

Le temps complexe

Frédéric Malaval

jeudi 2 novembre 2006

Les problématiques soulevées par la prise en compte de la complexité comme composante essentielle de l'approche écosystémique oblige à reconsidérer la nature du temps. En complément aux conceptions qui dominent dans la philosophie occidentale, ce texte introduit la notion de temps complexe consubstantiel à la matière.

Cette conception du temps permet de surmonter le paradoxe créé par les conséquences du Second principe de la thermodynamique – la croissance irréversible de l'entropie, donc du désordre- et le constat de la complexification croissante des structures vivantes au cours de l'évolution – organismes, écosystèmes, etc.-.

Le modèle d'évolution qui en est issu impose alors l'idée que plus la complexité d'un système augmente plus il se rapproche du maximum de son potentiel de complexification. Une fois ce stade atteint, cette complexification, conçue comme une réponse à la croissance irréversible de l'entropie, n'est plus possible. Le système, assimilé à une structure dissipative, disparaît alors.

C'est dans ce contexte que l'innovation en tant que facteur de complexification révèle sa nature paradoxale dans la mesure où elle permet au système de réagir aux contraintes externes ou internes menaçant sa pérennité, tout en le rapprochant de ses limites écosystémiques.

Introduction

La crise de l'environnement consécutive au formidable développement démographique et économique pendant la deuxième moitié du XXème siècle a de multiples manifestations. La conséquence de cette crise est la déstabilisation des écosystèmes naturels et, par rétroaction, des écosystèmes artificiels dans lesquels nous vivons. Aussi, très vite s'est imposée la nécessité de disposer de modèles pour rendre ces phénomènes intelligibles. Des écologues comme Eugène P. Odum ou Paul Duvigneaud se sont tournés vers les travaux des thermodynamiciens pour étayer leurs vues. L'entropie est alors devenue un des concepts clés du discours écologique que ce soit dans ses aspects scientifiques ou politiques. Dans ce cadre, la crise de l'environnement est alors conçue comme une crise de la gestion de l'entropie produite par nos écosystèmes artificiels. Celle-ci est due à la complexification de nos sociétés, -le développement-, consécutive à l'utilisation massive d'énergies non-renouvelables. Le recours à l'entropie est donc déterminant pour rendre intelligible la crise écologique. Cela nécessite de saisir sa fonction écosystémique. Mais pas seulement.

La crise de l'environnement oblige aussi à complexifier nos écosystèmes artificiels. Un exemple est fourni par l'évolution du traitement des déchets en trois décennies. Hier rejetés dans la nature ou mis au fond du jardin, puis en décharge, ils font l'objet maintenant de traitements raffinés trahissant une complexification croissante de leurs processus de gestion. Le tri sélectif des ordures ménagères en est la manifestation la plus sensible. Cette exigence de complexification suscite de nombreuses innovations. Mais celles-ci rencontrent aussi des limites qui en bloquent le développement car elles affectent nos modes de vie. Investir dans la gestion des poubelles est une préoccupation récente. Identifier les principes de fonctionnement des écosystèmes est devenu la priorité pour créer des modèles pertinents sur la crise écologique et la résoudre.

Ces principes issus de l'écologie et de la thermodynamique aboutissent à un modèle où l'écosystème est assimilé à une structure dissipative. La loi de référence de celui-ci est le Second principe de la thermodynamique. Dans le prolongement de ces travaux un nouveau front de recherche a été ouvert pour déterminer les principes de fonctionnement de tout système assimilable à une structure dissipative à partir de la dialectique complexification/entropisation.

I Entropie et complexité

A L'apport de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs

Les travaux développés en thermodynamique du non équilibre ont eu comme but de résoudre les paradoxes créés par le Second principe de la thermodynamique. Qualifié aussi de principe d'entropie, celui-ci établit que la quantité d'entropie d'un système isolé, c'est-à-dire n'échangeant ni matière, ni énergie avec l'extérieur, ne peut que croître. L'énergie totale d'un système comprend une part utilisable et une part dégradée qui correspond à l'augmentation irréversible de l'entropie. Cette dernière caractérise le degré d'usure de l'énergie ainsi que le niveau de désordre d'une structure. Ainsi, l'entropie a été assimilée au désordre. Cela signifie que l'avenir d'un système correspond à une croissance du désordre. Or, cette loi physique est en contradiction avec le constat de la complexification dans toutes les manifestations de la vie.

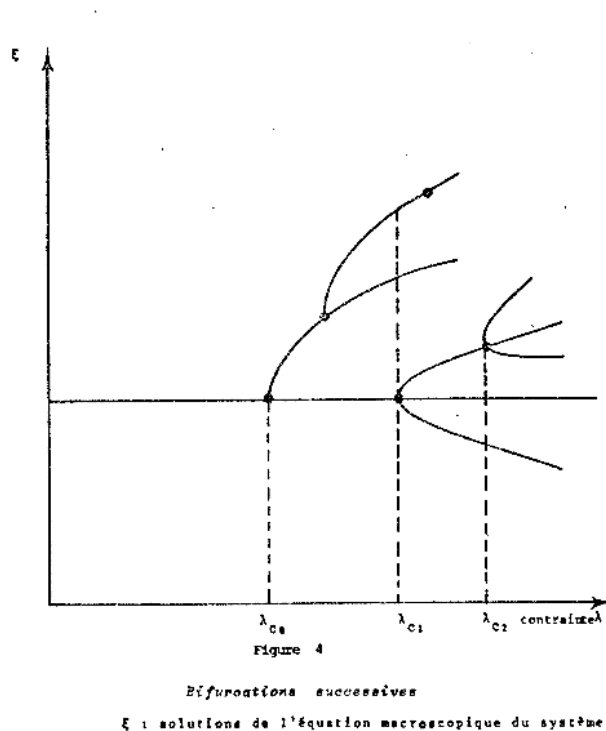
L'insuffisance de la thermodynamique d'équilibre pour rendre compte des phénomènes du vivant frappa les spécialistes. En effet, à toutes les échelles d'observation (astronomique, humaine, moléculaire ou atomique), le monde matériel ne paraît ni être dénué d'organisation, ni évoluer systématiquement dans le sens d'une désorganisation progressive, conformément au Second principe.

Une des caractéristiques du vivant est l'autoconservation. Celle-ci consiste à optimiser les antagonismes liés à l'utilisation de l'énergie. Aussi, dans une première étape, il fut admis que le Second principe ne s'appliquait qu'à des états d'équilibre thermodynamique et à des systèmes fermés. Les organismes vivants n'étant ni des systèmes fermés (mais ouverts au sens des thermodynamiciens), ni des systèmes en équilibre, n'étaient donc pas concernés par le principe d'entropie. Ceux-ci furent envisagés à travers un modèle où tout apport d'énergie extérieure (énergie solaire ou énergie résultant du catabolisme) à un organisme vivant entraîne la diminution de l'entropie et l'accroissement de l'organisation. Puis, Ilya Prigogine montra que l'irréversibilité, c'est à dire l'expression de la croissance de l'entropie dans une perspective temporelle, contribue à l'émergence de nouvelles structures, donc d'ordre. Ces structures dissipant des flux d'énergie ont été baptisées 'structures dissipatives'. L'identification de tout système vivant, comme un organisme ou un écosystème, à une structure dissipative est le pivot de l'approche écosystémique. Ces travaux ont suscité l'expression de thermodynamique du vivant (Prigogine, 1972).

Il est désormais admis que, dans certaines conditions, l'évolution de certains systèmes vers des états ordonnés stables n'est pas contraire aux lois de la thermodynamique. L'ensemble de ces réflexions s'appuie, entre autres, sur l'équation du bilan entropique distinguant l'entropie réversible, -celle rejetée à l'extérieur du système-, de celle qualifiée d'irréversible, c'est à dire s'intégrant au système à l'origine d'une déstabilisation structurante de celui-ci.

Equation du bilan entropique : $dS/dt = deS/dt + diS/dt$; $diS/dt \geq 0$

Parmi les principaux concepts issus des travaux portant sur la fonction écosystémique de l'irréversibilité, se sont imposées les notions de branche thermodynamique, d'état stationnaire, d'état marginal et de point de bifurcation. La figure suivante issue du cours de Jacques Chanu (1983) de la Faculté des sciences de Paris résume la vision de l'évolution d'une structure dissipative.



Branches thermodynamiques

C'est dans le prolongement de ce modèle et sur le fondement des principaux enseignements de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs que s'est imposée la thèse que la fluctuation thermodynamique, conçue comme une manifestation de l'entropie, participe à l'exploration de l'espace des phases des systèmes. Celui-ci correspond à l'espace multidimensionnel où le système garantit sa pérennité en optimisant la gestion des contraintes auquel il est soumis et l'utilisation des ressources dont il dispose. La pierre angulaire de cette approche est la structure dissipative.

B Structure dissipative et biosphère

Une structure dissipative est un système séparé de son milieu par une limite et dont il se distingue. Son existence est conditionnée à la dissipation de flux d'énergie, de matière et d'informations. Cette dissipation est à l'origine d'une production d'entropie conformément au Second principe et à l'équation du bilan entropique. L'entropie réversible est rejetée dans le milieu. En revanche, la part irréversible reste dans le système dont elle est une des composantes. La distinguabilité du système à l'égard du milieu est due à sa complexité qui est supérieure.

Une des caractéristiques essentielles de la complexité étant l'apparition d'émergences irréductibles aux approches réductionnistes de la science classique, les épistémologues opposent désormais un paradigme classique qui domine la philosophie naturelle et dont la science moderne est la production la plus remarquable, à un paradigme écosystémique en devenir s'élaborant à partir des enseignements de l'écologie et de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs.

C'est sous ce dernier éclairage que sont envisagés les déterminants de l'évolution des structures dissipatives. Le monde vivant, aujourd'hui comme hier, apparaît alors comme une infinité de structures dissipatives intégrées, à l'instant et dans le temps, les unes aux autres. La biosphère en est le cadre commun.

Comme Paul Duvigneaud (1995) le mentionne, l'idée de biosphère, -ensemble des êtres vivants qui peuplent notre planète-, remonte à Jean Baptiste de Lamarck (1744-1829). C'est ensuite le géologue autrichien Eduard Suess qui, en 1875, a mis en parallèle le terme de biosphère avec ceux d'hydrosphère, d'atmosphère et de lithosphère. Il étendait en fait le concept à tout ce qui constituait ou avait constitué le monde vivant, en y incluant aussi, par exemple, les gisements de charbon et les roches calcaires des récifs coralliens fossiles. Une acception plus dynamique du terme a été adoptée en 1929 par le géochimiste russe Vladimir Ivanovitch Vernadsky. Il considère la biosphère comme l'ensemble des êtres vivants et des éléments du milieu au sein duquel se déroulent les échanges d'énergie et de matière qui permettent et caractérisent leur fonctionnement. Vue sous cet angle fonctionnel qui prend en considération les interactions des êtres vivants avec les composantes physico-chimiques du milieu, la biosphère est un gigantesque système formé par l'ensemble des écosystèmes (et non pas seulement des biocénoses) du globe.

Pour Paul Duvigneaud, qui fut professeur à l'Université libre de Bruxelles à la même époque qu'Ilya Prigogine, la multiplicité des types d'êtres vivants est le résultat de l'évolution biologique qui se déroule sur notre planète. En assimilant la biosphère à une structure dissipative, cette évolution est la conséquence du flux ininterrompu d'énergie arrivant à la surface de la terre depuis des milliards d'années qui a fait naître, puis a modelé et diversifié peu à peu la biosphère, permettant l'accumulation d'une quantité d'informations sans cesse croissante transmise de génération en génération par le système des molécules d'ADN. La biosphère est le résultat d'un nombre immense de transformations, et chaque espèce actuellement présente a une très longue histoire qui remonte à l'apparition de la vie sur la Terre. Mais l'émergence de l'humanité, puis de la société industrielle a profondément modifié les rythmes et cycles naturels. Le recours à des énergies fossiles a permis d'augmenter dans des proportions énormes la quantité d'énergie disponible, mais aussi la production d'entropie. La crise écologique en est la conséquence.

C Fonctions écosystémiques de l'entropie

C-1 Effet paradoxal de l'entropie

Conformément au Second principe, la croissance de la dimension irréversible de l'entropie, c'est à dire celle qui ne peut être rejetée à l'extérieur, conduit le système vers le désordre, donc vers sa fin en tant que structure dissipant des flux. Mais, simultanément, cette entropie en tant que génératrice de fluctuations thermodynamiques participe à l'exploration de l'espace des phases, donc à l'évolution du système. I. Prigogine a résumé ce constat par l'expression 'd'ordre par la fluctuation'. L'entropie a donc une dimension paradoxale. L'ordre, c'est à dire la structuration du système, est identifié à la complexité et le désordre à l'entropie. L'évolution de toute structure se présente alors comme la résultante d'une dialectique associant l'ordre au désordre, la complexité à l'entropie.

C-2 Seuil critique d'entropie

L'idée qui s'impose alors est que lorsque un certain niveau d'entropie, que nous qualifierons de seuil critique, est atteint, le système se déstructure. La complexité tend alors subitement vers zéro alors que l'entropie est à son maximum. Pour les organismes vivants, c'est la mort, c'est à dire la réalisation des conséquences du Second principe de la thermodynamique.

Une fois que le seuil critique d'entropie interne est atteint, le système disparaît. Pourquoi alors cette complexification ? La réponse proposée est qu'elle est une réaction écosystémique à cette croissance de l'entropie interne. En effet, il paraît vraisemblable que ce seuil critique est à peu près le même pour tous les systèmes quelle que soit leur complexité, mais même si cette hypothèse est fautive, il est indubitable que la complexification permet de maintenir le niveau d'entropie au dessous du seuil critique que celui-ci soit ou non identique quels que soient les organismes. La croissance de l'entropie irréversible serait alors contrebalancée par la croissance de la complexité. Cette rétroaction complexification/entropisation se maintient jusqu'au moment où le niveau interne d'entropie est supérieur au seuil critique d'entropie. Le constat de la complexification des formes du vivant au cours du temps, mais aussi de leur disparition, soutient cette vision fondée sur la dialectique création/destruction dont la complexité est le pivot.

D La complexité

D-1 Origines de la notion de complexité

En réponse à l'idéal de simplicité qui a animé la science néoplatonicienne apparue au 16^{ème} siècle dans le sillage de l'étude du mouvement des orbites, la science contemporaine aborde désormais franchement la question de la complexité des systèmes, participant en cela à une profonde transformation des paradigmes dans lesquels elle se développe et qu'elle développe. Les réflexions et publications sur ce sujet sont innombrables allant même jusqu'à relativiser le postulat ontologique fondamental de la science qui est que le monde est connaissable car intelligible. Parmi les composantes principales du paradigme scientifique de référence, le temps y est conçu comme linéaire, infini. Cette conception est à l'origine du modèle de l'équation scientifique de la science classique fondé sur l'invariance des lois de la dynamique par rapport au renversement du temps. Mais aujourd'hui, ces vues sont complétées par d'autres perspectives.

A partir des travaux de nombreux scientifiques, le concept de complexité organisante s'est imposé à la fin des années 1970. Parmi ces précurseurs figurent W. Weaver et C. Shannon pour la théorie de la communication, A. Turing et H. von Foerster pour les théories de la computation, N. Wiener pour la cybernétique, D. Ruelle pour la théorie du chaos, I. Prigogine pour la thermodynamique des systèmes dissipatifs et d'autres, tout aussi importants. Un des enseignements principaux issus de ces travaux est que l'ordre naît du bruit (H. von Foerster) ou de la fluctuation thermodynamique (I. Prigogine), donc du désordre. Ces auteurs invitent à se pencher sur la relation ordre-désordre qui apparaît essentielle à l'existence d'écosystèmes conçus comme des structures dissipatives. Une des ruptures essentielles de ces nouvelles conceptions est de reconsidérer le désordre comme phénomène à part entière. La conclusion est alors que celui-ci est facteur de complexification.

D-2 Les catégories de la complexité

Cette profusion de travaux portés par des choix épistémologiques antagonistes est à l'origine d'une volonté de classification. Parmi celles-ci, mentionnons celle de Steven M. Manson (2001) qui distingue trois approches de la complexité:

- La complexité algorithmique regroupant la théorie de la complexité algorithmique dont Andreï Kolmogorov est une figure phare et la théorie de l'information de Claude E. Shannon. Les travaux de Gregory Chaitin les prolongent et les complètent. Mais les conclusions de ce dernier ne répondent pas aux ambitions de la science classique. De son propre aveu (Benkirane, 2002), sa théorie sur les nombres aléatoires s'est autolimitée. Elle prouve qu'elle est impraticable, qu'elle n'a pas d'application car il n'est pas possible d'en déduire le degré de complexité d'un système quel qu'il soit. Au contraire, les partisans de la complexité déterministe revendiquent l'héritage ontologique de la science classique;

- La complexité déterministe regroupe la théorie du chaos et la théorie des catastrophes. Notons que cette Ecole a de nombreux représentants en France avec, entre autres, David Ruelle et René Thom. Ces approches sont à l'origine des notions d'attracteurs mathématiques formalisés par des mathématiques déterministes, de rétroaction, de sensibilité aux conditions initiales (effet papillon), de bifurcations, de chaos déterministe, d'attracteurs étranges et de fractales. Les présupposés du paradigme classique en sont à l'origine.

- S. Manson introduit la notion d' 'aggregate complexity' qualifiée aussi de complexité d'émergence. L'idée exprimée est qu'une dynamique (synergie) de la complexité s'élabore à partir des relations entre des éléments individuels. Ces liens sont à l'origine de systèmes complexes aux comportements irréductibles à ceux de leurs constituants. A la différence des disciplines à l'origine d'une théorie de la complexité (neurologie, automatisme, cybernétique, etc.) ne s'intéressant qu'à des relations linéaires et à des quantités, cette dernière approche se focalise sur les conditions d'apparition de ces propriétés émergentes. Pour le moment, les questions sont plus nombreuses que les réponses.

D-3 Complexité d'émergence et flux d'énergie

Le constat de la complexité et la nécessité de la traiter comme une réalité phénoménologique mobilisent de plus en plus de chercheurs dans le monde. L'ensemble du monde vivant témoigne d'une extrême complexité, d'une organisation liée à des structures hiérarchisées, tous caractères absents des objets inanimés. Ainsi, considérant la complexité des êtres vivants, Ernst Mayr (1964) définit « *les systèmes complexes comme étant ceux où l'ensemble est plus grand que la somme des parties, non pas dans un sens ultime et métaphysique, mais dans le sens pragmatique important qu'étant donné les propriétés des parties et les lois de leurs interactions, il n'est pas facile d'en inférer les propriétés de l'ensemble* ». Une telle complexité existe à tous les niveaux, depuis le noyau cellulaire jusqu'à la cellule, l'organe, l'individu, l'écosystème. Seul le vivant possède des possibilités de métabolisme variées exigeant la présence d'une énergie fabriquée et parfois mise en réserve, et aussi des pouvoirs de croissance et de différenciation. De tels systèmes organisés et intégrés pouvant être à l'origine de nouvelles propriétés sont inconnus dans le monde inanimé. Une des caractéristiques de la vie est d'être capable de capter des flux d'énergie. Ceux-ci favorisent la complexification et donc l'émergence de nouvelles caractéristiques qui elles-mêmes renforcent les capacités à mobiliser de nouvelles ressources. La complexité est par conséquent la variable essentielle caractérisant un système.

D-4 Fonctions écosystémiques de la complexité

Après qu'elle ait été niée comme objet d'étude, la complexité est devenue un concept phare de la recherche contemporaine. Les principales fonctions écosystémiques attribuées à celle-ci sont :

- efficacité énergétique, notamment par l'accès à de nouvelles ressources
- adaptation évolutive, réactions aux changements du milieu
- réaction à la croissance irréversible de l'entropie

Tout organisme conçu comme une structure dissipative comporte donc un niveau d'entropie le menaçant de disparaître conformément au Second principe, mais favorisant aussi son adaptation aux contraintes du milieu. La complexité est la variable d'état caractérisant cette situation. Les phénomènes du vivant conçus à travers le modèle de la structure dissipative, que ce soit à l'échelle des organismes, des lignages, des écosystèmes ou de toute autre catégorie du monde vivant, apparaissent alors comme la résultante d'une dialectique complexité/entropie. Le niveau de cette dernière détermine les conditions d'évolutions de la structure. Le facteur qui favorise cette complexification est la croissance de cette entropie qui génère des fluctuations thermodynamiques, - des désordres-, participant à la recherche de nouvelles positions où sont optimisées contraintes et ressources. La complexification apparaît alors comme le moyen permettant au système, assimilé à une structure dissipative, tout en subissant une augmentation absolue de la quantité d'entropie irréversible, c'est à dire inexportable vers l'extérieur, de maintenir ce niveau sous le seuil critique au delà duquel les déstabilisations ne participeront plus seulement à l'exploration de l'espace des phases, mais détruiront le système. Etat marginal fatal.

A ce stade, la dialectique entropie/complexité s'organise à partir des hypothèses suivantes:

- le potentiel de complexité d'un système dissipatif détermine un niveau maximum de complexité indépassable ;
- le seuil critique d'entropie correspond au dépassement du niveau relatif d'entropie que le système peut supporter au delà duquel il disparaît conformément au Second principe. Ce seuil critique est le même quel que soit le niveau de complexité;
- la quantité absolue d'entropie qu'un système supporte en dessous du seuil critique dépend de son niveau de complexité. Donc, plus un système est de complexité élevée plus la quantité d'entropie est importante tout en restant inférieure au seuil critique. Or, conformément au Second principe la part irréversible de l'entropie est croissante au cours du temps chronologique ;
- la complexification permet donc de maintenir la quantité d'entropie au dessous du niveau critique relatif tout en supportant une croissance absolue de celle-ci.

Ces points sont développés à la fin de cet article en proposant la notion de temps complexe. Il y a, en effet, une relation intime entre temps et complexité.

D-5 Temps et complexité

L'approche des systèmes complexes assimilés à des structures dissipatives et dont le niveau de complexité est fonction du nombre de constituants et de leurs relations, se fonde sur le postulat d'une dialectique ordre-désordre ; entropie-complexité ; création-destruction dans une perspective temporelle. Le temps prend alors une autre dimension que celle qui lui est généralement dévolue dans la science classique.

Dans cette dernière, le temps n'intervient pas dans l'évolution des systèmes, mais sert seulement de référentiel à leur position dans l'espace. Or, cette conclusion bute sur de nombreux paradoxes dès que la prise en compte de la complexité devient le pivot de l'approche des phénomènes. A un temps chronologique de référence, il est alors nécessaire d'adjoindre un temps complexe plus apte à formaliser les différentes expressions de la complexité. Le temps y devient alors une ressource. Dans les théories à l'origine des principes de fonctionnement des écosystèmes, le temps perd alors son statut de référentiel pour acquérir celui de ressource (Ph. Esquissaud, J. Vigneron, 1990).

II Du temps chronologique au temps consubstantiel

A Temps chronologique et réversibilité

Pour chacun d'entre nous, le temps est assimilé au temps déterminé par nos montres et nos horloges. Aristote définissait le temps comme la potentialité d'un corps matériel à se mouvoir de l'infini du passé vers l'infini du futur. Le temps est alors assimilable au nombre du mouvement (Costa de Beauregard, 1995). Dans le prolongement de cette conception, celui-ci fait l'objet d'une normalisation. L'unité de temps a été définie en 1968 par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) à partir de la période d'une radiation issue du spectre du Cesium 133. Mais alors que d'un point de vue pratique, cette conception s'impose à l'ensemble de la planète et paraît ne plus faire l'objet d'interrogations, les philosophes, les scientifiques, les linguistes et d'autres s'associent à la réflexion de Saint Augustin avouant que « si on ne me le demande pas, je crois savoir ce qu'est le temps, mais si on me le demande, je ne sais plus ». Ainsi, pour de nombreux linguistes le temps n'est pas une donnée physique immédiate, mais une construction intellectuelle. Dans les Andes, les Aymaras, Amérindiens qui vivent sur les hauts plateaux andins ont une conception du temps inverse de celle de tous les autres peuples. Pour eux, le futur est derrière eux et le passé devant. Les arguments linguistiques sont corroborés par la gestuelle qui soutient le discours, notamment celle des Anciens, qui ne parlent pas d'autres langues que l'aymara. Leurs mains sont dirigées vers l'arrière, au-dessus de leurs épaules, lorsqu'ils parlent de l'avenir et vers l'avant quand ils abordent le passé (Loïc Mangin, 2006).

Aujourd'hui comme hier, la réflexion sur le temps a mobilisé de nombreux auteurs. A l'opposé de Pascal qui estimait que le temps est de ces choses qu'il est impossible et même inutile de définir (De l'esprit géométrique), une multitude de philosophes : Aristote, Plotin, Saint Augustin, Maïmonide, Leibniz, Kant, Hegel, Bergson, Husserl, Russel, etc. a cherché à l'appréhender. Les choix épistémologiques qui en sont issus structurent les paradigmes qui animent nos manières de faire et de penser. Envisager d'autres conceptions est cependant rendu nécessaire par le constat que d'autres civilisations que la nôtre le conçoivent différemment et que surtout, la conception du temps dans nos sociétés crée des paradoxes pour le moment insurmontables.

Actuellement, ni les scientifiques, ni les philosophes ne sont en mesure de donner une définition du temps. Il est toutefois possible d'en recenser les principales approches dont la pierre angulaire est celle de temps absolu qu'Issac Newton a formalisé et utilisé car c'est le seul temps mesurable.

C'est parce que la physique moderne a établi que le préalable à son art est la mesure, que le temps a été conceptualisé comme une grandeur physique mesurable. Malgré la prégnance de ce concept dominant, d'autres approches du temps ont émergé depuis le XVII^{ème} siècle.

Celles-ci distinguent en premier lieu le temps objectif du temps subjectif. Ce dernier est celui de la sensation. C'est le temps psychologique ; celui de la conscience. Il ne se mesure pas et par conséquent n'est pas éligible à la science moderne. C'est le temps de l'ennui ou de la passion. Le temps objectif, en revanche, est une mesure abstraite, conventionnelle, utilisée pour faciliter l'expression des lois de la nature ou des modèles.

Situer cette problématique dans une perspective historique revient alors à retracer l'histoire de la conception du temps dans la civilisation occidentale. Ainsi, les philosophes soulignent que celle-ci s'inscrit dans l'alternative associant Parménide, le philosophe de l'Être et donc de l'immobilité, à Héraclite, le philosophe du changement. Sous cet angle, une histoire de la conceptualisation du temps est abordée en opposant les scientifiques des deux camps: ceux pour qui le temps fournit un cadre pour rendre compte de la réversibilité et ceux, au contraire, postulant à l'irréversibilité fondamentale de l'évolution de la matière sous toutes ces manifestations. Les premiers sont majoritaires et imposent encore largement le postulat de la réversibilité ; les seconds peu nombreux sont représentés par Ludwig Boltzmann, Willard Gibbs, Ernst Zermelo, etc. et plus récemment Ilya Prigogine.

B Irréversibilité et temps consubstantiel

B-1 Le temps absolu

Ces auteurs obligent à envisager une nouvelle conception du temps. Elle va s'appuyer, entre autres, sur l'œuvre de Maïmonide pour qui le temps est indissociable de la matière. C'est au cours du XII^{ème} siècle que le philosophe juif Rambam Maïmonide (1135-1204) de culture grecquo-arabe affirma que le temps n'était rien d'autre qu'une manifestation de la matière (Le Guide des égarés). Lorsqu'il n'existe pas de matière, il n'y a pas de temps. En cela, ce philosophe a réagi à l'émergence du temps occidental qui est conçu en dehors de la matière pour être une réalité physique distincte d'autres entités. Cette conclusion est issue de l'époque des cathédrales, période faste de l'histoire de l'Europe où naissent les paradigmes structurant l'espace qualifié de civilisation occidentale. C'est au XIII^{ème} siècle que Pierre Duhem (1861-1916) situe l'acte de naissance de la science moderne avec l'acceptation d'un univers infini, d'un espace géométrisé, de la possibilité du vide, etc. mais surtout d'un temps absolu (Beaujouan, 1983). C'est cette conception du temps que Newton consacre dans son œuvre devenue la référence de la science moderne occidentale. Il y a donc un avant et un après Newton et son temps absolu. Au XVII^{ème} siècle, celui-ci l'a interprété comme une échelle qu'il fallait utiliser pour mesurer la durée de toutes les choses. Dans cet esprit, les lois qui gouvernent la nature peuvent être décrites par des « équations de mouvements » permettant de prédire l'action des différents atomes de l'univers les uns sur les autres. Complétées par des conditions aux limites imposées à leurs solutions, ces équations prédisent les trajectoires de tous les éléments constitutifs de l'Univers. Le temps objectif absolu de Newton a été celui de la physique moderne jusqu'à l'émergence de la physique quantique, de la relativité générale et de la thermodynamique.

B-2 La fin du temps absolu ?

Alors que la conception du temps absolu dans le cadre newtonien a comme préalable des lois de la nature déterministes, les protagonistes de la physique quantique ont dû postuler le contraire pour soutenir les modèles issus de l'étude de l'infiniment petit. Le temps y prend une autre dimension. Il est alors défini par assimilation à un ensemble de propriétés mesurables simultanément. Le temps du mouvement n'est pas le temps de l'espace car l'un et l'autre sont inaccessibles simultanément selon le principe d'incertitude de Heisenberg. Cette approche est une première brèche dans le temps absolu de Newton grâce auquel toutes les propriétés de la matière sont appréhendables et mesurables simultanément.

L'étude de l'infiniment grand est à l'origine de la relativité générale. A ce temps absolu, Alfred Einstein a substitué un temps relatif. Pour tous les auteurs de la mécanique classique ou quantique, le temps est le cadre dans lequel se déroule des phénomènes. Il n'y participe pas. Il est en quelque sorte extérieur à la matière. Einstein a introduit un premier biais dans cette conception en identifiant l'espace au temps dans le cadre de la Relativité générale. Celle-ci marque la fin de la séparation entre le temps et l'espace. Ainsi, dans la physique classique d'essence newtonienne, un objet P se déplace dans un espace euclidien, sa position étant caractérisée par référence à une échelle de temps absolu. Dans le cadre de la relativité générale, l'espace cesse d'être euclidien pour devenir courbe. Le temps n'y est plus absolu, mais l'objet se déplace toutefois par référence à un espace-temps.

L'étude des machines à feu, puis des phénomènes du vivant, a en revanche créé des interrogations que la thèse exposée dans cet article tente de résoudre. La critique portée aux équations de la dynamique relevant de la mécanique classique, de la mécanique quantique ou de la mécanique relativiste est qu'une des propriétés fondamentales des systèmes dynamiques est l'invariance des lois de fonctionnement de tels systèmes par rapport au temps. La majorité des équations de la physique sont intrinsèquement symétriques entre passé et avenir. La nature mathématique de leurs solutions est insensible au temps : $t' = -t$. Les phénomènes y sont donc conçus comme réversibles. Dans l'approche thermodynamique, le temps est une mesure du processus continu et irréversible de l'accroissement de l'entropie, donc du désordre. Ceci a été formalisé par le Second principe de la thermodynamique. Cette branche de la physique a imposé l'idée que, contrairement à l'espace qui est isotropique, le temps est anisotropique. Anisotropie signifie alors que la relation de succession est asymétrique. Cette distinction a abouti à la distinction entre les processus réversibles et les processus irréversibles.

Que ce soit en mécanique ou en thermodynamique, le temps est une chose en soi. Dans la relativité générale, il est associé à l'espace. Il s'agit là d'une rupture niant au temps sa singularité par une consubstantialisation à une autre grandeur physique : l'espace non euclidien dans le cas présent. Mais bien que dans la théorie de la relativité générale, le temps et l'espace perdent leurs statuts ontologiques respectifs, c'est à dire dotés ou reconnus chacun comme des réalités indépendantes de la matière, ils conservent toutefois le statut de référentiel destiné à exprimer les lois de la nature, donc extérieurs à cette nature.

C'est à ce niveau qu'il est nécessaire de distinguer :

- un temps référentiel extérieur à la matière dont la racine est le temps absolu de Newton et ses avatars de la physique :
 - pour les phénomènes réversibles, le temps de la physique quantique et l'espace-temps de la relativité ;
 - pour les phénomènes irréversibles, le temps de la thermodynamique;
- un temps consubstantiel à la matière.

Nous disposons donc de deux grilles d'analyse de l'histoire de la conceptualisation du temps. La première a comme pivot le temps objectif absolu et ses avatars. Généralement, les travaux sur ce sujet soulignent les conditions de son émergence et les circonstances de sa relativisation. Ce sont le(s) temps de notre époque. La seconde s'intéresse à un temps interne à la matière comme Maïmonide l'avait envisagé. C'est dans le prolongement de cette posture que la notion de temps complexe consubstantiel à la matière est proposée en complément au temps objectif et absolu désormais qualifié de temps chronologique par opposition au temps consubstantiel. Les travaux et réflexions des paléontologues permettent de soutenir cette vision.

III Complexité et évolution

C'est dans le domaine de l'évolution des espèces vivantes que la relation entre temps et matière a le plus de pertinence. Le premier constat porte sur la complexification des organismes au cours du temps. Ce phénomène ayant été identifié au Progrès, véritable pierre angulaire de la Modernité des philosophes, est vu alors comme la finalité de toutes les structures vivantes, des organismes jusqu'aux civilisations humaines. Mais cette conception non pas seulement anthropocentrée, mais occidentalocentrée, suscita de nombreuses oppositions. Parmi celles-ci, le fait que des formes simples, donc ne subissant aucun progrès, coexistent avec des formes dont la complexification est rapide. En outre, la problématique de la disparition des espèces et du raccourcissement de leur durée d'existence soutient l'idée d'un temps complexe consubstantiel à la matière et dont le tempo est fonction du niveau de complexité du système dont il est une des composantes. Aussi, les notions développées dans la suite de cet article: complexification, potentiel de complexification, temps complexe et tempo d'existence s'appuient sur les travaux des paléontologues et des controverses qu'ils suscitent. Parmi les protagonistes au débat, les figures de Lamarck et de Darwin dominent.

A La complexification du vivant

A-1 De Lamarck à Huxley... en passant par Darwin

Pour Lamarck la continuité du règne animal, la diversité et la filiation parentale des grandes unités zoologiques comme celle des espèces, manifestent que l'évolution s'est déroulée en allant du simple, -les Infusoires-, au complexe, -les Mammifères-. Dès 1802, il écrit : « Cette gradation, soutenue dans la simplification ou dans la complication des êtres vivants, est un fait incontestable » (La Philosophie zoologique). Dans un milieu qui se modifie, les besoins de l'animal ne sont plus les mêmes. « Or, si les nouveaux besoins deviennent constants ou très durables, les animaux prennent de nouvelles habitudes, qui sont aussi durables que les besoins qui les ont fait naître » (ibid.). Pour Lamarck, l'agent principal de l'évolution consisterait en 'forces internes' qui l'amènerait à engendrer une descendance légèrement différente de lui-même, ce qui provoquerait un changement de la lignée de manière notable.

Cette conception d'une tendance de la vie vers la complexification croissante et le perfectionnement est au cœur de la pensée lamarckienne. Il a observé *de visu* la variation des plantes et celle des animaux, particulièrement chez les Mollusques. L'organisme réagit donc par lui-même aux influences du milieu et élabore sa réponse adaptative. Dans le lamarckisme, il est un agent actif de l'évolution, alors que dans le darwinisme, il la subit et ne peut rien sur son devenir. C'est sur ce point que l'œuvre de Darwin et de Wallace apporte une autre conception, mais le constat de la complexification n'est pas contesté.

En 1858, ces deux naturalistes anglais, Charles R. Darwin, quarante-neuf ans, et Alfred R. Wallace, trente-cinq ans, après avoir accompli de longs voyages sous les tropiques, proposent indépendamment l'un de l'autre une théorie expliquant la genèse des nouvelles espèces, tant animales que végétales, par filiation directe et continue. Les individus changent et seuls les mieux adaptés résistent fortuitement aux circonstances. La sélection naturelle est l'agent formateur des nouvelles espèces. Wallace s'étant effacé devant Darwin, ce dernier est devenu le principal protagoniste de l'évolutionnisme.

À la fin du XIXe siècle, le darwinisme reçut l'appui du « mutationnisme », théorie inventée par le botaniste Hugo de Vries (1848-1935). La vision qui s'impose est que les mutations (variations brusques, héréditaires, quelconques) sont les matériaux de l'évolution sur lesquels s'exerce la sélection naturelle. Mutation génétique et sélection naturelle y sont les moteurs de l'évolution.

Il est attribué à Thomas Henri Huxley (1825-1895) l'identification de l'évolution complexifiante à un progrès. Pour ce dernier, l'analyse des fossiles révèle au moins six grandes tendances dans l'histoire de vie. Parmi celles-ci, il y a d'abord l'accroissement de la taille des organismes, aussi bien dans les plus petites unités de la vie que sont les cellules, que dans leurs agrégats, des unicellulaires jusqu'aux métazoaires et aux communautés qu'ils forment. Ensuite, on remarque une augmentation de la complexité ou un accroissement de la division du travail entre les différentes parties des organismes, etc. Plus tard, Huxley réduira la liste pour ne retenir que les propriétés qui permettent un plus grand contrôle de l'organisme sur l'environnement et ensuite celles qui donnent une certaine indépendance à l'organisme par rapport à son environnement. Pour Huxley, ces deux critères de mesure du progrès biologique créent les conditions d'apparition d'innovations.

A-2 Le modèle évolutionniste aujourd'hui

Le modèle qui domine aujourd'hui est issu de l'observation des fossiles. Celle-ci révèle que les procaryotes sont apparus sur la Terre bien avant les eucaryotes ; le Précambrien inférieur (3,5 milliards d'années environ) renferme des procaryotes ; les premiers fossiles d'eucaryotes datent du Précambrien supérieur (1 milliard d'années). À la fin du Précambrien (600 millions d'années) s'amorce la diversification des eucaryotes.

Les études sur les fossiles soutiennent la vision contemporaine de l'évolution qui domine actuellement. La biostratigraphie démontre que les groupes zoologiques des Vertébrés n'apparaissent pas au hasard dans les couches géologiques successives, mais suivant un ordre précis et selon une complexité croissante. Elle a prouvé l'existence de formes intermédiaires entre les groupes. Elle a retracé la succession des genres ou des espèces dans le temps selon des lignées évolutives, ceci pour toutes les catégories du vivant. Mais alors que des lignées se complexifient, s'autres s'étiolent ou disparaissent.

L'ordre évolutif, c'est-à-dire l'ordre chronologique d'apparition des groupes, correspond donc à l'ordre de complexification anatomique et physiologique que les zoologistes ont établi. Sous cet éclairage, les formes simples sont plus anciennes que les complexes, sous réserve des phénomènes d'évolution régressive. A ce jour, aucune découverte ne serait venue infirmer cette règle. La découverte du fossile d'un Mammifère antérieur aux Reptiles la remettrait en question.

La complexification des formes du vivant est donc la règle de l'évolution. Toutefois, le rythme de l'évolution vers la complexité est contingent et les formes de la complexité dépendent de l'apparition aléatoire de niches écologiques.

Dans cette optique, la complexité est identifiée à l'apparition de formes de moins en moins probables avec une vitesse d'évolution, entre un ancêtre hypothétique et l'ensemble de ses descendants, qui n'est pas en proportion directe du temps chronologique.

L'évolution maintient aussi des formes dont la complexité ne semble pas progresser. Ainsi, les procaryotes existent encore aujourd'hui alors qu'il est avéré qu'ils représentent la version initiale de la vie. Ce point est à l'origine de débats à l'origine de théories nouvelles sur l'évolution.

A-3 Les controverses sur l'évolution

Alors que le constat de la complexification des espèces ou des civilisations paraît unanimement admis, de nombreuses voix s'élèvent cependant pour relativiser cette vue. Les bactéries d'aujourd'hui ne seraient pas très différentes de celles d'hier. En outre, des plantes primaires survivent au milieu de plantes plus développées, c'est à dire complexes.

Si nous nous référons à une échelle de temps chronologique, celle du temps absolu, il y a là un paradoxe car le Second principe s'applique sur la même durée quel que soit l'organisme concerné. En revanche, si nous admettons que le temps est un constituant de la matière et que celui-ci est relatif au niveau de complexité des organismes, alors ce paradoxe est levé à travers la notion de temps complexe consubstantiel.

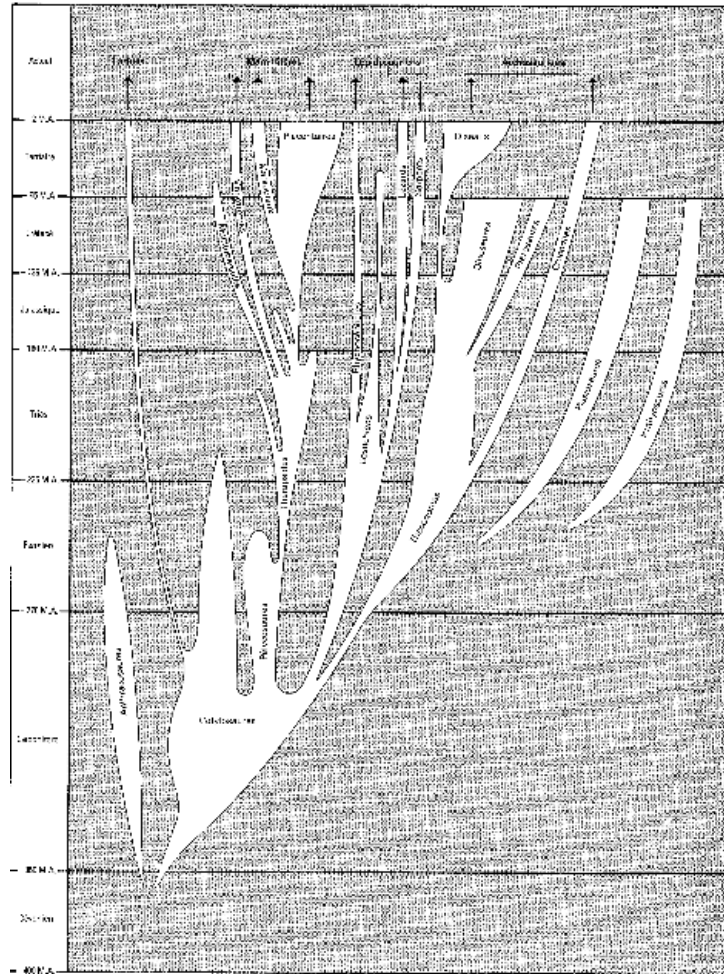
A la controverse sur les facteurs de complexification, le paléontologue Steven Gould (1977) a défendu l'idée suivante. Si l'on considère que les organismes occupent un « espace morphologique multidimensionnel » (la niche écologique des écologues) alors l'évolution consiste en bonne partie à la migration passive des lignées dans différentes régions de cet espace. Certaines régions représentent les organismes plus complexes, d'autres ceux qui le sont moins. Puisque les premières formes de vie étaient d'une grande simplicité, les seules régions de l'espace morphologique susceptibles d'être colonisées furent d'abord celles correspondant à une plus grande complexité. Les organismes ont suivi cette voie non pas parce que la complexité était « mieux », mais parce qu'il n'y avait rien d'autre à faire que de devenir complexe. Eminent darwinien, cet auteur est probablement l'opposant le plus acharné à l'idée de progrès évolutif formulé par Huxley.

Relevons que près d'un siècle avant cette polémique, Darwin avait reconnu l'importance des innovations dans l'évolution: de formes initiales simples naissent des formes plus complexes, ce qui stimule en retour l'apparition d'une plus grande complexité ailleurs. Pour lui, nul besoin d'invoquer une « loi » qui conduirait les premiers organismes simples vers une complexité plus grande. Le progrès est ici lié aux pressions compétitives contingentes, mais prévisibles, et cela explique la stupéfiante variété des écosystèmes terrestres.

Aujourd'hui, les théories sur l'évolution sont nombreuses, mais la conception néo-darwinienne domine. D'autres subsistent. Ces vues ont été transférées aux écosystèmes humains avec le constat que la civilisation industrielle a atteint un degré de complexité jamais atteint auparavant par aucune civilisation. Mais des sociétés moins complexes subsistent néanmoins sur la planète. Aussi, le modèle de l'écosystème conçu comme une structure dissipative offre de nouvelles perspectives dans lesquelles s'insèrent les études factuelles sur l'évolution du vivant, mais dans un cadre théorique différent. La gestion de l'énergie en est le pivot. La thermodynamique en est la science de référence.

B Branches thermodynamiques et branches évolutives

Le modèle de l'évolution généralement accepté aboutit à un arbre de l'évolution se présentant sous cet aspect.



Par analogie, il est possible d'identifier ce dernier à la figure exposant l'évolution d'une structure dissipative sous forme de branches thermodynamiques (I Entropie et complexité / A L'apport de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs). L'évolution de la vie est alors conçue comme la succession de structures dissipatives, qui indépendamment de leur origine, naissent, évoluent et meurent en créant toutefois les conditions d'émergence de structures généralement plus complexes, sauf lors de phénomènes de régressions adaptatives. Il a donc un nouveau modèle évolutif à inventer reposant sur la notion de branche thermodynamique et dont l'unité serait la structure dissipative, de sa naissance à sa disparition, à partir d'une dialectique complexité/entropie. Par extension, ce modèle permet de compléter les théories concernant la disparition de clades entiers au cours des temps.

C La problématique de la durée d'existence des espèces, des clades, des lignages

C-1 Les crises

Les géologues décrivent cinq crises majeures de la vie à l'échelle des temps géologiques. La plus connue est la crise Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années, qui a notamment vu la disparition de la plupart des dinosaures. La crise, peut-être la plus importante, est celle de la fin du Permien, il y a 245 millions d'années. Environ la moitié des familles animales décrites par les paléontologues disparurent (rappelons que les espèces sont regroupées en genres, les genres en familles, les familles en ordres, etc.). Cela correspond à la disparition de l'ordre de 90 pour cent des espèces animales.

Un élément encore plus important est la vitesse d'extinction des espèces. Selon le World Conservation Monitoring Center du programme des Nations unies pour l'environnement (Le Guyader, 2006), le rythme actuel d'extinction est 260 fois plus élevé que le taux naturel d'extinction évalué d'après les données paléontologiques. La durée moyenne de vie des espèces actuelles serait de l'ordre de 10.000 ans, soit 100 à 1.000 fois inférieure à celle des espèces décrites par les paléontologues. Face à ce constat se pose alors la question du rôle de l'homme dans ces disparitions.

C-2 Entropie ou action du milieu

La grande extinction des dinosaures d'il y a 65 millions d'années a plusieurs causes supposées. Entre autres, que ceux-ci auraient été des animaux à sang froid ; caractéristique avantageuse aux périodes chaudes du Mésozoïques (245 à 65 millions d'années), mais que le refroidissement climatique de la fin du Crétacé aurait condamné. Aujourd'hui, il est de plus en plus admis que ces animaux auraient été à sang chaud. Cette thèse perd ainsi un élément de l'axiomatique qui participe à sa démonstration (Amiot, 2006).

Ces constats soulèvent deux problématiques fondamentales. La première est la cause des extinctions brutales à l'échelle géologique. La cause la plus admise est le facteur externe comme l'arrivée d'une météorite sur la terre bouleversant le climat et donc les biotopes des dinosaures. A cette hypothèse, nous proposons celle de saturation du potentiel de complexité du clade dinosaure avec comme conséquence la réalisation des effets du Second principe de la thermodynamique. L'une et l'autre causes ne sont cependant pas exclusives.

La seconde est la durée de vie limitée des clades récents avec comme débat sous-jacent le rôle de l'homme dans ces extinctions. Dans ce dernier cas, il s'agit encore d'un facteur externe à l'origine de la disparition des biotopes ; un des axes forts de la crise de l'environnement. Mais à ce constat, car il ne s'agit pas d'une hypothèse comme la météorite pour les dinosaures, nous avançons l'idée que plus la complexité des organismes augmente, ce qui est avéré par les paléontologues, plus le temps complexe dont ils disposent est court au regard du temps chronologique. Il est par conséquent naturel sous cet éclairage que les espèces complexes (pas les individus d'une espèce) aient des durées de vie plus courtes que les espèces plus simples. Le temps complexe dont dispose une structure dissipative est en relation inverse avec sa complexité.

Aussi, à l'intersection des théories sur l'évolution reposant sur l'analyse des fossiles et la géologie, étayées par la thermodynamique des structures dissipatives, il est possible d'envisager une nouvelle conception du temps: le temps complexe consubstantiel. Ce dernier, composante de la matière, est indissociable des notions de complexité, de potentiel de complexité et de tempo d'existence.

Ceci aboutit à une synthèse sur la fonction écosystémique de la complexité dans sa relation avec le temps chronologique et permet de répondre au paradoxe du maintien de formes simples à côté de formes complexes dont la vitesse d'évolution et de disparition est forte. Le temps complexe est le pivot de cette approche.

IV Le temps complexe

A Nature du temps complexe

En opposition au temps absolu, Maïmonide a conçu le temps comme une composante de la matière. Ceci a été confirmé par les travaux sur les phénomènes dissipatifs à l'origine d'une rupture avec un des fondements de la science moderne qui est la propriété d'invariance des lois de la dynamique par rapport au renversement du temps. Aussi, la notion de temps complexe consubstantiel à la matière va s'inscrire dans un espace polydimensionnel structuré par les axes suivants :

- temps absolu/temps relatif
- temps objectif/temps subjectif
- temps externe/temps consubstantiel

Parce qu'il n'est pas en l'état mesurable et que son tempo est en relation avec le niveau de complexité de la structure dont il est une composante, le temps complexe n'est pas absolu. Toutefois, il est un temps objectif car sa nature est indépendante d'une appréciation ou de circonstances particulières. Il apparaît donc comme un temps complémentaire au temps objectif absolu qui est le temps chronologique de référence aujourd'hui.

Ce temps complexe est intégré à la matière (embedded). Il n'est donc pas, pour le moment, une réalité phénoménologique appréciable par un instrument comme une montre ou une horloge. Aussi, le temps chronologique reste la référence ultime car il est mesurable, mais le temps complexe est le temps de la structure dissipative. Sa durée chronologique, par essence finie, est inversement proportionnelle, mais dans des proportions non linéaires, à la complexité du système dont il est une composante. Cette approche participe à la distinction entre le temps absolu de Newton et le temps consubstantiel de Maïmonide.

Le temps complexe est donc une composante intégrée à nos organismes et à toute autre structure dissipative identifiée comme un système complexe évolutif. Sa nature dépend du niveau de complexité du système. Plus un organisme est simple, plus son tempo d'évolution est lent et vice versa. En conséquence, plus un organisme est simple plus le crédit de temps complexe dont il dispose est important. Cette conception permet de comprendre pourquoi les organismes simples identifiés par les paléontologues ne paraissent pas évoluer. Comme toute structure dissipative, leur clade se complexifie, mais les changements sont imperceptibles. Si cette théorie est valable, il est plus que probable que ces changements seront avérés un jour ou l'autre. Inversement, plus un système est complexe, plus la ressource de temps complexe dont il dispose est limitée. La vitesse d'évolution rapportée au temps chronologique est plus élevée, donc plus sensible aux observations. Mais cette caractéristique condamne dans des délais plus courts ces structures à leur fin. Les dinosaures ont disparu avant les bactéries, premières manifestation de la vie conçue comme une structure dissipative dont sont issues toutes les autres structures dissipatives que sont les organismes, les divers clades, les écosystèmes, les lignages, etc.

Une autre façon d'aborder la notion de tempo est de l'appréhender à partir des différences de complexité de nos sociétés. Dans nos sociétés modernes et complexes, un RDV est fixé à la minute. En Himalaya, l'unité temporelle de référence est notre semaine. Plus le système est complexe, plus le sentiment de 'vitesse' est fort. On vit moins 'vite' à la campagne qu'à la ville. On vit moins 'vite' dans des sociétés traditionnelles que dans des sociétés modernes. Aussi, la prise en compte de la complexité est indissociable de la notion de tempo du système qui est la variable fondamentale caractérisant un temps complexe donné. La notion de temps complexe est indissociable de celle de tempo d'existence.

B Le tempo d'existence

La meilleure manière d'apprécier la notion de tempo est de se référer à la musique. Le tempo d'une interprétation détermine la durée d'un texte, qui toute chose étant égales par ailleurs, sera donc plus ou moins long selon le tempo d'interprétation. Le tempo a donc un lien avec le temps chronologique dans la mesure où il détermine une durée qualifiée de temps usuellement. Relevons qu'il est d'usage d'accélérer le tempo d'exécution d'une œuvre à sa fin pour la ralentir avec la dernière mesure. C'est le rubato. C'est particulièrement frappant dans le prélude du premier acte de Tristan et Iseult de Richard Wagner où il apparaîtrait incongru de faire autrement compte-tenu de la fin dramatique : la mort des deux amants.

Le sentiment qui s'impose à tous est que le tempo de nos sociétés conçues comme un lignage (le mot reste à trouver pour formaliser l'idée d'une structure dissipative évoluant sur une succession de branches thermodynamiques) s'accélère. Les variations sur ce thème alimentent régulièrement les médias. La mondialisation est la référence car, finalement, elle n'est que l'extension d'un modèle politique qui domine les autres modèles en ayant la capacité de les détruire. Pour résister, les structures survivantes s'y engagent pour acquérir les mêmes caractéristiques que les pays l'ayant créé et développé. Schématiquement, l'Europe et son excroissance américaine en sont à l'origine aujourd'hui relayées par des civilisations millénaires comme la Chine ou l'Inde alors que d'autres résistent. Il y a donc entre ces civilisations des vitesses différentes, le jugement de valeur émis au nom de la modernité regardant les sociétés 'lentes' comme en retard ou sous-développées ou en voie de développement. C'est un peu pareil quand on compare le rythme de vie en ville, systèmes complexes, avec le rythme de vie à la campagne. Plus les sociétés humaines sont complexes, plus le rythme de vie est élevé.

Alors que la complexification apparaît comme une réaction écosytémique à la croissance de la dimension irréversible de l'entropie, ce qui semble favorable, celle-ci s'accompagne d'une augmentation du tempo d'existence du système qui l'amène donc plus vite à son potentiel maximum de complexité. Cette idée de tempo d'existence concerne tout à la fois le tempo d'évolution de l'espèce, du clade ou de toute autre forme de manifestation de la complexité, mais aussi l'organisme conçu comme un individu.

Dans une perspective chronologique, le tempo du temps complexe croît avec la complexité de l'organisme conçu comme une structure dissipative. Donc plus la complexité de la structure est élevée plus le crédit de temps chronologique disponible diminue, car la croissance de la complexité rencontre alors des limites indépassables.

C Relation temps complexe, temps chronologique

Le temps absolu chronologique étant le temps de référence du paradigme dominant, il est maintenant nécessaire de tenter d'associer temps complexe, tempo d'existence et temps chronologique dans une même association dont la complexité est la pierre angulaire, tout en introduisant la notion de potentiel de complexité.

Nous avons donc :

- le temps complexe est en relation directe avec le niveau de complexité de la structure dont il est une composante ;
- le temps complexe est de dimension finie, c'est à dire que chaque structure dissipative est porteuse d'une quantité de temps complexe limitée dans le temps chronologique ;
- à chaque complexité est associée un tempo d'existence donné ;
- le temps complexe disponible rapporté au temps chronologique décroît avec la complexité de la structure dans laquelle il est intégré ;
- comme réaction à la croissance irréversible de l'entropie, la complexification accélère le tempo d'existence de la structure et réduit donc le temps chronologique d'existence.

Ces principes relèvent des principes de fonctionnement des écosystèmes. Ceux-ci concernent donc toutes les structures dissipatives (clades, lignages, organismes, écosystèmes, etc.) ou toute autre organisations nourries de flux d'énergie, de matière et d'informations dissipées sous forme d'entropie réversible ou irréversible se caractérisant par une distinguibilité de leur milieu par une complexité supérieure et relevant d'une temporalité spécifique. Plus la complexité est importante, plus le temps chronologique disponible est court et plus le tempo d'existence est élevé. Le temps complexe intégré au système est en effet borné par le potentiel maximum de complexité.

D Potentiel de complexité

Le potentiel de complexité est la complexité maximum que peut atteindre une structure envisagée dans une perspective temporelle. Deux hypothèses sont alors envisageables. D'une part la complexification des structures est potentiellement infinie ; d'autre part elle est limitée et donc rencontre un jour ou l'autre une limite à partir de laquelle, la complexification n'étant plus possible et la croissance de l'entropie se poursuivant, celle-ci dépasse le seuil critique et le système disparaît.

Cette formulation théorique se fonde sur un débat fondamental de nos sociétés confrontées à la crise de l'environnement. Il oppose les économistes aux écologistes sur la notion de facteurs limitants. Pour les premiers le développement économique, donc l'artificialisation des écosystèmes, est potentiellement infini car si les ressources matérielles sont par essence limitées, les ressources intellectuelles ne le sont pas, le capital de connaissances dont nous disposons étant potentiellement infini. A cela les écologistes rétorquent que c'est l'ensemble des ressources dont nous pouvons disposer qui est de dimension finie et qu'aucun organisme vivant ne peut connaître un développement infini. Cette controverse oppose les partisans d'un Développement durable faible, sacrifiant le capital naturel au profit du capital artificiel ou humain, aux tenants d'un Développement durable fort qui postule la conservation d'un capital naturel critique qui est celui qui permet le renouvellement de la ressource.

Ce court article est directement issu de cette controverse. Mais, il n'est pas possible de développer ces points de vue ici, sauf à souligner que le modèle qui est proposé dans ces lignes a la vocation de participer à cette controverse.

C'est la notion de 'facteur limitant' de l'écologie qui a induit l'idée de potentiel de complexification qui se traduit par l'idée que celle-ci ne peut dépasser un certain niveau. Où, quand, comment relève d'une recherche plus orientée. Cependant, au même titre que nous avons souligné la fonction paradoxale de l'entropie : maximisation de l'entropie interne donc désorganisation du système ou exploration de l'espace des phases et complexification, la complexité présente les mêmes caractéristiques paradoxales.

E Effet paradoxal de la complexité

Dans une première étape, la complexification d'une structure dissipative a été envisagée comme une réaction écosystémique à la croissance irréversible de l'entropie, puis prenant acte de l'existence de formes simples anciennes dont l'évolution paraît arrêtée à l'échelle humaine, ont été introduites la notion de temps complexe consubstantiel et celle de tempo d'existence. Plus le tempo est rapide, plus le système se rapproche rapidement de sa fin, qui se caractérise par une production d'entropie nécessitant de se complexifier davantage alors que son potentiel de complexification est épuisé. La conséquence est alors une désorganisation totale : la mort thermodynamique. Il y a donc un antagonisme irréductible entre l'avantage concurrentiel que confère la complexité en améliorant l'efficacité énergétique du système, associée au maintien sous le seuil létal du niveau d'entropie interne, et l'accélération du temps interne que cette complexification induit ; accélération rapprochant de plus en plus vite le système de son potentiel maximum de complexification et donc de la mort conformément au Second principe, la complexité étant la réaction à la croissance de l'entropie. C'est cette évolution antagoniste qui confère à la complexité, au même titre qu'à l'entropie, une dimension paradoxale.

Les structures dissipatives hautement complexes se caractérisent par une efficacité écosystémique élevée qui, dans une perspective darwinienne, leur permet de surmonter les contraintes du milieu et la concurrence pour l'accès aux ressources leur permettant d'exister. Mais l'avantage est aussi inconvénient car une des caractéristiques de cette complexité est d'être associée à un temps complexe de tempo plus élevé que des structures plus simples. Or, plus la complexité est élevée, plus le tempo du temps complexe qui lui est associé est lui aussi élevé, relativement aux systèmes de complexités inférieures. Tout système dissipatif se caractérise donc par un niveau de complexité, mais aussi par un potentiel de complexité limité. Dans la mesure où la complexification est une réaction à la croissance de l'entropie- conformément au Second principe-, celle-ci a comme conséquence immédiate la pérennisation des structures conçues dans une perspective temporelle, mais aussi une modification de leurs temps complexes et donc une accélération de leurs tempos. Ce faisant ces systèmes atteignent plus vite leur potentiel de complexification. Arrivée à ce stade, la complexification n'est plus possible. Il n'y a donc plus de réactions écosystémiques à la croissance irréversible de l'entropie. Les fluctuations thermodynamiques augmentent toujours, mais au lieu de participer à l'exploration de l'espace des phases où le système s'équilibrera sur un état stationnaire plus complexe, celles-ci le déstabilisent durablement. L'entropie tend alors vers son maximum. La structure se délite et meurt.

E Vie et mort d'une structure dissipative

Ce modèle permet de saisir pourquoi les systèmes dissipatifs, une fois créés, sont condamnés à disparaître conformément au Second principe. Ils passent cependant l'essentiel de leur temps complexe à en reculer les limites jusqu'au moment où cela n'est plus possible, indépendamment de leur disparition par accident ou prédation. Ainsi, l'évolution d'un organisme, quel qu'il soit, est un processus de complexification qui des gamètes mâle et femelle se complexifie biologiquement. Les organismes capables d'agir sur leur milieu le structurent en le complexifiant. Cette artificialisation des milieux atteint son paroxysme dans l'espèce humaine en général, mais surtout chez les peuples vivant dans les écosystèmes de haut niveau de complexité comme nos sociétés modernes. Ainsi, la médecine parvient à reculer les effets des maladies alors que beaucoup d'entre elles seraient fatales si nos milieux n'étaient pas autant artificialisés, donc complexes. La maladie est une fluctuation affectant l'homéostasie qui caractérise les organismes vivants. L'ultramédicalisation de la maladie est un processus de complexification qui participe à différer les effets du Second principe, mais par contre coup nécessite des systèmes hautement complexes, donc dissipant des flux d'énergie importants sous forme d'entropie. Un des enjeux de la crise écologique se situe à ce niveau car cette complexification est à l'origine de la crise de l'environnement qui menace l'existence même de nos écosystèmes. L'artificialisation des milieux en est à l'origine. Il y a donc un effet paradoxal de la Modernité car elle soustrait l'homme aux aléas de la nature, mais elle le soumet aux conséquences annoncées de la crise de l'environnement qui n'est qu'une accumulation d'entropie irréversible consécutive à la complexification croissante de nos écosystèmes depuis 3.000 ans. Quelques perspectives évoquées dans la conclusion souligneront ces paradoxes que ce texte n'a cependant pas vocation à développer.

Conclusion

Ce modèle, comme tous ceux relevant de la thermodynamique, est empirique. Sa validité suppose d'admettre la complexité et l'entropie comme variables d'état caractérisant les systèmes et qui, dans une perspective temporelle, ne font que croître simultanément. Tout système dissipatif apparaît alors comme le produit d'une dialectique entropie/complexité aux conséquences antagonistes. Munis de cette grille de lecture, de nombreux phénomènes relevant de structures dissipatives, c'est-à-dire tout le monde vivant, que ce soient des organismes ou des écosystèmes, sont appréhendables à travers elle.

Ainsi, l'innovation est perçue aujourd'hui dans les sociétés développées comme la martingale leur permettant de contenir la concurrence d'autres pays et donc de garantir leur pérennité. Mais s'intéresser à la temporalité du processus d'innovation aboutit à la conclusion qu'en privilégiant la complexification des systèmes, ces politiques hâtent leur fin qui se produira au moment où le potentiel de complexification sera atteint et que, conformément au Second principe, l'entropie du système atteindra le seuil critique létal. Il y a donc un effet paradoxal de l'innovation comme il y a un effet paradoxal de l'entropie. Les innovations participent à l'évolution du système en le complexifiant. Elles lui confèrent des avantages concurrentiels, contribuent à reculer les conséquences de la croissance de l'entropie, mais par ailleurs accélèrent son tempo d'existence l'amenant de plus en plus vite vers les limites de son potentiel de complexité qui une fois atteint bloquera les possibilités de complexification.

L'accélération de l'histoire, la mondialisation libérale promue au statut de 'lendemain qui chantent' par l'immense majorité de la classe politique des pays occidentaux ne sont-elles pas le signe avant coureur de la fin de ce modèle ?

La mondialisation a élevé la complexité de la civilisation industrielle dans sa version libérale (démocratie + capitalisme) à un niveau jamais atteint auparavant. Comme système hautement complexe, la mondialisation a peut-être commencé son déclin, obligeant à envisager d'autres modèles politiques permettant de surmonter les conséquences de la crise écologique.

Alors que la science apparue en Europe occidentale au 16^{ème} siècle a fondé la Modernité, les importantes ruptures dans le paradigme classique qui en est la matrice sont à l'origine du paradigme écosystémique. Ce dernier participe peut-être à préparer la société post-moderne dont un des défis est de résoudre la crise écologique. Cela nécessite d'inventer de nouveaux mots pour exprimer ces nouveaux concepts rendus nécessaires par la crise de l'environnement. Le temps complexe est une proposition.

Fin

Bibliographie

Amiot Romain, « *Les dinosaures avaient le sang chaud* », Pour la science n°348, octobre 2006

Beaujouan Guy, « *Visions du monde* » dans La France médiévale, Fayard, 1983

Réda Benkirane, « *La Complexité, vertiges et promesses* », Le Pommier, 2002

Coveney Peter V., « *L'irréversibilité du temps* », La Recherche, février 1989

Costa de Beauregard Olivier, « *Le temps physique* », Encyclopædia Universalis, 1995

Delahaye Jean-Paul, « *Information, complexité et hasard* », Hermes, 1994

Duvigneaud Paul, « *La synthèse écologique* », Doin, 1983

Duvigneaud Paul, « *Biosphère* », Encyclopædia Universalis, 1995

Esquissaud Philippe, Jacques Vigneron, « *Ecologie industrielle* », Hermann, 1990

Gould Steven « *Ever since Darwin* », Norton and Compagny Inc., New-York, 1977

Hawking Stephen, « *Une brève histoire du temps* », Flammarion, 1989

Klein Etienne, « *Temps* », Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, PUF, 1999

Le Guyader Hervé, « Les limites de la préservation de la biodiversité », Pour la science n°347, septembre 2006

« *Le temps* », La Recherche, avril 2001

Mangin Loïc, « *L'avenir dans le dos* », Pour la science n°347, septembre 2006 d'après un article de Cognitive Science, vol. 30, pp. 401-450, 2006

- Manson Steven M., « *Simplifying complexity : a review of complexity theory* », Geoforum 32 (2001) 405-414
- Mashaal Maurice, « *Le temps en physique* », La Recherche, décembre 1993
- Mayr Ernst « *The evolution of living systems* », Proc. Nat. Acad., 1964 in Encyclopaedia, biologie 4-159 b
- Morin Edgar, « *La méthode 1: La Nature de la Nature* », Le Seuil, 1977
- Nicolis Gégore, Ilya Prigogine, « *Exploring complexity: an introduction* », R. Piper GmbH & Co, Munich, 1989
- Odum Eugene P., « *Ecologie* », Les éditions hrw, 1976
- Prigogine Ilya, « *La thermodynamique de la vie* », La Recherche n°24, juin 1972
- Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, « *La Nouvelle Alliance - Métamorphoses de la science* », Gallimard, 1979
- Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, « *Entre le temps et l'éternité* », Fayard, 1988
- Mickael Romanov, « *Approches thermodynamiques pour gérer le Développement durable des systèmes naturels* », Editions de l'Université polytechnique de Saint Petersburg, 2003
- Sachs Mendel, « *Le concept de temps en physique et en cosmologie* », La Recherche n°86, février 1978
- Wagensberg Jorge, « *L'âme de la méduse - Idées sur la complexité du monde* », Seuil, 1997