

Les principes premiers de l'auto-organisation des systèmes complexes

Paul Meier, épistémologue indépendant

sys.theme@free.fr

Résumé:

Le concept d'auto-organisation est apparu dans les années 1970 à la suite des nouvelles théories du chaos, des fractales, de la cybernétique et de la systémique. Les travaux de Henri Atlan, d'Ilya Prigogine et de Yuri Ivanov prouvent que l'auto-organisation est bien un processus physique, même s'il comporte un aspect probabiliste. L'étude de ces découvertes fait apparaître trois conditions de l'auto-organisation, une *structure* complexe, un apport d'*énergie* et des *informations* de l'environnement, dont la *corrélation* est expliquée par la dynamique ondulatoire. Ces conditions sont comparables aux causes universelles d'Aristote qui, définies de manière spécifique comme principes axiomatiques, sont applicables par analogie à chaque domaine scientifique particulier. En effet, tout système, qu'il soit physique, biologique ou socio-économique, repose sur une structure, cause matérielle, interagit par une énergie, cause efficiente et évolue suivant les informations de son environnement, cause formelle, afin de conserver son existence, cause finale.

Abstract:

The concept of self-organization emerged in the 1970s as a result of the new theories of chaos, fractals, cybernetics and systemics. The works of Henri Atlan, Ilya Prigogine and Yuri Ivanov prove that self-organization is indeed a physical process, even if it involves a probabilistic aspect. The study of these discoveries reveals three conditions of self-organization, a complex *structure*, an *energy* supply and environmental *information*, the *correlation* of which is explained by wave dynamics. These conditions are comparable to the universal causes of Aristotle, which, specifically defined as axiomatic principles, are applicable by analogy to each scientific field. Indeed, any system, whether physical, biological or socio-economic, stays on a structure, as material cause, interacts with energy, as efficient cause and evolves according to the information of its environment, as formal cause, in order to preserve its existence, as final cause.

Introduction

L'**auto-organisation** est définie par l'encyclopédie en ligne Wikipédia comme "un phénomène de mise en ordre croissant, et allant en sens inverse de l'augmentation de l'entropie". La page se contente d'énumérer des systèmes particuliers susceptibles d'être auto-organisés sans discuter la théorie causale proposée par Henri Atlan et sans même mentionner celle des structures dissipatives" d'Ilya Prigogine" qui pourtant a été récompensée par un prix Nobel. Quant à donner aux caractères auto-organisationnels des phénomènes biologiques une explication physique ou mathématique, la page se contente d'affirmer: "qu'on se heurte au fait que ces caractères ne pourraient pas exister sans une **cause finale** (cf. téléologie)".

Le déterminisme scientifique est incompatible avec l'évolution irréversible des systèmes naturels et présuppose paradoxalement un créateur ou "démon de Laplace". Dans *La Nouvelle Alliance*, Ilya Prigogine et Isabelle Stengers ont écrit: "L'histoire de la physique ne se réduit pas à celle du développement de formalismes et d'expérimentations, mais est inséparable de ce que l'on appelle usuellement des jugements "idéologiques". (NA p.34). Prigogine n'a pas pu convaincre la communauté scientifique de l'irréversibilité de l'évolution et du temps. Il confie d'ailleurs dans *La fin des certitudes*: "J'ai ressenti toute ma vie l'hostilité que suscite chez les physiciens le temps unidirectionnel." (FC, p.71).

Le présent article a pour but de réactualiser la concept d'auto-organisation comme un processus physique, bien qu'il comporte un aspect indéterministe et bien que ses principes premiers, structure, énergie et information, si communs en science postmoderne du XXI^e siècle, relèvent de l'ontologie et de l'épistémologie et soient proches de la métaphysique.

L'auto-organisation selon Henri Atlan [1]

En 1972, Henri Atlan publia "*L'organisation biologique et la théorie de l'information*" où apparut en conclusion la notion d'auto-organisation. Il compara le système biologique à un système traitant l'information selon les méthodes techniques de la théorie de l'information de Shannon et Brillouin, qui ne s'occupent pas du sens, mais seulement de la quantité de signes transmis par un canal.

Sa théorie réunit pourtant des conceptions de l'informatique, de la cybernétique, de la thermodynamique, de la théorie des systèmes complexes et de la génétique. Elle se fonde sur le fait que les systèmes complexes ont un certain degré d'instabilité, formalisé par des "degrés de liberté", et une "redondance" qui signifie dans les techniques de l'information une répétition d'un même message permettant de corriger les "bruits" qui viennent perturber la séquence du flux de transmission des signes.

Dans ses conclusions il écrit:

"les processus d'auto-organisation qui apparaissent a posteriori comme la réalisation d'un projet, sont en réalité les effets de facteurs aléatoires de l'environnement que n'importe quel système peut utiliser de cette façon à partir d'un certain degré de complexité structurale et fonctionnelle."

Atlan ajoute:

"Les processus d'auto-organisation étant premiers par rapport à ceux de reproduction invariante, ces derniers jouent le rôle certes fondamental, de l'adjonction de mémoires aux mécanismes d'auto-organisation, capables d'arrêter et de figer ces derniers, de telle sorte que certaines étapes en soient conservées et amplifiées à moindre frais"

Ainsi Atlan a fait une nette distinction entre l'auto-organisation créant des structures nouvelles et l'autorégulation (ou reproduction invariante) qui permet la conservation de l'organisation.

Atlan explique l'auto-organisation d'un système déjà complexe comme une adaptation aux "facteurs aléatoires de l'environnement". Mais sa théorie présuppose une complexité au départ, c'est-à-dire une entropie négative et une dégradation progressive vers l'équilibre selon le deuxième principe de la thermodynamique classique en système fermé. Elle ne résout que partiellement les questions liées à l'émergence de propriétés nouvelles dans un environnement ouvert qui caractérisent la créativité et l'évolution des systèmes biologiques.

L'auto-organisation selon les "structures dissipatives" d'Ilya Prigogine [2]

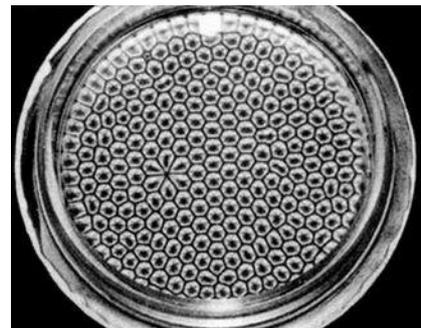
La théorie de H. Atlan reste un cas particulier, une exception dans le cadre de la dynamique classique des systèmes déterministes fermés. Les principes des "structures dissipatives" de Prigogine par contre s'appliquent à tous les systèmes naturels, physiques, cosmiques, biologiques, cognitifs ou socio-économiques, qui sont toujours des systèmes ouverts.

L'explication des "structures dissipatives", pour laquelle Prigogine a reçu le prix Nobel de chimie 1977, a une importance épistémologique considérable parce qu'elle relativise (ou "falsifie") le principe de raison suffisante de Leibniz. Elle met fin au dogme du déterminisme absolu et révolutionne la conception de la vie et de l'évolution. Elle annonce un changement de paradigme. C'est pourquoi elle reste négligée ou ignorée dans le consensus scientifique.

Comme Atlan, Prigogine a fondé sa théorie des structures dissipatives sur les nouvelles théories des systèmes complexes ou théories du chaos et sur l'intervention d'influences aléatoires de l'environnement. Mais il affirmait que les processus dynamiques irréversibles sont la règle dans la nature alors que les trajectoires sont des exceptions idéalisées. L'évolution irréversible des systèmes thermodynamiques ne peut pas être décrite par la somme des trajectoires des éléments composants individuels comme l'a essayé Boltzmann. Prigogine a démontré que l'évolution de ces systèmes diffusifs est cohérente et irréversible: elle peut être étudiée statistiquement et prévue jusqu'à une certaine limite temporelle connue comme horizon de Lyapounov. Il attribuait la cause de la cohérence des systèmes à des interactions non locales, à longue portée qu'il expliquait par les résonances entre les degrés de liberté des éléments individuels, selon l'interprétation physique que Poincaré accordait aux systèmes d'équations non intégrables.

Prigogine illustre l'émergence de propriétés nouvelles, sous forme de "structures dissipatives", par l'exemple des tourbillons de Bénard:

"Une mince couche liquide est soumise à une différence de température entre la surface inférieure, chauffée en permanence, et la surface supérieure, en contact avec l'environnement extérieur. Pour une valeur déterminée de la différence de température, le transport de chaleur par conduction, où la chaleur se transmet par collision entre molécules, se double d'un transport par convection, où les molécules elles-mêmes participent à un mouvement collectif. Se forment alors des tourbillons qui distribuent la couche liquide en "cellules" régulières."
(*Entre le Temps et l'Eternité* p. 52)



Le flux de chaleur orienté de bas en haut rend le *système complexe* instable, loin de l'équilibre thermodynamique. L'*instabilité* rend le système "*sensible*" à la gravité qui n'a aucun effet à l'état d'équilibre. Il se forme alors par *corrélation* un ordre global de tourbillons de convection.

"Loin de l'équilibre, les processus irréversibles sont donc source de cohérence. L'apparition de cette activité cohérente de la matière - les structures dissipatives - nous impose un nouveau regard, une nouvelle manière de nous situer par rapport au système que nous définissons et manipulons. Alors qu'à l'équilibre et près de l'équilibre, le comportement du système est, pour des temps suffisamment longs, entièrement déterminé par les conditions aux limites, nous devons désormais lui reconnaître une certaine autonomie qui permet de parler des structures loin de l'équilibre comme de *phénomènes d'auto-organisation*". (TE 59)

L'exemple des tourbillons de Bénard fait apparaître les conditions fondamentales de l'auto-organisation qui peuvent être résumées en quatre points:

- une *structure* complexe, comportant des "degrés de liberté",
- un apport d'*énergie* rendant le système instable et sensible à l'environnement,
- des influences de l'environnement qui ont le rôle d'*informations*.
- une "*corrélation à longue portée*" qui résulte de la réunion des trois conditions: *structure, énergie et information*

1 - Structure complexe

La structure est définie par "l'organisation des parties d'un système, qui lui donne sa cohérence." La complexité d'une structure dépend à la fois du nombre des parties et de leur degré d'indépendance ou "degrés de liberté". La cohérence est minimale dans un gaz dont les molécules sont considérées comme indépendantes. Elle est maximale dans le cristal où l'ordonnance des éléments est fixe. Entre la phase gazeuse et la phase solide existe la phase liquide ou semi-liquide, qui est un équilibre entre indépendance et contrainte, une complémentarité d'indétermination et de détermination. L'état liquide est caractéristique des structures chimiques et biologiques. C'est dans ce domaine "entre le cristal et la fumée", selon le titre d'un livre de H. Atlan, que se situent les systèmes dissipatifs capables d'auto-organisation et les systèmes biologiques.

2 - Flux d'énergie

Prigogine explique les "structures dissipatives" en termes de la thermodynamique, selon laquelle la dissipation de l'énergie dans un milieu est appelée "production d'entropie". L'équilibre thermodynamique est un état final incohérent où la production d'entropie est nulle. Mais un état de non-équilibre peut être stationnaire si un apport permanent d'énergie compense la perte d'énergie. Tel est le cas des systèmes biologiques. Les végétaux maintiennent leur existence sous condition de l'apport d'énergie solaire, les animaux sous condition d'apport régulier de nourriture végétale.

Si l'apport d'énergie dépasse la quantité nécessaire pour compenser la production d'entropie, s'il est en surabondance (en redondance), sa dissipation conduit à une instabilité et à une réorganisation du système dans le sens inverse de la production d'entropie; il permet la production de complexité et de néguentropie. Dans "*La fin des certitudes*" (FC), Prigogine constate un ordre général du comportement auto-organisationnel des systèmes

"Alors que, à l'équilibre et près de l'équilibre, les lois de la nature sont *universelles*, loin de l'équilibre, elles deviennent spécifiques, elles dépendent du type de processus irréversibles. Cette observation est conforme à la variété des comportements de la matière que nous observons autour de nous. Loin de l'équilibre, la matière acquiert de nouvelles propriétés où les fluctuations, les instabilités jouent un rôle essentiel: la matière devient plus *active*". (FC 75)

"*La physique de l'équilibre nous a donc inspiré une fausse image de la matière. Nous retrouvons maintenant la signification dynamique de ce que nous avons constaté au niveau phénoménologique : la matière à l'équilibre est aveugle et, dans les situations de non-équilibre, elle commence à voir*". (FC 149)

Le biophysicien F.-A. Popp [3], expliquant les structures dissipatives, précise qu'il ne faut pas s'imaginer que n'importe quel apport d'énergie suffit pour faire émerger un ordre du chaos. L'apport d'énergie, quel qu'il soit, doit être cohérent, il doit avoir une orientation dans l'espace et le temps. Dans l'exemple simple des tourbillons de Bénard, c'est l'orientation du flux de chaleur de la base vers la surface qui est à l'origine de la cohérence. Dans les systèmes dissipatifs chimiques, et a fortiori dans les systèmes biologiques, les situations sont plus complexes. Ce sont des champs électromagnétiques orientés par des catalyseurs ou enzymes qui sont à l'origine de la cohérence.

3 – Informations de l'environnement

L'apport d'énergie dépassant la compensation de la production d'entropie rend le système instable et sensible à des influences qui, à l'état d'équilibre thermodynamique, n'ont pas d'effet. Dans l'exemple des tourbillons de Bénard, la gravité, qui normalement n'influence pas le système en équilibre, est à l'origine de la formation des mouvements de convection formant des cellules régulières.

L'organisation émergeant des structures dissipatives se produit en harmonie avec l'environnement. Toute structure naturelle, physique ou biologique, est située dans des champs énergétiques proches ou lointains qui conditionnent ses formes. Les influences qui conduisent à l'irréversibilité de l'évolution des systèmes dissipatifs ne sont pas réductibles aux conditions initiales ou à des perturbations transitoires; elles sont permanentes et cohérentes.

"Notre monde présente des interactions persistantes. [...] La distinction entre interactions persistantes et transitoires prend donc une importance cruciale dans le passage de la dynamique réversible des trajectoires à la thermodynamique. La mécanique classique considère des mouvements isolés alors que l'irréversibilité ne prend son sens que lorsque nous considérons des particules plongées dans un milieu où les interactions sont persistantes." (FC 133)

4 – Corrélations non locales

La cohérence des systèmes complexes de la nature n'émerge pas de rien, du chaos, du "hasard" ou de quelque "cause finale". L'organisation des systèmes ouverts résulte de l'interaction entre leurs éléments et les champs énergétiques de l'environnement et ceci sous forme de résonances.

Prigogine explique que les interactions persistantes brisent le déterminisme des trajectoires et conduisent à une probabilité et irréversibilité plus fondamentale que celle de la théorie du chaos déterministe due aux conditions initiales ou que celle de la théorie quantique attribuée au principe d'incertitude de Heisenberg. Il attribue la raison de l'irréversibilité à ce qu'il appelle "résonances de Poincaré" ou "Grands Systèmes de Poincaré" (GSP)

"Poincaré avait établi une distinction fondamentale entre systèmes stables et systèmes instables. Mais il y a plus. Il a introduit la notion cruciale de "système dynamique non intégrable". Il a montré que la plupart des systèmes dynamiques étaient non intégrables."
(FC 43/44) ...

"Mais Poincaré n'a pas seulement démontré que l'intégrabilité s'applique seulement à une classe réduite de systèmes dynamiques, il a identifié la raison du caractère exceptionnel de cette propriété: *l'existence de résonance entre les degrés de liberté du système*. Il a, ce faisant, identifié le problème à partir duquel une formulation élargie de la dynamique devient possible.

La notion de résonance caractérise un rapport entre des fréquences. Un exemple simple de fréquence est celui de l'oscillateur harmonique, ...

Les fréquences, et en particulier la question de leur résonance, sont au cœur de la description des systèmes dynamiques. Chacun des degrés de liberté d'un système dynamique est caractérisé par une fréquence." (FC 45)

"Les résonances de Poincaré jouent un rôle fondamental en physique. L'absorption et l'émission de la lumière sont dues à des résonances. L'approche vers l'équilibre d'un système de particules en interaction est, nous le verrons, due à des résonances. Les champs en interaction créent également des résonances. Il est difficile de citer un problème important en physique quantique ou classique où les résonances ne joueraient pas un rôle." (FC 47)

L'explication des corrélations dues aux fréquences et résonances conduit à une tout autre approche de la physique, celle de la mécanique ondulatoire. Elle incite à ressortir du tiroir des "hypothèses non retenues par la communauté scientifique" où elles ont été classées, des théories comme celles de l'harmonie des phases de Louis de Broglie et de l'ordre implicite de David Bohm, et à s'intéresser aux nouvelles conceptions selon lesquelles "la matière est faite d'ondes".

L'auto-organisation selon la Rythmodynamique d'Ivanov [4]

Yuri N. Ivanov commence son traité de *Rhythmodynamics* par des considérations épistémologiques et énonce trois postulats fondamentaux qui sont les principes de l'existence par auto-organisation du point de vue de la mécanique ondulatoire:

- l'existence de l'espace euclidien comme milieu physique des ondes électromagnétiques,
- le mouvement d'onde dans l'espace à la vitesse c , indépendante de la vitesse de la source,
- l'interaction d'ondes dans l'espace sous forme d'interférences et d'ondes stationnaires.

Il considère l'espace à la fois comme porteur d'ondes et comme substrat des structures et formes créées par les interférences d'ondes. Il admet que ce qu'on conçoit mathématiquement comme champ d'énergie est physiquement un champ d'ondes. Chaque particule est un oscillateur créant son champ d'ondes. Entre champs d'ondes se créent des interférences et des ondes stationnaires sous forme de maillages réguliers de ventres oscillants séparés par des nœuds au repos.

Ivanov établit le fondement de l'auto-organisation [5] sur le principe de la corrélation des fréquences et phases formant des ondes stationnaires et que Louis de Broglie appelait harmonie des phases. Il révèle que la raison de la corrélation non locale, que Prigogine attribuait aux résonances de Poincaré, réside dans les propriétés des ondes stationnaires.

Il est connu depuis les observations des pendules par Christiaan Huygens au 17^e siècle que deux oscillateurs mécaniques en décalage de phase ont tendance à synchroniser leur mouvement. Des recherches récentes tendent à montrer que la synchronisation s'effectue sur la base d'une fréquence

commune sonore, soit du support commun soit même de l'air [6]. Ivanov interprète le phénomène de synchronisation comme un phénomène d'auto-organisation qui est fondé sur le milieu oscillatoire entre les deux oscillateurs et sur l'onde stationnaire qui se crée dans le milieu vibratoire commun quel qu'il soit. Le même principe vaut pour les oscillateurs et ondes électromagnétiques dont le milieu vibratoire commun est l'espace physique.

L'interaction des champs d'ondes crée dans l'espace un réseau d'ondes stationnaires formé de ventres oscillants et de nœuds au repos. Les oscillateurs occupent les nœuds et les suivent dans leur déplacement parce que ces nœuds sont des puits potentiels, des points de quiescence. Par leur ordonnance dans les réseaux spatiaux d'ondes stationnaires, les atomes oscillateurs s'organisent en fonction de leurs fréquences spontanément en matrices cristallines et moléculaires formant les structures matérielles complexes. Par la dynamique des ondes stationnaires, Ivanov explique des propriétés de la matière que la physique a acceptées comme faits d'expérimentation ne nécessitant pas d'explication, telles que l'élasticité, l'inertie, le mouvement inertiel et l'accélération. Il a conçu un nouveau mode de propulsion possible dans l'espace fondé sur les décalages de fréquence et de phase, et a démontré le principe expérimentalement avec un modèle réduit de bateau propulsé par un couple d'oscillateurs sonores en décalage de phase en milieu liquide.

Ivanov a surtout démontré que l'interprétation d'Einstein de l'échec des expériences de Michelson, Morley et Miller par la relativité des coordonnées d'espace-temps est une erreur. Ce ne sont pas les coordonnées d'espace-temps qui se modifient aux vitesses relativistes. Ce sont les dimensions des ondes stationnaires et donc de l'instrument de mesure qui se contractent. Lorentz avait raison.

La dynamique des ondes stationnaires remet d'actualité les hypothèses de H.-A. Lorentz, de Louis de Broglie et de David Bohm. Elle permet de comprendre les relations non locales, appelées aussi intrication quantique, comme conséquence de l'onde de phase, à condition pourtant de reconnaître l'espace euclidien comme milieu physique dont la propriété oscillatoire en fait le substrat des structures matérielles, de leur mouvement et de la cohérence universelle.

Conclusion

Les conditions de l'auto-organisation macroscopiques des systèmes dissipatifs (structure, énergie, information) et celles de l'auto-organisation microscopiques des systèmes ondulatoires (espace, onde, interférences d'ondes) sont analogues. Ce sont des aspects spécifiques de trois principes existentiels et cognitifs universels, connus des hommes depuis des millénaires mais oubliés dans notre civilisation européenne récente.

La cosmologie chinoise appelait ces principes Yin, Yang et Qi. La civilisation indienne distinguait trois qualités premières ou Gunas: *tamas* l'inertie, *rajas* la force et *sattva* la mobilité, symbolisés par les éléments terre, feu et air. A l'origine de notre civilisation européenne, Platon attribuait aussi l'unité existentielle du monde et du vivant à trois principes élémentaires: la terre, principe de l'être selon Parménide, le feu principe du devenir selon Héraclite, et un principe des formes, qu'il attribuait à la proportion selon Pythagore (Timée 31b-32a). Aristote a traduit et défini les principes de son maître Platon par quatre causes: L'unité existentielle, *cause finale*, émerge de la réunion des causes *matérielle*, *efficiente* et *formelle*.

Dans le livre *Les trois visages de la vie* [7], les principes cosmologiques chinois et indiens et les principes des médecines traditionnelles qui en sont des applications sont interprétés comme principes premiers d'auto-organisation. Un modèle général des systèmes ouverts auto-organisés en résulte qui inclut aussi le sens et les unités de mesure du mouvement, de l'espace et du temps.

Le livre en ligne, *Retour au Bon Sens* [8], relate comment la pensée de notre civilisation occidentale a dévié de la logique ternaire et holiste platonicienne vers la logique dualiste et analytique aristotélicienne, aboutissant à l'empirisme scientifique déterministe et mathématique. Les nouvelles évidences scientifiques nous ramènent aux origines trinitaires et platoniciennes de notre civilisation. L'unité du réel et de la connaissance ne saurait être atteinte définitivement sur la base analytique et déterministe des mathématiques seules mais elle peut être approchée, selon le principe d'Ockham, par analogie avec les trois causes ou conditions de l'auto-organisation des systèmes naturels ouverts. Ces principes universels sont applicables par analogie de manière spécifique et différenciée comme principes axiomatiques dans chaque domaine scientifique. En effet, tout système, qu'il soit physique, biologique ou socio-économique, repose sur une structure ou cause matérielle, interagit par une énergie ou cause efficiente et évolue suivant les informations de son environnement, cause formelle, afin de conserver son existence, cause finale.

Références:

- 1) - **Henri Atlan**, L'organisation biologique et la théorie de l'information, Ed Hermann, 1972, p. 282
- 2) - **Ilya Prigogine et Isabelle Stengers**. – La nouvelle alliance. – Gallimard 1979.
Ilya Prigogine et Isabelle Stengers. - Entre le Temps et l'Eternité. - Fayard 1988.
Ilya Prigogine. – La fin des certitudes. – Ed. Odile Jacob 1996.
- 3) - **Fritz A. Popp** - Neue Horizonte in der Medizin. - Haug Verlag, Heidelberg 1987,
- trad. fr. Biologie de la Lumière, Résurgence, Ed. Marco Pietteur 1989.
- 4) - **Yuri N. Ivanov** – [Rhythmodynamics](#), - 2007.
- 5) - **Yuri N. Ivanov** – Rhythmodynamics, - Chapter 3. [Fundamentals of Self-organization](#)
- 6) - **Oliveira § Melo**, nature.com [Huygens synchronization of two clocks](#) , 2015.
- 7) – **Paul Meier** – Les trois visages de la vie. – Resurgence, Ed. Marco Pietteur 1996.
- 8) - **Paul Meier** – GSJournal - [Retour au Bon Sens](#), - 2017.