

Frédéric Malaval

Fluctuation thermodynamique et innovation

Le 10 novembre 2005

Introduction conclusive

1 Darwin et Schumpeter

1-1 Darwin et la sélection naturelle

1-2 Schumpeter et l'innovation

2 Paradigme et innovation

2-1 Economie et paradigme

2-2 L'émergence du paradigme écosystémique

3 L'apport de la thermodynamique des systèmes dissipatifs

3-1 Contexte de la naissance de la thermodynamique

3-1-a L'histoire, le contexte, les dates

3-1-b La thermodynamique comme facteur de rupture épistémologique

3-2 L'entropie

3-2-a L'apparition du concept

3-2-b L'équivalence entropie-désordre

3-3 La thermodynamique des états de non-équilibre

3-3-a Equilibre et non-équilibre

3-3-b Linéarité et non-linéarité

3-3-c Stabilité du non-équilibre

4 L'intégration du désordre dans les systèmes dynamiques

4-1 Vers une intégration dynamique-dissipatif

4-2 De l'opposition entre le paradigme classique et le paradigme écosystémique

5 Introduction à la valeur écosystémique

Bibliographie

Introduction conclusive

Etablir les fondements de la valeur d'un bien ou d'un service est une problématique récurrente de la philosophie politique depuis Aristote. Aujourd'hui, la théorie économique dominante classique/néoclassique postule que, par l'entremise d'un marché, cette valeur est déterminée par la confrontation de ce bien ou de ce service avec la demande de consommateurs exprimant leurs préférences individuelles par l'acte d'achat. Se pose alors la question de la valeur des biens ou des services ne correspondant à aucune demande, ni à aucun marché. La théorie économique dominante établit alors que leur valeur est nulle. Pourtant, la nécessité de réagir à la crise de l'environnement, dont la pollution est une des manifestations les plus visibles et dangereuses, a amené les industriels à innover pour dépolluer. Quelle est alors la valeur de ces innovations ? Le choix de dépolluer ne relève quasiment jamais de décisions

individuelles, mais de décisions collectives. Répondre à cette question oblige à envisager l'innovation comme une réponse écosystémique à des contraintes déstabilisantes.

La thermodynamique des systèmes dissipatifs fournit les concepts utiles. L'innovation est alors assimilable à une fluctuation thermodynamique participant à l'exploration de l'espace des phases du système. Ce modèle valide et complète les thèses développées par Darwin (1809-1882) pour les écosystèmes naturels et par Joseph Aloys Schumpeter (1883-1950) pour les écosystèmes artificiels.

Ce dernier est reconnu comme l'économiste qui a pensé l'innovation comme le facteur décisif de l'évolution économique. Pour développer sa thèse, il a dû opérer une rupture épistémologique avec les théories économiques dominantes de son époque car, celles-ci issues d'une conception mécaniste des phénomènes, ne pouvaient conceptualiser l'innovation et l'évolution. Aussi Schumpeter a transféré dans le discours économique la grille de lecture de l'évolution développée dans le sillage de l'œuvre de Darwin. Celle-ci est fondée sur l'aléa génétique et la sélection naturelle dont le pendant est l'innovation et le marché.

1 Darwin et Schumpeter

1-1 Darwin et la sélection naturelle

Darwin a écrit deux livres fondamentaux pour exposer sa théorie de l'évolution: "L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie" publié en 1859; " De la variation des animaux et des plantes sous l'action de la domestication" en 1868.

Son objectif était clair: détruire les fondements des théories en biologie fondées sur le fixisme des espèces et le créationnisme. La principale innovation avancée dans son œuvre fut de souligner la variabilité dans la conformation des espèces et le rôle de la sélection naturelle dans la permanence ou la rémission de ces formes innovantes.

Les sources de cette théorie se trouvaient dans la pratique de sélection que les éleveurs anglais maîtrisaient parfaitement, notamment pour créer de nouvelles races de pigeons. Ce que la main de l'homme fait à de brèves échéances pour diversifier une espèce domestique, la Nature le réalise sur le long terme, mais alors sans intention. Ces deux notions de variations et de sélection forment le noyau dur du darwinisme, étayé par le développement de la génétique qui fournit les bases matérielles susceptibles de supporter les développements conceptuels de cette théorie.

C'est en 1865 que Johann Gregor Mendel (1822-1884) publie son étude intitulée: "Expérience sur les plantes hybrides". La variation devient alors mutation. Mais alors que cette variation ne concerne que les phénotypes, la mutation porte sur ce qui est à l'origine de la variabilité des phénotypes: le gène. Darwin, Mendel, puis Hugo de Vries, Carl Erich Correns, Erich Tschermak et d'autres au début des années 1900 établissent les fondements de la biologie moderne par une dialectique associant variabilité génétique et sélection du milieu. Ce sont ces concepts et leur association que Schumpeter va utiliser pour développer ses thèses sur le rôle de l'innovation dans la dynamique économique.

1-2 Schumpeter et l'innovation

Il est de tradition d'avancer que Schumpeter a provoqué une rupture dans la pensée économique en abandonnant le cadre de l'économie classique/néoclassique pour intégrer l'innovation comme moteur de l'évolution économique à l'origine de la création de valeur et des surplus. Il voulut rendre compte de la dynamique économique et basculer d'une approche fixiste dans une conception évolutionniste. C'est en 1912 qu'il publia son livre le plus original, demeuré classique: "la Théorie de l'évolution économique" (Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung).

Schumpeter est ainsi reconnu comme l'économiste qui a imaginé un cadre théorique pour rendre compte des changements observés dans l'activité économique. En cela, il rompt avec l'approche de Léon Walras (1834 - 1910) qui avait élaboré une théorie de l'équilibre économique général statique, c'est-à-dire une économie fondée sur l'immuabilité donc sur l'absence d'innovation. Directement inspirée du modèle de la Mécanique céleste et de la loi de la gravitation universelle, recourant à l'analyse mathématique pour formaliser ce discours, la théorie de L. Walras ne pouvait fournir une base conceptuelle au changement et à l'évolution du système économique, de ses fluctuations et de sa croissance. Il en est ainsi de l'état stationnaire de D. Ricardo, de la reproduction simple chez K. Marx et donc de l'équilibre général statique chez L. Walras. Chez ces auteurs, nous sommes dans l'hypothèse d'un état stationnaire dans une économie fondée sur la réciprocité de l'échange. Il n'y a ni évolution, ni profit possible. Celui-ci, pour Schumpeter, n'est accessible que dans l'innovation et dans la prise de risque de l'entrepreneur qui assume en quelque sorte individuellement un risque pour le compte de la collectivité. Ce risque, c'est le pari fait sur l'évolution de la société, donc sur les demandes et les nécessités futures.

C'est l'innovation, selon Schumpeter, qui est à l'origine du profit; profit impossible dans une économie fondée sur un état stationnaire. Ce profit est assimilé à un surplus. Aussi, à l'instar de la biologie darwinienne qui voyait dans la combinaison de la variabilité et du milieu les facteurs de l'évolution des écosystèmes naturels, Schumpeter voit dans l'innovation et le marché les éléments-clés à l'origine de l'évolution des écosystèmes artificiels.

L'introduction de ces concepts permet de distinguer l'invention de l'innovation. L'invention est l'apparition d'une rupture dans un équilibre. L'aléa génétique est une rupture. L'innovation, en revanche, est la confrontation de l'invention au milieu dans lequel elle tente de s'insérer. Le succès alors de l'invention socialisée, devenue innovation, dépend de sa capacité à répondre à une exigence écosystémique. D'un point de vue darwinien, l'aléa génétique est pérennisé si il favorise un phénotype plus efficient. Or, cette approche était inenvisageable dans une théorie économique reposant sur un état stationnaire dont les composantes sont valorisées par des prix issus des transactions opérées par le marché. Une des critiques principales portées par les environnementalistes est le réductionnisme monétaire de la théorie économique dominante. Ce faisant, ils en appellent à un autre paradigme.

2 Paradigme et innovation

2-1 Economie et paradigme

L'immense majorité des économistes dans la lignée de A. Smith (1723 - 1790) recoururent aux méthodes et choix épistémologiques faits à partir de l'étude des cieux pour construire des théories sur le fonctionnement de l'économie. Ceux-ci rencontrèrent des succès. Ainsi, la démarche de L. Walras fut utile pour modéliser de nombreuses interdépendances économiques, proposant, entre autres, une théorie montrant comment se déterminent, à un moment donné, les prix des biens, des services et des facteurs de production. Seulement, les choix épistémologiques à l'origine de cette conception de l'activité économique sont directement issus de la physique mécaniste et du formalisme mathématique qui lui est associé: l'analyse mathématique. Or le monde de la Mécanique a eu pour premier objet d'étude le monde des cieux, qui à l'image de Dieu, est un monde d'ordre, de perfection loin des bruits et des désordres du monde terrestre.

La conception du monde issue de la physique mécaniste repose sur l'harmonie et la cohérence. Ces postulats épistémologiques ont irrigué toute la noosphère (terme inventé par Vladimir Vernadsky (1865-1945) pour désigner l'ensemble des créations spirituelles). Mais depuis, le désordre et le chaos se sont invités dans les territoires d'une philosophie naturelle qui les en avait exclus. Aussi, aujourd'hui, les physiciens opposent les systèmes dynamiques aux systèmes dissipatifs ; les systèmes déterministes aux systèmes ergodiques (ces distinctions sont développées plus loin).

La physique a obtenu ses plus beaux succès pour les systèmes dynamiques comme ceux modélisant le mouvement des planètes. Les développements théoriques qui en sont issus ont permis à Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) de découvrir Neptune, par le calcul, en 1848. Aussi, cette philosophie de la nature, par ses succès prédictifs, s'est imposée comme la seule et unique méthode pour découvrir les lois de la nature, puis les lois des hommes. L'économie classique/néoclassique s'est développée dans ce cadre en transposant les concepts issus de la Mécanique à ceux de l'économique.

Ce cadre que nous appellerons paradigme classique repose sur des choix épistémologiques dont les principales composantes sont, entre autres, déterminisme et neutralité du temps. Les physiciens établissent qu'une des propriétés fondamentales des systèmes dynamiques est l'invariance des lois de fonctionnement de tels systèmes par rapport au temps. Or, si ce temps n'est pas pris en compte dans l'évolution des systèmes, Schumpeter a montré qu'il ne pouvait y avoir de surplus dont les innovations sont à l'origine. Cette approche 'classique' des phénomènes économiques est par conséquent incapable de rendre compte de l'évolution du système économique.

2-2 L'émergence du paradigme écosystémique

Le paradoxe est qu'alors que les néoclassiques, à l'origine de la notion d'état stationnaire en économie, avaient posé leurs concepts dans le prolongement d'une physique mécaniste considérée comme achevée au milieu du XIX^{ème} siècle, Schumpeter ne put recourir aux modèles issus de la physique pour développer ses thèses dans la mesure où le monde de la mécanique est un monde déterministe fondé sur un principe de causalité qui ignore le

changement. C'est la thermodynamique qui fournit les concepts pour modéliser les changements dans les phases des systèmes. Or, cette thermodynamique était loin d'avoir atteint le niveau de développement de la physique mécaniste quand Darwin puis Schumpeter s'intéressèrent à l'évolution des écosystèmes naturels ou artificiels, donc au rôle des innovations. Depuis, cette physique s'est développée pour acquérir la cohérence de la Mécanique classique dès lors que l'on accepte que ses postulats épistémologiques diffèrent sur de nombreux points de cette dernière. Cette physique thermodynamique s'est intéressée aux états de non équilibre thermodynamique dans lesquels se trouvent tous les systèmes vivants, des procaryotes jusqu'au gigantesque écosystème artificiel que constitue la société industrielle moderne à l'origine de la crise de l'environnement. Le paradoxe de l'économie savante fut d'avoir recouru aux méthodes et concepts de la physique mécaniste, qui concerne des systèmes en équilibre thermodynamique, pour structurer ses constructions théoriques sur le fonctionnement des micro- ou macro-écosystèmes artificiels alors que ceux-ci ne sont pas en équilibre thermodynamique.

Ces écosystèmes se caractérisent par une baisse de leur niveau d'entropie, qui correspond à une structuration supérieure à celle du milieu dans lequel ils évoluent. Recourir à d'autres concepts et à des choix épistémologiques différents de ceux de la Mécanique est par conséquent utile pour créer de nouvelles perspectives et par là, redéfinir des notions fondamentales de l'économie comme la valeur ou la richesse à la base de toute politique.

Aussi, à l'instar des concepts fondamentaux de la mécanique et de la thermodynamique d'équilibre qui ont ensemencé les théories économiques modernes, la physique des systèmes dissipatifs, récente historiquement par comparaison avec ses ancêtres achevés, fournit un cadre cohérent susceptible d'apporter de nouveaux éclairages sur le fonctionnement des écosystèmes quels qu'ils soient. Ce faisant, elle conforte l'œuvre de Darwin et de Schumpeter qui, en rupture avec les attitudes mécanistes de leurs contemporains, ont élaboré d'audacieuses grille de lectures du fonctionnement des écosystèmes sans disposer du même arsenal cognitif que les fixistes/créationnistes en biologie ou les classiques/néoclassiques en économie.

Que nous apprend cette nouvelle thermodynamique ? Une évidence pour beaucoup; une révolution dans le domaine scientifique. Tout système dissipatif est le produit de son histoire. Cette histoire ne s'inscrit pas dans une perspective linéaire déterministe au contraire des systèmes dynamiques qui sont la résultante des causes qui en sont à l'origine. En cela, cette thermodynamique introduit de nouvelles conceptions du temps, de la matière, de l'énergie et du fonctionnement des écosystèmes plus proches des conceptions issues du sens commun et de nos pratiques sociales, mais avec la même rigueur scientifique que la Mécanique. Aussi, cette physique nous permet de penser l'innovation et de comprendre sa fonction dans la stabilité de systèmes socio-économiques, paradoxalement en perpétuel changement. Ce faisant elle participe à l'émergence d'un nouveau paradigme baptisé, paradigme thermodynamique, paradigme écolgique ou paradigme écosystémique.

3 L'apport de la thermodynamique des systèmes dissipatifs

3-1 Contexte de la naissance de la thermodynamique

3-1-a L'histoire, le contexte, les dates

La thermodynamique postule qu'à tout système physique sont associées une énergie et une entropie. L'énergie prend deux formes: la chaleur et le travail. Cette discipline s'organise à partir d'une séparation entre le système et le milieu dans lequel il évolue et dont il est séparé par une limite, une frontière. Le système est considéré en équilibre local avec le milieu dès lors que les variables d'état (pression, température, etc.) qui le caractérisent sont différentes de celles du milieu. Cet équilibre local est en réalité du non-équilibre en regard d'un système qui à l'origine est à l'équilibre thermodynamique. L'entropie et l'énergie interne sont deux variables d'état dont les valeurs sont différentes entre le système et l'asystème.

Au contraire des systèmes mécaniques dont le mouvement est autonome au regard de leur 'environnement' mais simplement soumis à des lois de la nature, les systèmes thermodynamiques, quand ils ne sont pas isolés, c'est à dire sans échanges avec l'extérieur, sont la résultante d'interactions avec leur 'environnement'. Dans ce dernier cas, et à la différence des premiers, ces systèmes échangent en permanence avec leur 'environnement' et comportent une dimension d'imprévisibilité que n'ont pas les systèmes mécaniques.

Les premiers travaux de la thermodynamique ont porté sur les machines à feu. Le but était de trouver les meilleures organisations pratiques pour maximiser la puissance des moteurs. Aussi, contrairement à la Mécanique dont le développement fut motivé par des considérations pratiques: organiser le calendrier des fêtes de la chrétienté, mais aussi mystiques: connaître les lois d'une nature créée par un Dieu parfait, les fondements de la thermodynamique sont essentiellement issues d'interrogations pratiques d'ingénieurs.

C'est William Thomson (1824-1907) qui a inventé le mot 'thermodynamique' au milieu du XIX^{ème} siècle mais, comme Ilya Prigogine (1917 - 2003) le mentionne, les intuitions de Sadi Carnot (1796-1832) étant à l'origine des premier et second principes, l'année de la publication de son mémoire sur les machines à feu en 1824 est admise comme la date de naissance de cette discipline qui embrasse l'étude de toutes les transformations qui s'accomplissent à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire aussi bien les changements d'états physico-chimiques que les changements de positions seuls envisagés en mécanique.

Trois catégories de systèmes sont concernées par cette physique:

- les systèmes dits ouverts, échangent de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur;
- les systèmes fermés, qui n'échangent que de l'énergie avec le monde ambiant;
- les systèmes isolés, privés de tout échange.

Les systèmes vivants, qu'ils soient microscopiques ou macroscopiques, sont des systèmes ouverts.

Les fondements de la thermodynamique reposent sur deux 'lois empiriques'. L'une, appelée premier principe de la thermodynamique, introduit le concept d'énergie et exprime une propriété de conservation impliquant que l'énergie, considérée sous toutes ses formes, doit

rester constante au cours de la transformation d'un système isolé. L'autre, appelée second principe, introduit le concept plus subtil d'entropie et exprime une propriété d'évolution impliquant que, dans un système isolé, l'entropie ne peut que croître ou demeurer constante à l'état d'équilibre... thermodynamique.

3-1-b La thermodynamique comme facteur de rupture épistémologique

Alors que la Mécanique observe l'évolution de systèmes dans un référentiel temporel qui n'agit pas sur eux, la thermodynamique devient la discipline qui étudie les conditions de changements de la matière, les concepts et méthodes qui en sont issues étant transférés au domaine du vivant. Aussi a-t-on pu évoquer le développement d'une thermodynamique du vivant pour les phénomènes dissipatifs. Ces derniers, à la différence des systèmes mécaniques par essence pérennes, s'usent et se détériorent dans le temps. Les thermodynamiciens ont alors associé à cette dégradation la variable d'état 'entropie'

3-2 L'entropie

3-2-a L'apparition du concept

La notion d'entropie, symbolisée par la lettre S, fut introduite dans la thermodynamique en 1854 par le physicien allemand Rudolf Clausius (1822-1888) et devint le pivot de l'étude macroscopique des processus d'évolution au sein des milieux hautement complexes à l'échelle moléculaire. Selon le second principe de la thermodynamique, il est impossible de décrire un cycle moteur au moyen d'une seule source de chaleur.

Le physicien anglais W. Thomson (lord Kelvin, 1824-1907) en a déduit l'échelle thermodynamique absolue de température T. Celle-ci a été utilisée peu après par Clausius, pour formuler son théorème fondamental:

@mettre une équation du 2 principe

dQ représente l'élément de chaleur reçu ($dQ > 0$) ou fourni ($dQ < 0$) par le milieu; le signe d'égalité concerne les cycles réversibles qui sont des successions d'états d'équilibre. L'évolution de tout milieu isolé ($dQ = 0$, transformation adiabatique) s'accompagne nécessairement d'un accroissement d'entropie et tend vers un état d'équilibre qui correspond à l'entropie maximale ($dS = 0$ à l'équilibre). Ce dernier est généralement caractérisé par une uniformisation qui témoigne d'un état de dégradation complète. A entropie et volume constants, tout système évolue vers l'état d'énergie minimum. Il s'ensuit la propriété fondamentale de l'entropie d'être une mesure de désordre, ce que confirme l'analyse microscopique. L'introduction de l'entropie dans l'expression du second principe de la thermodynamique permet d'écrire ce dernier sous la forme d'un bilan, représenté symboliquement par l'égalité :

$$dS = diS + deS$$

$$\text{avec } diS \geq 0$$

deS désigne le flux entropique, dû à la contribution du milieu extérieur sous forme de flux de conduction et de convection ; son signe n'est généralement pas défini. Le second terme, dis, représente l'ensemble des effets dissipatifs engendrés par les processus irréversibles internes ; il porte le nom de production d'entropie. Ici le signe est essentiellement défini positif et traduit la condition imposée à toute évolution par le second principe. Le signe d'égalité correspond à des transformations réversibles. Dès lors, dans tous les cas, les transformations irréversibles apportent une contribution positive à l'accroissement d'entropie. Donc l'entropie ne peut que croître dans un système par suite des transformations irréversibles qui s'y produisent. Dans un système isolé ($deS = 0$), la croissance de l'entropie ne s'arrête que lorsque le système atteint l'équilibre thermodynamique.

3-2-b L'équivalence entropie-désordre

La thermodynamique est ainsi devenue la science des phénomènes irréversibles, puis des structures dissipatives. Dans le cadre plus restreint du seul domaine des états d'équilibre et des transformations réversibles, l'introduction de la notion d'entropie peut être obtenue par d'autres voies. Les travaux de L. Boltzmann (1844-1906), en théorie des gaz, relatifs à ce même concept d'entropie, interprété du point de vue mécanique à l'échelle moléculaire, ont permis d'assimiler la notion d'accroissement d'entropie à l'évolution ordre-désordre qui caractérise tout système isolé. Ce résultat eut une influence considérable sur le développement ultérieur de la thermodynamique. Mais c'est à partir des contradictions entre mécanique et thermodynamique, nées de l'équivalence entropie-désordre, que se développa cette dernière discipline. La thermodynamique devint alors une discipline macroscopique autonome, applicable aux systèmes complexes et dont la notion d'irréversibilité est la pierre angulaire, s'opposant aux conceptions de déterminisme et de réversibilité issues de la Mécanique.

Boltzmann, par son œuvre, avait bien tenté un effort de réunification de la mécanique et de la thermodynamique en proposant une théorie dont le fondement est l'identification de l'entropie au désordre. Mais sa conclusion induisit l'idée que tout système, quel qu'il soit, tend vers un niveau maximum d'entropie, donc de désordre. Comment expliquer alors la persistance de structures ordonnées comme les structures vivantes des procaryotes au méga-écosystème industriel ? Comment interpréter la complexification croissante des formes vivantes que les paléontologues observaient ? Comment garantir un avenir à l'écosphère et à la civilisation européenne, toutes deux condamnées au désordre en vertu du second principe de la thermodynamique ?

Cette angoisse cosmogonique est à l'origine d'une série de travaux ponctués par les noms de Gibbs, De Donder, Onsager, Prigogine, etc. qui aboutit à une théorie cohérente sur la thermodynamique des structures dissipatives. Elle participe à la constitution d'un paradigme écosystémique dont les postulats épistémologiques diffèrent profondément de ceux constitutifs du paradigme classique qui domine la philosophie naturelle aujourd'hui la science, le monde industriel et toute la noosphère en général.

Pour organiser leur discipline, et bien qu'ils n'y aient pas de domaines phénoménologiques imperméables aux autres, les thermodynamiciens ont distingué trois catégories de systèmes:

- les systèmes en équilibre thermodynamique
- les systèmes proche hors de l'équilibre thermodynamique, ou qualifié de proche de l'équilibre thermodynamique et qui se trouvent à l'état stationnaire;

- les systèmes hors équilibre thermodynamique.

3-3 La thermodynamique des états de non-équilibre

Le premier aspect de cette thermodynamique nouvelle est la dissipation de flux; la seconde est la production d'entropie. Plus un système est loin de l'équilibre thermodynamique, plus sa complexité augmente, plus son niveau d'entropie baisse, plus la dissipation de flux est importante et plus sa production d'entropie aussi. Le système se retrouve alors confronté à un paradoxe, plus il est éloigné de l'équilibre thermodynamique, plus son niveau d'entropie est bas mais plus sa production d'entropie est importante. Aussi, doit-il évacuer cette entropie dans le milieu dans lequel il évolue. Ce modèle fournit une grille de lecture utile pour affiner la compréhension de la crise de l'environnement. Le déchet et la pollution sont l'expression de cette entropie.

En termes prosaïques, un organisme pour vivre est obligé de polluer, mais cette pollution peut par rétroaction altérer ses potentialités d'existence. Là est le paradoxe que les environnementalistes ont à résoudre. Traditionnellement cette pollution, donc cette entropie, était rejetée loin des organismes pollueurs. Mais la consciencisation de la finitude de l'écosphère, surtout dans les régions hyperdéveloppées comme l'Europe occidentale, c'est à dire à niveau de complexité très élevé, fait qu'il n'y a plus d'espaces inhabités où rejeter cette pollution. Le gestion de l'entropie est par conséquent au cœur des préoccupations des environnementalistes.

Quels sont donc ces outils conceptuels permettant d'élaborer des grilles de lecture du fonctionnement des écosystèmes ?

Avant d'aborder les notions fondamentales de fluctuation et de longueur de cohérence du système, il est nécessaire d'admettre que les relations entre les constituants d'un écosystème approché sous l'angle thermodynamique sont fondées sur les dialectiques: relations linéaires et relations non linéaires; relations ordre-désordre dont la finalité est l'optimisation énergétique du système par l'exploration de l'espace des phases.

Mais avant toute chose, distinguer l'équilibre thermodynamique du non équilibre permet de s'affranchir de nombreux présupposés, issus de nos conceptions mécanistes de l'écosphère et du fonctionnement des écosystèmes.

3-3-a Equilibre et non-équilibre

La notion d'équilibre thermodynamique est facilement accessible à travers la loi de diffusion de la chaleur de Joseph Fourier (1768-1830).

C'est en 1822 que J. Fourier publie son œuvre majeure, "Théorie analytique de la chaleur" après avoir, dans de nombreux essais antérieurs, présenté les esquisses de sa théorie. L'idée dominante est que la chaleur ne se communique qu'entre particules contiguës, de la plus chaude vers la plus froide. La vitesse de l'échange est proportionnelle à la différence des températures. Un formalisme mathématique permet d'exprimer cette loi de la nature selon les mêmes usages que la loi de la gravitation universelle de Newton. Cette loi s'inscrit donc bien dans le paradigme classique. Cependant, à la différence de la Mécanique qui porte

initialement sur le mouvement des orbes, les travaux de Fourier s'intéressent à la chaleur. Or, cette chaleur tend à se répartir uniformément dans un milieu lorsque aucune action n'est entreprise pour en contraindre l'évolution naturelle. C'est cette constatation qui est à l'origine du second principe de la thermodynamique qui énonce que: « tout système laissé à lui-même tend vers un état d'équilibre dont l'aboutissement est la maximisation de la fonction 'entropie' ».

Une vision plus proche de la réalité expose une gradation du niveau d'entropie des systèmes dont l'état max. correspond aux équilibres thermodynamiques, donc aux états de désordre max., donc à l'absence de structure. Or, toute structure suppose une différenciation à l'égard du milieu dont elle se distingue d'un point de vue phénoménologique. Tout écart entre Milieu et système se caractérise donc par des écarts des complexités en référence.

Un système évoluant en situation de non-équilibre thermodynamique se caractérise donc par un niveau d'entropie inférieur à celui du milieu dans lequel il se situe. Il est toutefois soumis au second principe de la thermodynamique et par conséquent, comme toute structure évoluant loin de l'équilibre thermodynamique, tend à minimiser son niveau d'entropie, donc son niveau de désordre.

Les physiciens ont montré que la maintien de cette situation de non équilibre est conditionnée à la dissipation de flux d'énergie et par extension de flux de matières et d'informations. Ces théories ont depuis longtemps dépassé le seul cadre des systèmes non vivants pour alimenter une réflexion sur les systèmes vivants, que ceux-ci soient individuels comme un organisme vivant, ou collectif comme une ville assimilée alors à un écosystème urbain.

Une fois acceptée la dualité système-asytème comme fondement de l'approche thermodynamique, il est nécessaire d'envisager la nature des relations entre, mais aussi au sein des constituants du système. Or, à la différence d'un des présupposés de la physique classique qui est la linéarité de ces relations, la thermodynamique introduit la notion de non-linéarité distinguant alors deux natures de système: les systèmes déterministes (relations linéaires) et les systèmes ergodiques (relations non linéaires). A la différence des premiers, l'évolution de cette deuxième catégorie de systèmes ne dépend donc pas de conditions initiales et d'un principe de causalité strict fondant le déterminisme, mais repose sur un fonctionnement à caractère aléatoire, consubstantiel à la nature même de ces systèmes.

3-3-b Linéarité et non-linéarité

Dans un système linéaire, les effets sont proportionnels aux causes. Par exemple, la loi empirique de Fourier présentée précédemment affirme que, dans un système siège d'un gradient de température (à l'exclusion de toute autre force), le flux de chaleur est proportionnel au gradient. L'élément fondamental de la thermodynamique linéaire est la proportionnalité des relations entre les composants et les flux au sein du système où dominent les rétroactions négatives. Ce sont ces rétroactions négatives qui garantissent la pérennité des états stationnaires : le fameux retour à l'équilibre du sens commun. Aussi, les systèmes où dominent les relations linéaires sont des systèmes stables vis à vis de leur milieu. Ils évoluent en état stationnaire, tout en faisant l'objet de fluctuations, mais aussitôt inhibées, stabilisées. Ce sont ces fluctuations qui génèrent des situations de non linéarités.

C'est seulement au cours des années 1960 que l'on a commencé à étudier systématiquement la thermodynamique non linéaire où les régimes simples prédits par les lois linéaires deviennent instables. Le système " saute " alors sur d'autres branches d'évolution qui peuvent être totalement différentes, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équilibre thermodynamique. Loin de cet équilibre, les états stationnaires peuvent perdre leur stabilité. Il peut apparaître ainsi spontanément des structures spatiales ou des oscillations à partir de systèmes parfaitement homogènes au départ. Ces situations de non-équilibre thermodynamique apparaissent, paradoxalement, comme la condition nécessaire pour favoriser l'émergence de structures dissipatives pérennes.

3-3-c Stabilité du non-équilibre

Les conditions de stabilité d'un système à partir de l'hypothèse d'un équilibre local sont déterminées par la différentielle seconde de l'entropie.

(@fonction Liapounov)

En recourant à cette expression mathématique identifiée à une fonction de Liapounov, les physiciens déterminent un critère de stabilité du système par rapport aux petites perturbations, autour du processus irréversible considéré et soumis à des contraintes fixes. Ce critère de stabilité implique, dans les cas où il est réalisé, la régression des fluctuations qui ont engendré l'écart à l'équilibre stationnaire. Dans cette configuration, le système est stable et le reste malgré la présence de fluctuations. Cet équilibre stationnaire est différent de l'équilibre thermodynamique, car il établit que la fonction entropie localement est inférieure à celle du milieu.

Autour d'un état d'équilibre thermodynamique, mais aussi autour d'un état de non-équilibre linéaire ou d'équilibre stationnaire, la stabilité est identiquement assurée en vertu du second principe. Cette stabilité correspond à une maximisation de la variable d'état 'entropie'. Cependant, plus le système évolue loin de l'équilibre thermodynamique plus ce principe d'équilibre peut être mis en défaut. Les fluctuations ne sont plus nécessairement amorties. La stabilité n'est donc plus la conséquence de lois générales; tout au contraire, les fluctuations peuvent croître et envahir le système tout entier dès lors que l'amplitude de la fluctuation est supérieure à la 'longueur de cohérence' du système. C'est l'état marginal. Cette notion de longueur de cohérence exprime le fait que l'homogénéité d'un système est déterminée par sa capacité à 'résorber' les fluctuations dues à l'entropie du système et aux perturbations provenant du milieu. Donc selon l'équivalence désordre/entropie de Boltzmann, absorber les manifestations issues du 'désordre' quel qu'il soit.

Or, rappelons que le terme $d_i S$ de l'entropie est toujours positif ou nul. Des structures dissipatives ou organisations spatio-temporelles nouvelles peuvent émerger dans de telles situations. Comme Ilya Prigogine l'a montré, le non-équilibre confère à la matière des propriétés de structuration qui demeurent impossibles à l'équilibre thermodynamique. La dimension irréversible de l'évolution des systèmes par la croissance de la fonction $d_i S$ et les fluctuations qu'elles génèrent loin de cet équilibre a un rôle constructif, mais imprévisible. Ces nouveaux états de non-équilibre apparaissent aux points de "bifurcation". A ces points, le système peut évoluer entre plusieurs états (branches thermodynamiques), dont le retour à l'état d'équilibre thermodynamique. Ces bifurcations débouchent sur des auto-organisations différentes de celle dont elles sont issues. Mais, alors que les lois de la thermodynamique d'équilibre n'envisagent comme évolution qu'une dégradation (entropie-désordre) du

système, loin de l'équilibre, les conséquences d'un état marginal sont quelque peu inattendues puisque, à l'inverse de la dégradation classique par dissipation, le régime qui s'établit peut être plus structuré que le précédent. En recourant au terme "complexité", nous exprimerons donc l'hypothèse que l'augmentation de structuration d'un système est la réponse systémique à la croissance de la production irréversible d'entropie qui ramène inéluctablement ce dernier vers l'équilibre thermodynamique, donc au désordre, selon le second principe de la thermodynamique : la mort thermique tant redoutée au XIX siècle.

Le choix épistémologique admettant que ce désordre est consubstantiel aux systèmes dissipatifs se distingue des présupposés conceptualisant les systèmes dynamiques. Frottements, chaleur, non-linéarité, etc. et toutes ces manifestations d'incohérence furent exclues au nom de la perfection des lois d'une Nature parfaite créée par un Dieu parfait. Cependant, les faits étant têtus, ce désordre est désormais intégré à la physique d'essence mécaniste.

4 L'intégration du désordre dans les systèmes dynamiques

Le rôle du désordre dans l'évolution des systèmes est désormais abordé à travers deux approches fondamentales, qui associés, quoique étant souvent présentées comme antagonistes, permettent de proposer une conception de l'innovation comme facteur de cohérence des systèmes, qu'ils soient dissipatifs ou dynamiques.

En effet, la conception des systèmes dynamiques ne repose plus désormais sur l'harmonie tranquille issue de l'étude des astres. La théorie des systèmes dynamiques intègre désormais le chaos, le désordre alors que ces phénomènes étaient écartés comme épiphénomènes des anciennes conceptions. Cette intégration du désordre dans la dynamique débouche sur la théorie du chaos déterministe. Ce dernier postule à l'existence d'un ordre masqué par un désordre anaturel, étranger à la matière. Au contraire, la théorie des systèmes dissipatifs postule à l'existence de ce désordre comme consubstantiel à cette matière. Ces deux approches sont-elles irréconciliables ? La réponse est positive si le choix épistémologique qui la sous-tend est qu'il existe des espaces phénoménologiques distincts et séparés par des frontières étanches dans l'écosphère, que ce soit pour les écosystèmes artificiels ou naturels ; négative si on postule le contraire.

4-1 Vers une intégration dynamique-dissipatif

Aussi, toute étude de système impose d'apprécier à leur juste valeur le rôle que le répétitif ou l'imprévisible, le déterministe ou l'aléatoire, le simple ou le complexe, sont susceptibles de jouer dans le fonctionnement de celui-ci. Conscient que deux approches des systèmes s'opposent: la dynamique, la dissipative.

Les physiciens confrontés à des systèmes naturels comme l'atmosphère, par exemple, associent des lois de la dynamique des fluides et de la thermodynamique notamment celles relatives aux changements d'état de la matière. Les modèles qui en sont issus intègrent des systèmes d'équations non-linéaires, traduisant le fait que les effets ne sont pas proportionnels aux causes.

Cette non-linéarité ne signifie pas que les systèmes évoluent vers des situations de désordre caractérisées par une maximisation de la variable d'état 'entropie'. Au contraire, selon les circonstances, ces systèmes tendent vers des états stationnaires appelés "attracteurs". De l'évolution vers tel ou tel état stationnaire dépend alors des bifurcations qu'emprunte le système au cours du temps. Une bifurcation est une modification qualitative du système, au cours de laquelle, celui-ci a la possibilité d'évoluer vers un des 'attracteurs' accessibles. Rien ne permet a priori de désigner d'avance l'attracteur vers lequel le système va se stabiliser.

Une bifurcation est en général loin d'être unique. Elle constitue le point de départ de toute une cascade de transitions successives conduisant à des configurations nouvelles stables ou instables d'un point de vue mathématique; stables et instables d'un point de vue phénoménologique. Chaque configuration se caractérise par une stabilisation des principales variables d'état du système. Aussi, les physiciens ont qualifié d'exploration de l'espace des phases du système le processus qui amène le système à explorer différentes configurations se stabilisant temporairement dans l'espace où sont réunies les conditions d'un état stationnaire. Mais les conditions du milieu dans lequel il évolue se modifiant sans cesse, cette exploration est incessante. De plus le système est toujours soumis au second principe de la thermodynamique et notamment à la part irréversible de production d'entropie (diS/dt). Sous l'effet des contraintes externes, -le milieu-, et internes, -l'entropie conçue comme désordre-, le système est soumis à des fluctuations dont les conditions d'évolution ont été formalisées par l'équation de Lyapounov évoquée ci-avant. Tant que l'amplitude des fluctuations est inférieure à la longueur de cohérence du système, l'état stationnaire se maintient. En revanche, le système rentre en état marginal lorsque sa cohérence ne peut plus supporter les fluctuations générées en interne et par le milieu.

Volonté du système ou fruit de l'aléa, le débat philosophique sur cette alternative est récurrent depuis 3000 années. De nombreux résultats expérimentaux à l'origine des modèles sur le fonctionnement des systèmes complexes permettent d'élaborer des théories cohérentes en réponse aux problématiques posées par des phénomènes irréductibles aux théories mécanistes issues de l'étude du mouvement des orbites. Les fluctuations dans un système sont génératrices de désordre et donc de maximisation de l'entropie avec comme issue la mort thermodynamique, mais sans ces fluctuations le système ne pourrait explorer l'espace des phases qui s'offre à lui permettant d'accéder à un nouvel état stationnaire, en général plus complexe que celui qu'il a quitté. La complexification des structures apparaît alors comme une réponse systémique à l'accroissement de la part irréversible de l'entropie. Cette évolution vers des complexifications croissantes se réalise grâce aux fluctuations générées en interne et par le milieu dans lequel évolue le système. Elles sont par conséquent, tout à la fois, facteur de déstabilisation et de pérennisation du système.

La transition avec le fonctionnement des écosystèmes artificiels se fonde alors sur l'identification de la fluctuation thermodynamique comme facteur d'exploration de l'espace des phases au processus d'invention-innovation. Subséquemment, le changement apparaît alors comme le facteur de durabilité des systèmes. Nous disposons donc désormais d'un cadre théorique pour penser l'innovation comme facteur d'évolution des écosystèmes, qu'ils soient naturels (l'aléa génétique) ou artificiel (l'invention technologique ou spirituelle). Ce cadre est issu du paradigme écosystémique.

4-2 De l'opposition entre le paradigme classique et le paradigme écosystémique

Alors que les succès prédictifs de la Mécanique céleste irriguait, par ses concepts et ses méthodes, tous les domaines de la connaissance, y compris ceux relevant des sciences humaines comme l'économie, parallèlement, mais avec un décalage historique de deux siècles, l'étude des machines à feu participait à l'élaboration d'une nouvelle discipline de la physique: la thermodynamique.

L'histoire de la thermodynamique est souvent confondue avec l'histoire de la thermodynamique d'équilibre. Saisir cette différence permet de comprendre en quoi cette physique du feu porte des concepts différents de ceux issus de la Mécanique. Cette dernière est à l'origine d'un paradigme dominant que nous qualifions de paradigme classique alors que l'autre participe à l'élaboration d'un paradigme écosystémique dans lequel nous cherchons à élaborer une conceptualisation de l'innovation.

La Mécanique, nous l'avons vu, nous a laissé un monde d'ordre, déterministe où le temps est un référentiel, mais n'est pas un facteur d'évolution des systèmes. C'est un monde parfait, issu de l'étude du mouvement des planètes, du domaine céleste, domaine d'un Dieu parfait. Or, le monde du feu est celui que nous pratiquons tous les jours. C'est le monde du changement, de la guerre, du désordre. C'est un monde où le passé n'est pas reproductible, où le futur n'est pas inscrit dans des lois de la nature ou le dessein d'un dieu. C'est un monde où le hasard, l'aléa n'est pas épiphénomène qui masque l'ordre inhérent à la substance, mais est consubstantiel à cette dernière et à son évolution.

Cette opposition entre paradigme classique et paradigme écosystémique est une antienne de la philosophie occidentale. La dialectique ininterrompue depuis 3000 années est largement à l'origine de toutes les créations cognitives et tous les débats qui animent notre monde depuis cette époque. Aujourd'hui encore, cette opposition se manifeste dans chaque prise de position des milieux savants, que ce soit en France ou dans le reste des nations scientifiques. Cependant, en France, l'opposition aux philosophies de la nature en rupture avec les présupposés du paradigme classique est très forte. La raison est sans doute qu'historiquement le paradigme classique s'est forgé dans ce pays. Les noms de Pierre Simon de Laplace (1749-1827) et d'Auguste Comte (1798-1857) sont incontournables pour apprécier les présupposés de ce paradigme.

La thermodynamique s'est développée initialement dans ce paradigme classique, mais les interrogations nées dans ce cadre ont favorisé l'émergence d'une thermodynamique qui s'extirpe de son premier champ d'application phénoménologique pour porter son regard vers les structures vivantes, c'est à dire évoluant loin de l'équilibre thermodynamique. La thermodynamique est ainsi devenue la science des phénomènes irréversibles, puis des structures dissipatives, donc des systèmes vivants. La conséquence la plus directe est l'élaboration d'une discipline macroscopique autonome, applicable aux systèmes complexes et dont la notion d'irréversibilité s'oppose au déterministe et à la réversibilité issus de la Mécanique. L'opposition épistémologique entre le paradigme classique et le paradigme écosystémique se situe, entre autres, à ce niveau.

Cependant, alors que la Mécanique se révèle inapte à penser l'irréversibilité et l'évolution (différent de la notion de mouvement), la thermodynamique fournit des concepts utiles pour déterminer des principes de fonctionnement des écosystèmes dont les maîtres-mots sont:

complexité, non-linéarité, irréversibilité, indéterminisme, relation système-milieu, rétroactions, relations ordre-désordre, etc. Depuis plus de trente années, parallèlement à l'émergence des préoccupations environnementales, ces nouveaux concepts alimentent un débat dont les aspects sont multiples, mais dont un des points communs est de subsumer le paradigme classique. C'est donc dans le cadre du paradigme écosystémique qu'il est possible de penser l'innovation. Intuition que Schumpeter avait eu en se fondant sur les travaux de Darwin et en abandonnant le cadre dans lequel s'était développée l'économie savante; cadre issu de la Mécanique, donc fondée sur le déterminisme et la réversibilité. Or, la pratique économique est fondamentalement non déterministe et irréversible. Quel chef d'entreprise ou homme politique a la capacité de garantir une prévisibilité totale de ses décisions ? Comme il est d'usage d'affirmer: "si il y avait des recettes miracles cela se saurait".

5 Introduction à la valeur écosystémique

Il n'est pas possible dans ce court article de développer tous les aspects et les controverses suscitées par cette thermodynamique du vivant et les outils mathématiques qui y sont associés. Quelques éléments-clés issus de ceux-ci permettent néanmoins de progresser dans notre ambition de concevoir l'invention-innovation comme éléments déterminant de l'évolution des écosystèmes artificiels.

Aussi, fluctuation et invention présentent les mêmes caractéristiques conceptuelles. Dans deux espaces phénoménologiques distincts, elles participent à l'exploration de l'espace des phases des systèmes, quels qu'ils soient. Ces derniers cherchent, en effet, à optimiser leurs flux énergétiques, mais aussi à réagir au principe d'entropie qui les condamne à la mort thermodynamique qui correspond à une maximisation de l'entropie interne, donc du désordre. La réponse qu'envisage la physique confrontée à ces exigences écosystémiques est la complexification des systèmes vivants.

Les travaux de I. Prigogine ont permis de comprendre le rôle du désordre, de l'entropie, de l'irréversibilité dans la permanence et la structuration des systèmes dissipatifs. Tout à la fois facteur de mort thermique, mais aussi facteur d'exploration de l'espace des phases, l'entropie d'un système est donc à fois le gage de son évolution et donc de sa pérennité, mais aussi de sa fin prochaine. Cette conception ne pouvait être déduite du cadre classique, au sens philosophique dans lequel les connaissances se sont élaborées au cours des dernières décennies. Mais reconsidérer les problématiques dans le paradigme écosystémique permet d'apporter des réponses nouvelles à des questions dont les réponses actuelles ont été formulées dans le paradigme classique.

Une problématiques se révèle alors cruciale. Quelle est la valeur d'une innovation en environnement ? La théorie classique/néoclassique oppose les valeurs travail aux valeurs d'échange, la valeur d'utilité tentant de s'intégrer entre ces deux pôles. Mais les unes comme les autres sont limitées à comprendre la fonction sociale d'une innovation en environnement. L'introduction de la notion de valeur écosystémique permet de surmonter ce dernier obstacle. Celle-ci est fondée sur la complexité relative des écosystèmes artificiels. Elle est déduite de principes de fonctionnement des écosystèmes conçus dans le paradigme écosystémique et dont l'identification de l'écosystème à une structure dissipative est la pierre angulaire.

Bibliographie:

Nicolis Grégoire, Ilya Prigogine, "A la rencontre du complexe", Presses universitaires de France, 1992

Prigogine Ilya, "La thermodynamique de la vie", La Recherche, juin 1972

Prigogine Ilya, Dilip Kondepudi, "Thermodynamique - Des moteurs thermiques aux structures dissipatives", Editions Odile Jacob, 1999

Prigogine Ilya, "Non-linear Science and the Laws of Nature", Pergamon, 1997