

Baya, le 15/09/2006

Attracteurs et champs morphiques

Marc Halévy

Discussion sur la notion d'entropie

Classiquement, on présente l'entropie comme la tendance naturelle au désordre maximal. Cette définition en usage courant se fonde sur une approche superficielle de la notion d'ordre et, donc, de désordre. L'exemple classiquement donné des deux vases communicants séparés par une vanne, avec, d'un côté de l'eau et de l'autre de l'encre, est fallacieux. Il en est dit que la situation initiale (eau et encre séparées et vanne fermée) est une situation d'ordre (chacun est bien "rangé" de son côté) et que la mixtion totale finale de l'eau et de l'encre, après ouverture de la vanne et "un certain temps", est une situation de désordre maximal, donc la situation d'équilibre entropique.

En fait, le processus est plus complexe. La situation initiale est parfaitement caractérisée par la donnée de deux valeurs : 0 et 1 (0 symbolisant l'absence d'encre à gauche et 1 symbolisant le plein d'encre pure à droite). La situation finale, quant à elle, est également parfaitement caractérisée par la donnée de deux valeurs : $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{2}$ ($\frac{1}{2}$ symbolisant le parfait mélange 50/50 d'eau et d'encre tant à droite qu'à gauche).

On dit souvent (depuis les théories de Shannon et autres) que l'entropie est la mesure de la quantité d'information nécessaire pour caractériser l'état du système. Plus un système est ordonné, structuré, organisé, plus il faut donner d'informations pour décrire ses multiples formes et caractéristiques. A l'inverse, plus un système est déstructuré, uniformisé et homogénéisé, plus sa description pourra être légère.

Si tel est le cas, on comprend trivialement que les deux descriptions, initiale et finale, de notre système eau/encre requièrent la même quantité d'information (deux nombres chacun) et auraient donc le même niveau d'entropie.

Le paradoxe naît en fait de confusions sur les notions d'ordre et de désordre. En fait, l'uniformité entropique est autant une forme d'ordre que la multiplicité stabilisée. Une métaphore aidera à comprendre la problématique. Considérons les ondes acoustiques. Le silence - ou aphonie - est une absence de vibration sonore. Face à ce silence, deux types d'architecture sonore sont possibles : la cacophonie du bruit et l'euphonie de la musique. La triade est donc posée : bruit, musique et silence. On comprend intuitivement que le bruit est du côté du désordre et que le silence et la musique sont du côté de l'ordre.

Cet ordre relève de l'uniformité radicale pour le silence et, pour la musique, d'une architecture organisée et structurée, construite dans l'espace (harmonie) et dans le temps (mélodie).

On comprend aussi qu'il faudra infiniment plus d'informations (en fait l'enregistrement intégral et détaillé : il faudra passer par une description en "extension" très consommatrice de bits) pour reproduire exactement le bruit, qu'il n'en faudra pour reproduire parfaitement le silence (là, l'information nécessaire est minimale et égale à zéro) et la musique (quelques pages de partitions écrites dans un langage adéquat seront suffisantes : ce sera une description en "compréhension" peu consommatrice de bits).

Cette métaphore permet de comprendre qu'entre le bruit (désordre maximum et entropie minimale) et le silence (ordre maximal et entropie maximale), il existe une troisième voie :

celle de la musique (ordre optimal et entropie optimale). Cette troisième voie est, en quelque sorte, un compromis qui relève de la notion mathématique d'extremum lié.

Conformément au principe de Carnot-Clausius, la seule solution définitive et éternelle au désordre du bruit est l'ordre uniforme, entropique du silence. Mais cette solution demande un temps quasi infini pour se mettre en place puisque toutes les ondes sonores émises dans l'espace doivent s'atténuer totalement dans la durée : l'ordre visé est parfait mais ne pourra être atteint que dans très longtemps.

L'autre solution est plus complexe mais plus expédiente : le désordre du bruit peut être résorbé par une mise en ordre, certes partiel et imparfait, mais dans un laps de temps beaucoup plus court. Il y a compromis entre extrémalité dans l'espace et extrémalité dans le temps. Plus généralement, cette recherche d'un compromis optimal engendre des formes architecturées qui s'auto-organisent afin de dissiper la perturbation (le bruit, en l'occurrence). Dans notre exemple, cette solution est la musique. Ou plutôt, les diverses possibilités de musique qui, chacune, développeront et déclineront des options architectoniques particulières que les multiples écoles et styles des musiques classiques et populaires démontrent à souhait. Certaines de ces architectures perdureront dans les mémoires et constitueront des chefs-d'œuvre dont s'inspireront les œuvres à venir. D'autres, les plus nombreuses, disparaîtront bien vite par application d'un principe de sélection de type darwinien.

Ainsi, parmi toutes les solutions autopoïétiques qui pourront être créées, certaines se révéleront plus riches en optimalité et constitueront, peu à peu, des architectures de référence à l'origine du développement et de la déclinaison de leur "thème" dans un phylum évolutif.

On constate donc que le principe d'entropie doit être revisité en précisant cinq aspects essentiels.

Le premier affirme que tout système évolue du désordre (le bruit) vers l'ordre.

Le deuxième affirme qu'il existe deux familles d'ordre : l'ordre uniforme (le silence) et l'ordre complexe (la musique), qui toutes deux tentent d'extrémiser l'entropie selon un principe de Carnot-Clausius généralisé.

Le troisième affirme que ces deux familles sont coexistantes dans chaque système qui est donc constamment travaillé par une "pression" entropique (tendance à l'uniformité similaire au thanatos freudien ou au yin chinois) et une "pression" négumentropique (tendance à la complexité similaire au éros freudien ou au yang chinois).

Le quatrième affirme que l'évolution vers de l'ordre complexe capture de l'énergie et de l'entropie, et qu'elle ne peut donc s'accomplir que dans un milieu ouvert. Symétriquement, l'évolution vers de l'ordre uniforme libère de l'énergie et de l'entropie.

Le cinquième affirme que l'ordre complexe est éphémère puisqu'il est un compromis instable du fait qu'il n'est que partiellement et "approximativement" optimal.

Principe d'optimalité

Toute évolution d'un système est une trajectoire dans l'espace des phases à la recherche d'une optimalité. Cette approche est donc comparable à une approche de "moindre action" de type "Hamilton" ou "Maupertuis" en mécanique classique ou à une approche "chréode" ou géodésique en relativité générale.

Cette trajectoire se développe donc selon un principe d'optimalité globale du système par rapport à l' "écosystème" qui le porte et avec lequel il échange constamment de l'énergie et de l'entropie.

Depuis sa "naissance", le système considéré a échangé de l'énergie qu'il a métabolisée tout au long de son existence. Parallèlement, il a échangé aussi de la néguentropie qu'il a traduit en complexification de forme (morphogénèse).

La somme de tous les échanges énergétiques au travers de toute sa surface (variable au cours du temps), que le système a métabolisés depuis sa naissance jusqu'au moment t est appelé le bilan énergétique ou métabolique E du système au temps t.

Autrement dit, le bilan métabolique actuel (E) d'un système est l'intégrale, jusqu'à l'instant présent, de toutes les énergies contenues dans le système depuis son origine, au travers de ses états successifs ; c'est donc la somme de l'énergie interne initiale et de l'intégrale sur le temps de tous les flux d'énergie qui traversent la surface du système.

Symétriquement, la somme de tous les échanges entropiques au travers de toute la surface (variable au cours du temps) que le système a transformés en "formes" depuis sa naissance jusqu'au moment t est appelé le bilan négentropique ou morphogénétique N du système au temps t.

Autrement dit, le bilan morphogénétique actuel (N) d'un système est l'intégrale, jusqu'à l'instant présent, de toutes les néguentropies contenues dans le système depuis son origine, au travers de ses états successifs ; c'est donc la somme de la négentropie interne initiale et de l'intégrale sur le temps de tous les flux de négentropie qui traversent la surface du système.

Les notions de bilan métabolique (énergie) et morphogénétique (négentropie) sont fondamentales.

Ces deux bilans ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Bien au contraire, ils doivent satisfaire ensemble un critère d'optimalité liée. Ils doivent toujours être entre eux dans un rapport "harmonieux", c'est-à-dire qu'ensemble, ils doivent satisfaire une condition d'extremum lié qui est la condition *sine qua non* de l'existence même d'un système repérable. Tout le nœud des sciences de la complexité est de faire l'hypothèse pertinente et adéquate quant à cette condition d'optimalité entre E et N. Dans la suite, nous postulons, fidèlement au principe du rasoir d'Occam, la condition d'optimalité la plus simple possible.

La condition d'optimalité la plus simple est l'extrémisation du rapport entre E et N.

$$\delta(E/N) = 0^1$$

On comprend vite que cette optimisation du bilan global (rapport entre E et N) induira des équations intégrales qui relèveront bien d'une logique hamiltonnienne (principe de moindre action, géodésiques, chréodes, etc ...) déjà suggérée.

Cette logique d'optimisation conduit à différents types de solutions dont une grande famille est celle des systèmes complexes.

Dynamique des systèmes et morphogénèse

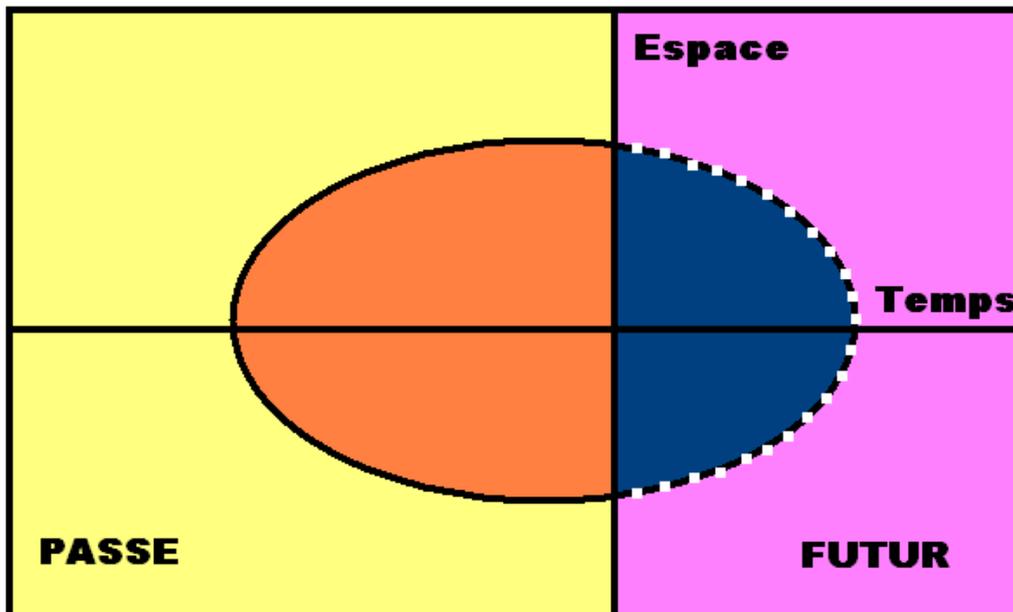
L'évolution dynamique d'un système complexe consiste en l'élaboration progressive d'une forme répondant au critère d'optimalité du rapport entre son bilan métabolique (la grosseur cumulée de son "volume") et son bilan morphogénétique (l'aspérité cumulée de sa "surface") dans l'espace-temps, sur l'ensemble de son étendue et de son histoire.

La figure ci-dessous montre un être spatio-temporel ellipsoïdal en train de se construire.

¹ Cfr. Marc Halévy in "Introduction aux sciences de la complexité" - Presses Universitaires de Namur - 2006. Les développements mathématiques de cette équation fonctionnelle sortent du cadre restreint du présent article.

Sa "finalité" est d'arriver à accomplir totalement la forme "ellipsoïdale" qui, étant donné le cumul de ses formes passées, est la forme globale idéale pour lui. Il cherche donc à accomplir, à "combler" la part de sa forme idéale en pointillé sur le schéma.

Cette forme idéale globale devient son attracteur. Celui-ci peut être interprété comme un champ morphogénétique (cfr. Ruppert Sheldrake) qui "attire" la forme en construction vers sa forme globale idéale optimale.



Plus la forme géométrique construite au cours de l'histoire du système est simple, plus l'attracteur est simple et moins il y a de degré de liberté dans le processus d'optimisation du rapport métabolique/morphogénétique (ou si l'on veut de son rapport "volume"/"surface").

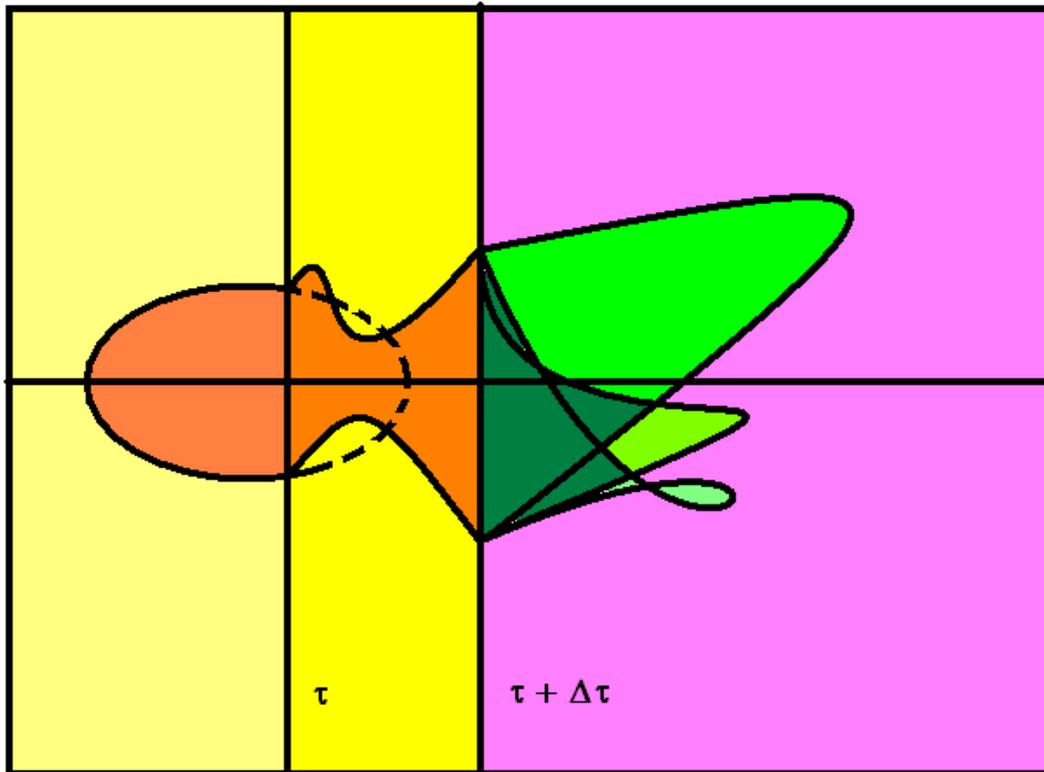
Mais la formation du système n'est jamais endogène. Tout système est ouvert et ne croît qu'au travers de ses échanges d'énergie et de néguentropie avec le milieu qui l'entoure et qui "l'approvisionne" au gré des champs de force et des flux de matières qui le traversent. Il y a donc, à chaque instant, une dialectique entre les potentialités internes du systèmes (sa forme globale idéale symbolisée par ses attracteurs ou ses champs morphiques) et les opportunités externes (les champs de forces ou flux de matière et d'information qu'il rencontre).

Ces opportunités indispensables à sa croissance ne seront pas forcément conformes à la forme idéale du moment, et induiront, de ce fait, des perturbations plus ou moins profondes dans le schéma téléologique du système.

Si ces perturbations sont trop fortes, elles risquent de détruire la consistance du système et de le faire mourir. Mais si elles sont "encaissables", elles vont faire sortir le système de sa trajectoire "simple" (dans l'espace des états ou des phases) en la complexifiant, en induisant

des formes de moins en moins élémentaires, en forçant le système à inventer de nouvelles formes globales idéales correspondant à des optimalités de plus en plus sophistiquées, de moins en moins linéaires, de moins en moins univoques. On peut alors parler d'un véritable processus morphogénétique complexe et dialectique.

La figure ci-dessous tente d'illustrer le propos :



Sur cette figure, on voit qu'au temps τ , le système, par son interaction avec son milieu, a dû sortir de son schéma ellipsoïdal "simple" et a été morphiquement perturbé par ses échanges avec le milieu ce qui a eu pour conséquence d'induire une nouvelle "logique" morphique entre les instants τ et $\tau + \Delta\tau$.

Cette nouvelle logique induite introduit de nouvelles possibilités plus riches d'évolution vers l'accomplissement de nouvelles formes globales optimales plus sophistiquées. La figure montre ici trois scénarii possibles après l'instant $\tau + \Delta\tau$.

Ainsi les perturbations liées aux échanges à l'instant τ , on induit un enrichissement morphique qui a multiplié le nombre des attracteurs (donc des champs morphogénétiques) par 3 dans notre petit schéma. En effet, la figure symbolise qu'au moment τ , le système possédait un seul attracteur (le forme idéale simple ellipsoïdale) mais qu'il a été fortement chamboulé du fait des interactions avec le milieu. Celui-ci a induit une bifurcation vers trois nouveaux attracteurs plus complexes.

Ces petits exemples sont à la fois fort simples et fort schématiques. Dans la réalité, même les formes les plus "élémentaires" de la nature sont infiniment plus complexes que l'ellipsoïde simple considéré ici. De plus, l'interaction avec le milieu étant permanente, le "réajustement morphique" l'est tout autant.

Les systèmes réels complexes ont, à tout moment, un ensemble fini ou infini d'attracteurs que l'on peut représenter comme une figure géométrique dans l'espace des phases : des nuages de points (systèmes mécaniques), des courbes ouvertes ou fermées (systèmes cycliques ou cybernétiques, et attracteurs de Lorenz), voire des objets fractals (systèmes organiques ou chaotiques, et attracteurs étranges).

Regard en creux

Tout se passe comme si un système complexe, à tout moment, "connaissait" ou, plutôt, "ressentait" la part manquante de ses nombreuses formes idéales complètes potentielles, formes qui évoluent et s'enrichissent ou s'appauvrissent à tout moment en fonction des échanges avec le milieu.

L'ensemble de ces parts manquantes agit comme autant de "creux" à combler et constitue l'attracteur du système à ce moment-là.

Ce comblement peut être considéré comme la finalité du système et son processus comme l'accomplissement du système.

Pour reprendre l'analogie musicale, la partition déjà écrite "appelle" un ensemble de suites possibles tant dans la continuité thématique que dans la rupture de tonalité, de modulation, de rythme, de mouvement, de leitmotiv, etc ...

Plus les mélodies et harmonies du passé (déjà écrites) sont riches, plus est grand le nombre des "suites" possibles.

Quoi qu'il en soit, la symphonie inachevée ne peut rester en l'état : elle "doit" s'accomplir d'une manière ou d'une autre. Elle "doit" continuer" sur sa lancée, mais elle "peut" s'inventer, se renouveler, se décliner, se transformer selon de nombreux scénarii potentiellement possibles.

Dynamique complexe

Supposons que l'on se place au niveau premier de complexité : la mer énergétique primordiale.

Cette mer est agitée de perpétuelles pulsations temporelles.

Ces pulsations induisent l'apparition de "bulles" énergétiques qui sont en fait, des "ventres" d'interférence d'ondes en résonance.

C'est le stade des "**émanations**". Certaines de ces émanations prennent des formes possédant des caractéristiques permettant une stabilité suffisante. Elles sont des solutions aux équations intégrales d'optimum de forme. Les autres formes émanées étant instables, disparaissent plus ou moins rapidement selon la turbulence ambiante.

Au stade de l'émanation, a-priori, toutes les formes sont possibles, mais seules celles qui ont un degré de compatibilité avec les équations intégrales d'optimum, seront observables (on remarquera que là est l'explication du foisonnement des "particules élémentaires" qui apparaissent l'espace d'un court instant aux hautes énergies, donc dans un milieu à très fortes turbulences. Plus on monte en turbulence, plus on "découvrira des "particules" nouvelles ayant une durée de vie de plus en plus courte et des caractéristiques de forme de plus en plus complexes).

Ces formes émanées stables, peu à peu, vont se rencontrer. Elles constituent alors des "**concrétions**" stabilisées ayant une autonomie suffisante. Ces concrétions satisfont encore "mieux" les équations intégrales d'optimum et constituent des structures de base à longue durée de vie.

Avec l'apparition des concrétions stables, on peut parler de stade de "création" des "briques élémentaires" du nouveau niveau de complexité, en l'occurrence les atomes.

Ces concrétions existent d'abord en densité très faible. Leur probabilité d'association est minime. Mais, leur stabilité aidant et le processus pulsatoire continuant d'en produire, la densité des "briques" va augmenter ainsi que leur probabilité d'association.

Des "**associations**" de briques vont alors apparaître qui satisferont toujours "mieux" les équations intégrales d'optimum à des échelles de moins en moins microscopiques : elles constituent en quelque sorte des structures proliférantes d'optimisation.

Ces associations prendront des formes de plus en plus variées et complexes, et donneront naissance à des complexes macroscopiques comme les fluides visqueux, les cristaux, les magmas macromoléculaires, etc ...

Ce stade est celui de la "formation" des structures autopoïétiques du niveau considéré. Elles prolifèrent, donc, et agglutinent progressivement les briques atomiques alentour dans des complexes de plus en plus étendus (la source qui devient torrent, qui devient rivière, qui devient fleuve, qui devient océan).

Enfin, ces complexes proliférants entre en "**interaction**" entre eux selon des modes physico-chimiques très variés et souvent très complexes ce qui forme et consolide progressivement un nouveau niveau de complexité. Dans notre cas, on est ainsi passé du niveau "énergie" au niveau "matière". Mais on pourrait retracer le même processus pour passer de la matière à la vie et repérer les stades d'émanation organique, de concrétion cellulaire, d'association en tissus, organes et organismes et d'interaction socio-écologique.

Conclusion : le fil rouge

Au cœur de tout ce processus, il faut bien observer la logique de prolifération qui y est à l'œuvre et qui fonde la dynamique du complexe.

En fait, au départ de solutions microscopiques, locales et approximatives des équations intégrales d'optimum, se met en place un processus d'agglomération/consolidation qui constitue le fondement de cette logique de prolifération et qui permet d'étendre - en surface et en profondeur - des solutions de plus en plus fines - du fait, précisément, des effets de complexité - aux équations intégrales d'optimum.

L'évolution complexe - la complexification cosmique - est en fait une logique de résolution progressive des équations intégrales : chaque pas de complexité permet une progression asymptotique vers la solution parfaite (définitivement inaccessible puisque nécessitant une infinité de variables d'ajustement).

Par analogie, on pourrait dire que chaque pas de complexité permet d'aborder le terme d'ordre supérieur du développement en série des équations intégrales. Le nombre des termes de ce développement étant infini, la solution parfaite est donc définitivement hors d'atteinte et le processus de complexification cosmique ne peut avoir de fin.

Il faut surtout comprendre que le moteur intime de tout ce processus de complexification progressive, est la pulsation temporelle quantique qui, à chaque battement, induit des ondes qui ébranlent les équilibres périphériques précaires et les "forcent" à progresser pour se restabiliser en conformité toujours meilleure avec les équations intégrales.

Cette évolution induit une progression vers des solutions toujours plus sophistiquées à l'équation intégrale, en "saturant", l'un après l'autre, les termes successifs du développement en série de l'équation intégrale $\delta \ln(E/N) = 0$.

Plus on avance dans la suite des termes de cette série, plus les non linéarités et les couplages augmentent.

Cela explique pourquoi l'histoire cosmique passe progressivement de structures simples, mécanistes et déterministes vers des structures complexes, organiques et non-déterministes.

*

* *