:

**Premier principe:** *dans un cycle de transformations ramenant le système à son état stationnaire initial, la somme des services et des messages échangés est nulle; en conséquence, le système stationnaire est caractérisé par une fonction d'état appelée la propriété interne.*

Par exemple, un système peut échanger un savoir-faire ou son produit contre le produit, identique ou différent, d'un autre système; mais il peut aussi l'échanger contre des messages comme la promesse qu'il sera rendu, ou un signe monétaire, voire une marque affective. Ainsi énoncé, le premier principe stipule que *les partenaires se sont entendus sur l'équivalence des biens échangés* malgré la différence de leur nature; à défaut, il y aurait un gagnant et un perdant et les états initial et final seraient différents dans les deux partenaires, situation expressément exclue dans la présente formulation en termes de cycles. Par exemple, le *Code des obligations* requiert l'équivalence des biens pour que les contrats passés entre tiers aient force légale; à défaut, il les déclare nuls pour escroquerie ou abus de confiance.

Comme les variables dynamiques des structures subissent *des variations spécifiques de l'échange*, le système complexe s'éloigne de l'équilibre stationnaire qu'il avait préalablement réalisé en se familiarisant avec l'environnement naturel. En effet, l'échange peut comporter des éléments divergents ou improbables dans cet environnement, par exemple des produits nouveaux ou des instructions inédites: l'échange met alors le système en demeure de modifier son comportement, ajustement qui requiert la réorganisation de ses structures internes. Cette réorganisation s'élabore progressivement à partir d'*informations pertinentes* recueillies auprès d'autres sources dans l'environnement naturel: il y a *apprentissage orienté* grâce au comportement ergodique induit et un équilibre différent s'établit qui intègre les éléments divergents. Ce processus de restauration de l'équilibre stationnaire est un processus irréversible qui prend du temps, temps qui se manifeste, par exemple, comme le délai entre la réception d'un ordre et l'exécution de la tâche: un atelier ne délivrera les pièces commandées qu'après que les travailleurs ont mis au point le savoir-faire et adapté l'équipement. La transformation est alors dite *irréversible* et le calcul morphodynamique ne peut la suivre en détail. En revanche, si les échanges sont suffisamment lents ou activent des structures pour la plupart déjà présentes, l'apprentissage nécessaire n'apportera pas de retard décelable. Le comportement ergodique restaure alors continûment l'équilibre avec l'environnement naturel en le faisant glisser entre états voisins: la transformation est *réversible*

et les échanges ont même signification pour les deux partenaires. La morphodynamique décrit complètement les transformations réversibles.

Cependant, et comme entre travail et chaleur en thermodynamique, on ne peut pas toujours transformer les deux modalités d'échange entre elles: s'il est effectivement facile de décrire un savoir-faire à un certain niveau de détail, il n'est généralement pas possible de passer à l'exécution à partir de cette seule description; la raison pratique en est qu'une masse potentiellement infinie de données contextuelles n'y figurent pas. Par exemple, nul discours ne rendra Saint-Martin capable de reprendre le manteau qu'il a coupé sur une inspiration subite. *Le deuxième principe* de la morphodynamique a pour objectif de formaliser cette asymétrie fondamentale et d'en identifier les causes et les conséquences.

Comme avec la transmission de la chaleur en thermodynamique, l'asymétrie est liée à la direction préférentielle dans laquelle les messages se transmettent. *Selon notre expérience quotidienne*, ils ont en effet une propriété singulière quoique d'apparence triviale: *les messages ne passent que dans un sens*, à savoir qu'ils émanent d'un émetteur qui détient une information nouvelle, ou a la compétence de la déterminer, à destination d'un récepteur qui s'y conforme parce qu'il n'a pas ces prérogatives. Or, la température complexe s'interprète précisément comme la grandeur qui mesure le niveau de connaissance ou d'expertise; elle peut donc servir de «coefficient de qualité» qui spécifie *le sens permis* pour une transmission d'information entre deux systèmes. La température physique joue bien sûr le même rôle pour la transmission de la chaleur: on peut donc suivre le modèle de la thermodynamique pas à pas. En particulier, on reprend la formulation familière du deuxième principe en terme d'entropie: on définit une deuxième fonction  $S$  du système qui mesure le *nombre* de structures distinctes dont il dispose dans un état stationnaire donné. Cette fonction d'état, appelée *fonction complexité*, jouit alors de la propriété suivante:

**Deuxième principe:** *entre deux états initial et final, la somme des messages échangés, pris avec leur signe et après division par la température complexe à laquelle l'échange a eu lieu, ne saurait dépasser la variation de complexité  $S$  du système entre les deux états.*

La variation de complexité est spécifique des structures constituées dans le système; elle est indépendante aussi bien de la signification des informations que des circonstances dans lesquelles elles sont actuellement échangées. Inversement, lors de l'émission réversible d'un message  $Q$ , le changement en complexité est pondéré par le coefficient de qualité  $T$  qui dépend des fonctionnalités du système selon l'Eq. (1):

$$(3) \quad Q = \int_A^B T dS.$$

Le contenu du message ne dépend pas seulement de sa longueur mais aussi du *chemin parcouru* par le système émetteur entre ses deux états  $A$  et  $B$ . La signification s'inscrit donc dans la succession particulière et unique des symboles dans le message, succession qui est prescrite par le niveau de connaissance alors mis à contribution. Le système récepteur devra aussi se transformer entre deux états pour assimiler le message, et le changement de complexité induit dépendra du chemin que ce système aura alors parcouru entre ses deux états. Comme déjà signalé, les changements de complexité sont

en général différents dans l'émetteur et dans le récepteur; l'identité ne peut survenir que si les températures complexes sont constantes et très voisines, c'est-à-dire si les deux systèmes sont déjà en équilibre morphodynamique.

Comparée à la *Théorie de l'information* classique (ATLAN 1972), la morphodynamique offre une description plus complète des messages car elle évalue le sens des informations échangées. En effet, la théorie de l'information ne décrit les messages que par leur longueur (après transcription optimisée en langage binaire) et ignore tout de leur contenu sémantique. On voit alors un échange prendre la forme suspecte d'une fonction d'état indépendante du chemin, propriété en contradiction patente avec la thermodynamique. C'est la raison pour laquelle la théorie de l'information ne saurait rendre compte de l'ordre, par exemple dans les structures biologiques: la «qualité» de l'information y est plus importante que sa quantité (BLUMENFELD 1981).

En conclusion, la morphodynamique introduit une variable originale, la température complexe, qui *assigne une valeur au contenu sémantique de l'information échangée par les systèmes et la relie à la complexité définie comme fonction d'état de ces systèmes*. Pour les systèmes mentaux, la morphodynamique trouvera aussi des applications utiles dans le domaine de l'encadrement et de l'apprentissage dirigé: entre autres, elle formalise le fait empirique reconnu que toute connaissance ne s'acquiert qu'avec l'exercice de la compétence associée; de même, elle explique que le contact avec des partenaires expérimentés accélère grandement l'acquisition (FIVAZ 1991), mais ces partenaires doivent rester près de l'équilibre morphodynamique avec l'apprenant s'ils veulent que leur discours garde son sens.

## 7. THÉORÈME DE L'ACCROISSEMENT DE LA COMPLEXITÉ

L'aboutissement de la théorie est le cas particulier du système *isolé au sens morphodynamique*: il est isolé de tout partenaire avec lequel il pourrait échanger des messages, mais *il n'est pas isolé* de son environnement naturel. Dans ce cas, le deuxième principe prend une forme simplifiée qui possède un corollaire très utile:

**Théorème:** *si on lève une des contraintes externes qui maintiennent le système isolé dans l'état initial, le système quitte cet état pour évoluer spontanément vers un état final où sa fonction complexité est plus élevée.*

**Corollaire:** *si le système isolé se trouve dans un état stationnaire inconditionnellement stable sous les contraintes actuelles, c'est que sa complexité a atteint la valeur maximale absolue qui est possible sous ces contraintes.*

Ainsi, le système isolé qui évolue voit ses variables significatives se multiplier le plus possible et irréversiblement; en y joignant encore sa capacité à créer des hiérarchies, on déduit que *la complexification consiste non seulement en croissance mais aussi en classification*. Cette conjonction instaure une boucle évolutive divergente; elle a été analysée à l'aide de divers systèmes physiques sous le nom de *paradigme évolutionniste* (FIVAZ 1989).

L'évolution décrite par le deuxième principe se ramène donc à *une complexification spontanée*, complexification qui prend place grâce au comportement ergodique et mélangeur induit par les variations aléatoires de l'environnement naturel. On pourra dire familièrement qu'*un système*

*complexe laissé à lui-même dans son environnement naturel tend toujours à se complexifier*, mais c'est une ellipse dont on ne peut éviter les risques qu'en retournant aux énoncés détaillés qui précèdent. Or, il faut considérer comme isolés les systèmes morphodynamiques tels que les espèces ou les individus vivant au sein de leur environnement naturel. En effet, bien que l'environnement physique offre gratuitement des ressources énergétiques, il n'impose aucune prescription quant à leur exploitation - lacune astucieusement comblée par les revendications du style: «Au commencement était *le Verbe*». En réalité, les êtres vivants déterminent eux-mêmes leur mode d'existence, et ils rencontrent des fortunes diverses selon les stratégies qu'ils élaborent pour avancer leur cause. L'évolution spontanée des systèmes complexes est donc le sujet de prédilection de la morphodynamique, et la théorie est à même de spécifier les finalités que peuvent poursuivre de tels systèmes, avec, parmi eux, les êtres humains et les innombrables systèmes complexes dont ils s'entourent.

Au premier abord, le théorème de la maximalisation de la complexité surprend car il semble représenter la génération spontanée d'un bien sans contrepartie. Bien sûr, il n'en est rien: il y a émission continue d'entropie, d'abord sous forme de chaleur latente libérée pendant que les structures s'assemblent, et ensuite sous forme d'énergie dissipée pendant qu'elles fonctionnent. Ces flux d'entropie s'écoulent conformément au deuxième principe de la thermodynamique car une force physique est à l'œuvre, et elle réside dans les gradients de température entretenus par l'évolution spontanée de l'univers. La complexification se fait donc aux dépens de ces gradients exactement comme l'ordre physique se fait aux dépens de ces mêmes gradients. Il n'y a par conséquent aucune génération spontanée.

Ce que ces flux produisent de spontané, par contre, *c'est la conversion de variations aléatoires en signaux informationnels doués de sens*. Le mécanisme de conversion repose sur la conjonction du comportement ergodique et mélangeur et de la tendance universelle des systèmes dynamiques à minimiser leur énergie totale. Il se produit ainsi une ségrégation orientée des fluctuations qui s'accumulent continûment; elle aboutit à une complexification croissante du système, et chargée d'un sens déterminé par sa seule histoire. C'est peut-être l'aspect le plus étrange de la théorie; pourtant, il n'est pas plus étrange que la tendance au désordre des systèmes physiques isolés: là aussi, le comportement ergodique et mélangeur fait apparaître les structures à première vue les plus improbables, et la maximalisation de l'entropie résulte précisément de l'absence de toute discrimination entre les structures, même localement ordonnées. Dans les systèmes ouverts, par contre, l'énergie est mobile, mobilité qui tend à laisser sur place les structures qui abandonnent la plus grande énergie de liaison; il n'est donc, à la réflexion, pas étonnant qu'on trouve parmi ces structures fortement liées les spécimens les plus complexes, c'est-à-dire les plus improbables à première vue. Les structures résultantes sont donc à la fois localement complexes, improbables et non rationnelles. Ces qualités confèrent souvent une aura de surnaturel à l'évolution dictée par le théorème de maximalisation: il faut le reconnaître, cette évolution théorique rivalise en complexité avec le fonctionnement même de l'esprit que, de son côté, l'évolution naturelle a fait éclore au cours des temps géologiques.

C'est donc le moment pour l'esprit humain de se rendre à l'évidence: sans être inscrite explicitement dans les atomes, sa complexité est liée à leur

dynamique fondamentale. Peut-être a-t-elle pris une forme spéciale parmi d'autres possibles mais inimaginables; il n'empêche qu'elle est la conséquence, lointaine mais obligée, de propriétés matérielles connues. Cependant, à réaliser que la complexification ait pu aller aussi loin, on est tenté de conjecturer la présence d'un mécanisme général qui la rend active, voire divergente. En effet, un tel mécanisme est général s'il repose sur l'entropie émise à la complexification, et le théorème de maximalisation le rend d'autant plus plausible qu'il est plus efficace. Or, le mécanisme général et efficace est facile à désigner au niveau humain; *notre expérience quotidienne* nous le donne à connaître jour après jour: c'est *l'affect*, événement mental recherché qui nourrit notre vie cognitive des plaisirs d'apprendre et de découvrir. *L'émotion positive apparaît ainsi à la fois comme moteur et conséquence de la complexification de l'esprit*; chargée de ce rôle, l'émotion est le correspondant mental de l'émission d'entropie, émission reconnue comme moteur et conséquence de la construction de l'ordre au niveau physique.

Avec cette identification, la morphodynamique aboutit à une conjecture retentissante: si irrationnelles qu'elles semblent, *les émotions servent à mesurer l'intérêt des complexifications, et elles incitent à classer et à inventer*. Bien que basée sur des considérations physiques, cette conjecture trouve ample confirmation dans les vues les plus récentes de *la psychologie développementale*: cette science reconnaît aujourd'hui qu'émotion et cognition sont des fonctions adaptatives complémentaires, et qu'elles vont toujours de pair dans le développement mental (EMDE 1985, STERN 1989). De plus, la morphodynamique attribue les contenus de l'esprit aux influences externes, bien que l'histoire individuelle détermine leur signification privée; mais, de leur côté, les influences externes portent les thèmes culturels qui se cristallisent lors des échanges des significations privées. Cette boucle entre niveaux hiérarchiques entraîne l'évolution: *elle crée les significations* qui animent les hommes au cours des civilisations, comme est en train de le découvrir la nouvelle *psychologie culturelle* (BRUNER 1991).

Ainsi, l'inéluctable conséquence de la construction de l'ordre physique donne la voie à notre inéluctable motivation à organiser le monde qui nous entoure. On voit donc la morphodynamique nous éclairer sur les comportements que nous qualifions des plus humains; elle peut encore nous éclairer sur le statut des connaissances que nous recueillons sur notre environnement et nos partenaires.

## 8. L'ÉPISTÉMOLOGIE ERGODIQUE

L'épistémologie est la reine des sciences. Elle étudie comment l'homme acquiert et valide ses connaissances dans la mesure où ces actions sont rationnelles. Or, pour décrire une réalité externe où tout semble dépendre de tout, le premier problème est de la diviser en objets distincts pour les décrire séparément. Classiquement, ce problème est abordé sous l'angle idéaliste selon lequel on suppose que le sujet se confronte à un monde d'objets passifs et inaltérables par l'acte d'observation. Le sujet peut donc agir sans conséquence sur la connaissance à acquérir et, moyennant les efforts voulus, il peut appréhender la totalité des objets, y compris leurs composantes et leurs finalités éventuelles.

De nos jours, on considère que ces suppositions sont inadéquates pour les objets très complexes, et même pour les objets simples de la physique. Premièrement, l'objet en soi est inconnaissable: seul peut être décrit son comportement sous l'action d'autres objets de son environnement. Deuxièmement, l'observateur est lui-même un objet inconnaissable, mais en outre son comportement conditionne sévèrement les comportements observables de l'objet; en effet, il peut privilégier certains comportements aux dépens d'autres, ou bien il peut les modifier, parfois à son insu, lorsque l'objet est assez complexe pour s'adapter à l'acte d'observation. Troisièmement, le découpage du réel dépend du projet que poursuit l'observateur dans sa construction du savoir, et, par extension, de l'ensemble des projets qu'il prête aux objets étudiés. L'observateur téméraire court ainsi le risque de dénaturer les interdépendances vitales qui le relie aux objets. De plus, des causes finales déterminent sa connaissance, constat manifestement contraire aux *exigences d'objectivité* qui ont tant fait avancer les sciences exactes. Dans ces sciences, on a pris l'habitude de sauvegarder l'objectivité en partant des causes irréfutables qui figurent dans la dynamique des objets les plus simples, puis en reconstruisant symboliquement les objets réels à l'aide de théories déductives. Or, la morphodynamique est capable de réaliser ce programme de reconstruction pour les objets mentaux qui représentent les connaissances.

Le problème épistémologique s'en trouve complètement renouvelé. Il se présente d'abord comme un *problème triadique*: c'est le problème de *l'observateur* qui décrypte la complexité de *l'objet* à la faveur du comportement ergodique induit par leur *environnement commun*. Le décryptage consiste à faire ressortir les invariants de l'objet dans la suite des *variations aléatoires qui se produisent spontanément dans l'environnement*. Mais plutôt que d'attendre que les variations révélatrices surviennent, l'observateur peut substituer des *variations inventées* sous la forme d'hypothèses et de théories à vérifier ensuite par des expériences. C'est ainsi qu'il devient capable d'organiser des observations scientifiques systématiques en laboratoire: *l'observateur se constitue lui-même source d'ergodicité à l'égard de l'objet* et il peut mener rondement la traque aux invariants. En dernière analyse, cette capacité est l'héritage d'ergodicité que l'universalité lui a transmis au long de l'évolution naturelle à partir des atomes. Cet héritage constitue la base physique de son *autonomie d'action*. Le problème se simplifie alors à un *problème dyadique observateur-objet*, mais il reste possible que l'univers se rappelle de temps à autres en glissant une variante que l'observateur a omis d'imaginer: il sera obligé de réviser ses théories. Il devra même s'attendre aux révisions successives et accepter qu'elles soient parfois déchirantes en raison même du comportement ergodique à l'origine du savoir.

Qui dit autonomie d'action dit bien sûr projet, et la problématique classique de l'épistémologie réapparaît. D'après la morphodynamique, le projet de l'observateur est celui de tout système complexe: maximiser sa complexité en recueillant le plus d'invariants possible grâce aux échanges avec l'objet étudié. Il réalise son projet le mieux s'il accorde à cet objet le projet de complexification le plus libre possible: il appellera *modèle* le réseau d'invariants qui a, jusqu'à plus ample informé, le même potentiel de complexification que l'objet. Ainsi les projets de tous les objets se valent, celui de l'observateur compris, et ils tendent à devenir indépendants de lui dans la mesure où il poursuit le sien sans dévier. A la limite, les projets

accordés sont donc *uniques et objectifs* au sens faible, c'est-à-dire communs à tous les observateurs compétents.

Pour réaliser son projet, l'observateur n'a, selon la morphodynamique, qu'à laisser l'hypothèse ergodique opérer sans entrave: lorsqu'il en vient à placer des frontières pour découper le réel en objets distincts, il veillera à ce que les liaisons qui traversent les frontières valident au mieux l'hypothèse. Il en ressort des critères qui résolvent le problème du découpage (FIVAZ 1991a). Cette solution supprime l'obligation ancienne d'identifier le projet à partir des éléments de l'objet, ce qui est rationnellement impossible; puisque l'intérêt se déplace sur les liaisons, l'épistémologie devient une théorie à la fois *écosystémique, développementale et communicationnelle*.

Lorsque ce point de vue s'éclaircit, il est facile de désigner les sources d'ergodicité qui opèrent aux divers niveaux d'organisation. Par exemple, il y a les fluctuations quantiques et le chaos déterministe au niveau matériel; il y a les variations génômiques au niveau biologique, l'expérimentation au niveau du savoir, les associations libres et l'imagination au niveau de la pensée et des arts. De même, l'investissement et l'innovation technologique pour l'économie, la démocratie directe pour la politique, les modes et les mythes pour la culture, et l'aventure pour tout un chacun. Ces sources d'ergodicité concourent à émailler le monde réel de grandeurs toujours croissantes, et dont le devenir chatoyant reste la dernière frontière.

## 9. CONCLUSIONS

La morphodynamique semble exaucer les vœux les plus ambitieux de l'observateur de l'univers: elle unifie l'organisation en systèmes hiérarchisés qu'il reconnaît des particules élémentaires jusqu'à l'astrophysique et la cellule vivante, et de la cellule jusqu'à l'homme et la civilisation. Ainsi, les dynamiques qui régissent matière inerte et matière vivante acquièrent la cohérence que leur commune composition atomique demandait. Les hypothèses constructives que la physique a suggérées au départ s'en trouvent validées avec grande plausibilité: si l'univers est bien fait d'unités distinctes mais en interaction mutuelle, alors il possède pour finalité de constituer des ensembles hiérarchisés où la complexité est toujours croissante. En dernière analyse, cette finalité s'accomplit grâce aux comportements ergodiques inhérents aux non-linéarités des interactions mutuelles. L'ergodicité se révèle ainsi comme le fondement épistémologique de notre compréhension du monde.

Einstein ne voulait pas croire que Dieu joue aux dés tant l'enjeu semblait frivole. Avec la morphodynamique, il apparaît qu'il avait raison de se méfier: Dieu a pipé les dés par la matière même dont il les a faits; il joue donc, mais avec la sagesse du banquier du casino qui sait qu'il gagne avec le temps. Sans doute doit-il prendre plaisir à ce savoir, puisqu'il nous fait partager aussi bien le savoir que le plaisir: c'est, pour l'heure, le plus digne enjeu qui soit décelable.

## GLOSSAIRE

- adaptation:** changement survenant dans un système par lequel il améliore ses chances de survie dans un environnement variable
- adiabatique:** se dit de transformations où, en thermodynamique, l'échange de chaleur est nul, et, en morphodynamique, aucun message n'est échangé
- algorithme:** voir **rationnel**
- code:** tableau de correspondance entre les symboles utilisés dans les messages et les valeurs des variables dynamiques des systèmes émetteur et récepteur
- complexe:** se dit des systèmes dont la description exige de nombreux paramètres; la complexité est une fonction d'état qui croît avec le logarithme du nombre de ces paramètres
- débit:** taux temporel de production d'un système, par exemple quantité de matière transférée par unité de temps
- désordre ou chaos:** disposition quelconque d'éléments concrets ou abstraits, dans l'espace, le temps, ou une autre dimension. L'absence de toute corrélation interdit la prédiction d'événements locaux, mais elle conditionne les grandeurs globales; pour les systèmes qui ont des états d'équilibre, ce conditionnement est décrit par les principes de la thermodynamique ou de la morphodynamique
- déterministe:** dont la loi d'évolution a une solution unique et connue dès que les conditions initiales sont spécifiées. Certaines lois physiques sont telles que les conditions initiales devraient être spécifiées avec une précision infinie, ce qui est impossible; alors, des conditions initiales physiquement indistinguables conduisent à des solutions différentes et il est impossible de prédire laquelle sera réalisée. Ce comportement est appelé chaos déterministe
- entropie:** grandeur qui caractérise le désordre affectant les positions, les vitesses ou d'autres variables des particules d'un grand système à l'équilibre. Elle est mesurée par le logarithme du nombre d'arrangements distincts réalisables par permutation de toutes les valeurs possibles des variables
- équilibre:** état où les variables globales d'un système restent invariantes dans le temps; l'équilibre est stable si les perturbations s'amortissent spontanément. Les états d'équilibre satisfont l'équation d'état qui relie les variables globales externes à la température
- ergodique:** se dit du comportement d'un système par lequel les variables globales acquièrent des moyennes temporelles à long terme invariantes et identiques à leurs moyennes spatiales
- éthologie:** étude des comportements manifestés par un système vivant en réponse aux configurations de signaux survenant dans son milieu naturel
- évolution:** suite de transformations dans le temps. Elle est spontanée si toutes les transformations le sont
- global:** caractéristique de la totalité ou d'une grande partie d'un système
- information:** connaissance codée sous forme d'une suite de symboles, et transmissible comme message entre systèmes de température complexe différente. L'information est portée par la succession particulière de symboles dans le message. L'encodage et le décodage spécifient les sens valables pour l'émetteur et le récepteur; les sens ne sont généralement pas identiques car ils dépendent du chemin parcouru lors des transformations opérées à l'émission et à la réception
- local:** caractéristique d'une petite partie d'un système
- mélangeur:** se dit du comportement par lequel n'importe quel état microscopique peut être atteint à partir de n'importe quel autre au bout d'un temps assez long
- nouveauté:** comportement inaccessible au système isolé et acquis sous l'effet du contact avec l'environnement
- ordre:** disposition particulière d'éléments concrets ou abstraits, dans l'espace, le temps, ou une autre dimension, telle que la connaissance d'une partie suffit pour connaître l'ensemble ou pour faire des prédictions

- paradigme:** construction abstraite combinant plusieurs modèles simples en vue de reproduire le comportement d'un système complexe
- paramètre d'ordre:** paramètre global décrivant l'ordre dans un système
- phase:** portion d'une substance de structure donnée et pouvant échanger des molécules avec une autre phase de cette même substance, par exemple phase liquide et phase vapeur pour l'eau. Lorsque des phases différentes coexistent, les paramètres extérieurs se trouvent liés par des relations spécifiques des structures appelées lignes de coexistence
- principes:** lois globales observées dans les grands systèmes de particules, indémontrables mais jusqu'ici jamais prises en défaut. Les premier et deuxième principes de la thermodynamique stipulent que lorsqu'un système isolé change d'état d'équilibre, l'énergie est conservée et l'entropie croît; pour un système complexe isolé, les principes de la morphodynamique stipulent que la propriété est conservée et la complexité croît
- rationnel:** se dit de la suite finie et reproductible d'opérations logiques qui permet le passage de données initiales à un résultat final; l'algorithme est la version mathématique d'une telle suite
- sens:** contenu sémantique d'un message élaboré par l'émetteur dans l'intention de modifier le comportement du récepteur qui assimile le message
- spontané:** se dit des transformations qui cèdent d'elles-mêmes des apports tels que travail ou services sans requérir d'apports positifs tels que chaleur ou messages
- stable:** se dit des états d'équilibre où les perturbations sont spontanément amorties
- stationnaire:** se dit de l'état d'équilibre morphodynamique où les taux de variation restent constants dans le temps et les perturbations sont spontanément amorties. Dans ces états, le système soustrait continûment de l'énergie des champs extérieurs et la transforme en chaleur rejetée à l'extérieur: un flux d'entropie constant est émis
- structure:** cas particulier de l'ordre; manière répétitive dont sont mutuellement agencées les parties d'un ensemble concret ou abstrait; elle contient souvent des symétries
- symétrie:** cas particulier de structure; est doué de symétrie l'ensemble tel qu'une transformation produit une image indistinguable de l'original. Est également appelée symétrie toute propriété invariante par cette transformation
- système:** ensemble d'éléments en interaction et donnant lieu à des propriétés collectives spécifiques de l'ensemble
- théorie de l'information:** théorie statistique des messages codés; ils sont caractérisés par leur longueur et la succession particulière des symboles est ignorée. La théorie ne traite donc pas de la signification des messages ni de la relation mutuelle de compétence entre émetteur et récepteur
- transformation:** passage d'un état d'équilibre à un autre où les variables conservent les relations mutuelles décrites par l'équation d'état. Elles sont réversibles si l'équation d'état est satisfaite tout au long de la transformation; si non, elles sont irréversibles
- universel:** se dit de l'ordre ou des relations qui dépendent du nombre de variables mais non de leur nature particulière
- validation:** preuve apportée a priori ou a posteriori qu'un procédé satisfait certains critères de véracité

#### RÉFÉRENCES

- ATLAN H. 1972. L'organisation biologique et la théorie de l'information. Hermann, Paris, Ch. 1.
- BRUNER J. 1991. ...car la culture donne forme à l'esprit. Eshel, Paris.
- BLUMENFELD L. A. 1981. Problems of Biological Physics. Springer Verlag, Berlin, Ch. 2.

- 
- EMDE R. N. 1985. An Adaptive View of Infant Emotions: Functions for Self and Knowing. *Social Science Information, Sage London*, **24.2**: 337-341.
- FIVAZ R. 1989. L'ordre et la volupté. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.
- FIVAZ R. 1991a. Texte et contexte, la perspective thermodynamique. *Cahiers critiques de thérapie familiale et de pratiques de réseaux, Privat* **13**: 59-77.
- FIVAZ R. 1991b. Thermodynamics of Complexity. *Systems Res.* **8**: 19-32.
- FIVAZ R. 1992. La morphodynamique, ergodicité dans les systèmes complexes. *Rev. Int. Systémique, in press.*
- FIVAZ R., 1992a. The Hidden Hand: Ergodicity in Economics. *Submitted for publication.*
- LANDAU L., et LIFSHITZ E., 1967. Physique statistique. Mir, Moscou: 329.
- SCHUSTER H. G. 1984. Deterministic Chaos. Physics Verlag, Weinheim RFA, Ch. 6.
- STERN D. N. 1989. Le monde interpersonnel du nourrisson. PUF, Paris, Ch. 4.
- WARTMANN E., 1842, Sur la non-caloricité propre de l'électricité. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat.* **1.7**: 112-116.
- WARTMANN E., 1844. Sur la détermination de la quantité de chaleur pour fondre 1 mètre cube de glace. *Bull. séances Soc. vaud. Sc. nat.* **1.7**: 287-290.

*Manuscrit reçu le 12 mai 1992*