

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 12, novembre 2014
Modélisation des Systèmes Complexes

Res-Systemica, volume 12, article 03

Thermodynamique et économie
Des sciences exactes aux sciences humaines.

François Roddier

article reçu le 24 septembre 2014
exposé du 02 décembre 2013



Creative Commons

Thermodynamique et économie

Des sciences exactes aux sciences humaines

(Exposé présenté au CNAM le 2 décembre 2013)

François Roddier

Résumé

La thermodynamique hors-équilibre a considérablement progressé durant ces cinquante dernières années. Les développements qui nous semblent les plus significatifs sont passés en revue. On en montre les implications pour l'homme, l'auto-organisation des sociétés humaines et l'évolution de l'économie. Elles laissent présager un effondrement vraisemblable des sociétés les plus dissipatrices d'énergie.

During the last fifty years, considerable progress have been accomplished in out-of-equilibrium thermodynamics. What we consider as the most significant developments are reviewed. Their implications are shown for humans, the self-organization of human societies and the evolution of economy. They let us foresee that societies which dissipate the most energy are likely to collapse.

1. La classification des sciences

En 1830, Auguste Comte propose une classification des sciences (mathématiques, astronomie, physique, chimie, biologie, sociologie) dans laquelle chacune des disciplines successives introduit des lois nouvelles appelées principes. Ces principes s'appliquent aux disciplines qui suivent mais pas à celles qui précèdent, de sorte que l'ordre des disciplines reflète la complexité croissante des phénomènes étudiés.

À cette époque l'astronomie se réduisait à la mécanique céleste, fondement de la mécanique classique. De nos jours, on supprimerait l'astronomie, devenue une simple application des sciences à l'univers, mais on ajouterait la thermodynamique, une science qui était alors encore nouvelle. On ajouterait sans doute aussi la biochimie, et on remplacerait le terme de sociologie par celui, plus général, de sciences humaines qui inclut l'économie.

Dès la fin du 19^{ème} siècle Ludwig Boltzmann retrouve les principes de la thermodynamique en appliquant de manière statistique les lois de la mécanique aux molécules d'un gaz. La thermodynamique devient la mécanique statistique. Il n'est plus nécessaire d'invoquer des principes nouveaux.

Au début du 20^{ème} siècle, des physiciens montrent comment étendre les lois de la mécanique aux particules élémentaires. La mécanique quantique remplace la mécanique classique et permet de retrouver les lois de la chimie. Là aussi, il n'est plus besoin de principes nouveaux. La chimie, et par suite la biochimie, deviennent des conséquences des lois de la physique.

Depuis une cinquantaine d'années des physiciens s'intéressent à la biologie. Ils arrivent peu à peu à la conclusion qu'un nouveau principe de la thermodynamique permet d'en rendre compte: le principe de production maximale d'entropie. Une démonstration statistique de ce principe est publiée en 2003 (1), mais celle-ci est encore discutée.

On arrive ainsi à l'idée que toutes les sciences, y compris les sciences humaines, peuvent se ramener aux lois de la physique. C'est la thèse que je soutiendrai ici. La complexité croissante des phénomènes étudiés subsiste, mais elle s'explique par le nombre élevé de variables et par la non-linéarité des interactions. La première difficulté peut être surmontée par une approche statistique, la deuxième par des simulations numériques. De gros progrès ont été accomplis dans ces deux directions. Les sciences humaines accèderont-elles un jour à un statut comparable à celui des sciences exactes?

Ma réponse est que la difficulté ne réside pas dans la complexité des phénomènes mais dans leur irréversibilité. Les sciences exactes étudient des phénomènes prédictibles parce que reproductibles. Pour reproduire un phénomène il faut revenir aux conditions initiales. En toute rigueur, ceci n'est possible que s'il y a réversibilité. Qu'il s'agisse de mécanique ou d'électromagnétisme, les lois de la physique sont réversibles. Dans les deux cas les équations sont invariantes par changement de t en $-t$, où t représente le temps. C'est pourquoi en sciences physiques les phénomènes sont reproductibles.

2. La dissipation de l'énergie

Les lois de Newton disent qu'une boule de pétanque lancée à une certaine vitesse va continuer à rouler indéfiniment à la même vitesse. On sait qu'il n'en est rien. Elle finit par s'arrêter. On attribue cela à un phénomène, souvent considéré comme secondaire, appelé friction ou frottements mécaniques. C'est grâce à l'absence de friction du vide interplanétaire que les planètes tournent indéfiniment autour du Soleil. À cause des frictions la boule de pétanque s'arrête. Si l'on inverse par la pensée le sens du temps, elle repart spontanément d'un mouvement accéléré, un phénomène jamais observé. Les frottements mécaniques rendent les mouvements irréversibles. On sait de plus qu'ils produisent de la chaleur.

À l'époque d'Auguste Comte, on savait inversement convertir la chaleur en énergie mécanique grâce aux machines à vapeur. Il était donc naturel de penser que la chaleur était une forme d'énergie. En 1843, James Prescott Joule détermine l'équivalent mécanique de la calorie. L'énergie totale est bien conservée mais, comme il est difficile d'éviter les frictions ou frottements, l'énergie mécanique a toujours tendance à se transformer en chaleur. Les physiciens disent qu'elle se dissipe. Pour reproduire une expérience, il faudrait revenir à l'état initial, ce qui implique de reconvertir de la chaleur en énergie mécanique.

Une telle conversion est possible à l'aide d'un moteur thermique, mais elle nécessite une différence de température. Dès 1824, Sadi Carnot montrait que la conversion ne peut être que partielle. Le rendement maximal de cette conversion, appelé rendement de Carnot, est proportionnel à la différence de température. En établissant cette loi, Carnot créait une nouvelle science appelée plus tard « thermodynamique ». Elle repose sur deux principes fondamentaux. Le premier est la conservation de l'énergie. Le second est la loi de Carnot décrite ci-dessus. La reproductibilité des observations est limitée à cause des lois de la thermodynamique, d'où l'importance de connaître ces lois avant d'aborder la biologie et les sciences humaines, domaines où les phénomènes sont particulièrement difficiles à reproduire.

Les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent. Leur évolution est irréversible. On croyait autrefois que c'était une caractéristique propre aux êtres vivants. Les géologues ont depuis appris que les montagnes aussi vieillissent. Leur évolution est irréversible. Aujourd'hui, les astronomes savent distinguer les étoiles jeunes des étoiles vieilles. Elles

aussi évoluent irréversiblement. Il y a seulement un siècle, on croyait encore l'univers immuable. On sait maintenant que l'univers observable est né d'un événement appelé le Big Bang et que la matière qu'il contient disparaît dans des trous noirs. Notre univers a eu un commencement et aura une fin. Ce que l'on prenait pour un phénomène secondaire, est en fait un processus fondamental. L'évolution est un processus de dissipation de l'énergie.

3. La notion d'entropie

Carnot avait montré que, dans une machine thermique réversible, les chaleurs Q_i échangées sont proportionnelles aux températures absolues T_i des sources de chaleur de sorte que la somme $S = \sum Q_i/T_i$ est nulle sur un cycle fermé. En 1865, l'allemand Rudolf Clausius appelle cette quantité entropie. Dans un système isolé, l'entropie se conserve tant que les transformations qu'il subit sont réversibles. S'il subit des transformations irréversibles, son entropie augmente. L'entropie d'un système isolé ne peut donc qu'augmenter. Cela a conduit les physiciens à conclure un peu hâtivement que l'entropie de l'univers augmente. On retrouve régulièrement cette phrase dans la littérature. En vérité on ne peut rien conclure car, limité par un horizon, l'univers observable n'est pas isolé.

En 1877, Ludwig Boltzmann donne une expression statistique de l'entropie $S = k \cdot \log W$ où W est le volume occupé par tous les points représentatifs du système dans l'espace des phases. Cette expression est valable à l'équilibre thermodynamique. Peu après l'américain Willard Gibbs généralise cette expression au cas hors équilibre $S = k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$ où p_i est la probabilité du système d'être dans un état microscopique particulier. À l'équilibre tous les états microscopiques sont équiprobables de sorte que $p_i = 1/W$, ce qui redonne bien l'expression de Boltzmann.

Soixante dix ans plus tard, Claude Shannon cherche à mesurer la quantité d'information moyenne contenue dans un message et aboutit à une expression semblable à celle de Gibbs. Cela conduit à une nouvelle interprétation de l'entropie. Celle-ci mesure l'information qui manque pour déterminer complètement un système thermodynamique (vitesses et positions de chacune des particules du système). L'entropie thermodynamique apparaît comme un cas particulier de l'entropie informationnelle de Shannon.

En 1961, Rolf Landauer et Charles Bennett montrent qu'effacer une mémoire dans un ordinateur dégage de la chaleur. Entropie informationnelle et entropie thermodynamique ne sont donc qu'un seul et même concept. Comme le montre le paradoxe de Gibbs, l'entropie d'un système dépend de l'information qu'on a sur ce système. Une transformation est irréversible si, et seulement si, il y a perte d'information sur le système.

Un peu plus tard, Ed Fredkin montre que les systèmes physiques traitent de l'information comme les ordinateurs. On parle de « physique digitale ». Notre propre cerveau traite l'information en faisant des estimations bayésiennes. Pour Edwin T. Jaynes (2003), l'interprétation bayésienne des probabilités est la « logique de la science ». Elle permet aux connaissances de progresser en présence d'information manquante. Elle unifie la théorie des probabilités et la statistique en une seule et même discipline.

4. Les structures dissipatives

La thermodynamique distingue les systèmes fermés des systèmes ouverts. Un système fermé est un système matériel isolé mécaniquement et thermiquement du milieu extérieur. Son énergie interne est constante. Les lois de la thermodynamique impliquent que son

entropie va augmenter. L'énergie mécanique va peu à peu se dissiper en chaleur de sorte que tout mouvement va cesser. Les différences de température vont s'estomper de sorte qu'il ne sera plus possible de produire de l'énergie mécanique. Un système fermé tend vers un état de repos à température uniforme. Les physiciens disent qu'il tend vers l'équilibre thermodynamique.

Un système ouvert est un système matériel traversé par un flux d'énergie. Si le système ouvert est dans un état stationnaire (indépendant du temps), on parle de « structure dissipative ». Une structure dissipative est un système hors équilibre. Son énergie interne reste constante, mais celle-ci se renouvelle constamment. Un bon exemple de structure dissipative est celui d'une casserole d'eau sur le feu. La chaleur du feu maintient constamment une différence de température entre le haut et le bas de la casserole. Lorsque cette différence est suffisamment grande, des mouvements cycliques ordonnés apparaissent à l'intérieur de la casserole. On les appelle des courants de convection. Ces mouvements ne subsistent que tant qu'un flux permanent d'énergie traverse la casserole.

Une particularité des structures dissipatives est de produire spontanément de l'ordre. On retrouve le mot « ordre » dans « ordinateur » parce que l'ordre permet de mémoriser de l'information. Une structure dissipative s'auto-organise en mémorisant de l'information sur son environnement. L'entropie étant l'opposé de l'information, plus une structure importe de l'information de son environnement, plus elle exporte de l'entropie c'est-à-dire dissipe de l'énergie dans son environnement. Qui dit apparition d'ordre dit apparition d'information nouvelle, donc de phénomènes imprévisibles. En effet, si ces phénomènes étaient prévisibles, ils n'apporteraient pas d'information nouvelle. La notion de structure dissipative s'applique à des phénomènes aussi différents que des cyclones ou des espèces vivantes. Elle nous intéresse ici tout particulièrement parce qu'elle s'applique aux sociétés humaines. Cyclones, espèces vivantes, sociétés humaines sont réputés pour l'imprévisibilité de leur évolution.

La notion de structure dissipative a été introduite vers le milieu du XX^{ème} siècle par Ilya Prigogine. Deux questions fondamentales se posaient alors, à savoir pourquoi et comment les structures dissipatives s'organisent. Les progrès récents en thermodynamique hors équilibre permettent de donner des éléments de réponse à ces deux questions. Les physiciens sont peu à peu arrivés à la conclusion que les structures dissipatives s'auto-organisent pour maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe dans l'univers. Ils énoncent cette loi sous la forme d'un nouveau principe de la thermodynamique appelé MEP (Maximum Entropy Production). Dès 1922, Alfred Lotka (2) avait émis l'hypothèse que la sélection naturelle favorise les organismes qui dissipent le plus d'énergie. MEP entraîne que la sélection naturelle s'applique à toutes les structures dissipatives. Il explique pourquoi la nature crée des structures capables de mémoriser toujours plus d'information. Elles peuvent ainsi dissiper plus d'énergie. Les sociétés humaines en sont, à notre connaissance, le stade ultime.

5. Le mécanisme d'auto-organisation

Il nous reste à décrire comment les structures dissipatives s'auto-organisent. On sait maintenant qu'elles le font à la manière des transitions de phase. Les physiciens appellent ainsi les changements d'état de la matière comme le passage de l'état liquide à l'état solide. Il s'agit bien du passage d'un état désordonné (l'état liquide) à un état ordonné (l'état cristallin). C'est ainsi qu'aujourd'hui un livre sur les transitions de phase comme celui de Ricard Solé (2011) débute par un chapitre sur les changements d'état de la

matière, traite de nombreux exemples en biologie et se termine par un chapitre sur l'effondrement des sociétés humaines.

Dans le cas des structures dissipatives, il s'agit de transitions de phase dites continues dont le modèle canonique a été développé en 1925 par Ernst Ising pour décrire le passage du ferromagnétisme au paramagnétisme. Il y a apparition de domaines, appelés domaines d'Ising, à l'intérieur desquels les éléments partagent une même information. Dans le cas du ferromagnétisme, il s'agit du *spin* qui peut être orienté soit vers le haut soit vers le bas, c'est-à-dire mémorise un bit d'information.

En biologie, l'information est mémorisée dans les gènes. Les êtres vivants qui partagent les mêmes gènes forment des domaines d'Ising appelés espèces animales ou végétales. Chez l'homme l'information est principalement mémorisée dans son cerveau. C'est ce qu'on appelle la « culture ». Les individus qui partagent la même culture forment les domaines d'Ising que sont les sociétés humaines.

Les sociétés humaines mémorisent à leur tour de l'information dans les livres, plus récemment dans les ordinateurs. Le physicien danois Per Bak (1999) a montré que le modèle d'Ising s'applique aux réseaux neuronaux comme le cerveau humain. On peut l'appliquer aussi à l'ensemble de l'humanité. Avec le progrès des télécommunications, celle-ci forme en effet un réseau grandissant d'agents interconnectés échangeant de l'information, un « cerveau global » (Pierre Levy, 1994. Howard Bloom, 2001). Le nouveau principe de la thermodynamique (MEP) permet de comprendre pourquoi la nature crée des réseaux d'agents interconnectés, mémorisant toujours plus d'information. De tels réseaux dissipent davantage d'énergie. MEP rend ainsi compte du développement de l'intelligence collective depuis les colonies de bactéries et les sociétés d'insectes jusqu'aux sociétés humaines (3).

5. Le processus général de dissipation de l'énergie

Nous avons vu que les structures dissipatives mémorisaient de l'information sur leur environnement. Plus une structure dissipative mémorise d'information, plus elle dissipe d'énergie. Mais plus vite elle dissipe de l'énergie, plus vite elle modifie son environnement, de sorte que l'information qu'elle mémorise devient peu à peu obsolète. La structure dissipative a de plus en plus de mal à dissiper l'énergie. Pour continuer à le faire, elle doit se restructurer. Elle a atteint un point dit « critique » à partir duquel l'information mémorisée se restructure constamment suivant un mécanisme d'avalanches.

En physique un *spin* se retourne entraînant son voisin qui entraîne alors le suivant. On observe des avalanches de retournements de *spin*. Les *spins* qui initialement coopéraient à l'intérieur d'un même domaine pour créer une même champ magnétique, se retrouvent maintenant en compétition dans des domaines différents. En biologie, de nouveaux gènes apparaissent formant de nouvelles espèces animales ou végétales dont les éléments se reproduisent exponentiellement. Les espèces nouvelles sont en compétition les unes avec les autres. En sociologie, le modèle d'Ising est utilisé pour modéliser la propagation des croyances. Aux retournements de *spin* correspondent les retournements d'opinion. De nouveaux domaines d'Ising se forment mémorisant des informations nouvelles. Les grands domaines sont remplacés par des domaines plus petits et plus nombreux en compétition les uns avec les autres.

Per Bak a montré qu'il s'agit d'un processus physique général qu'il a baptisé « criticalité auto-organisée » (en anglais « self-organized criticality » ou SOC). Les structures

dissipatives oscillent constamment de part et d'autre de leur point critique. Les cyclones faiblissent puis disparaissent. Les espèces animales ou végétales s'éteignent. Les sociétés humaines s'effondrent. D'autres les remplacent et le cycle recommence. Une propriété caractéristique de ce processus est que l'amplitude des oscillations varie en raison inverse de leur fréquence.

Dans le cas des espèces vivantes, le point critique correspond à la transition entre ce que les biologistes appellent la sélection K et la sélection r. Lorsque l'environnement est stable, la sélection naturelle favorise les espèces les mieux adaptées. C'est la sélection K. Elle favorise les espèces qui dissipent le plus d'énergie, par exemple chez les grands arbres ou les grands mammifères. Mais ceux-ci modifient leur environnement qui va peu à peu évoluer. La sélection naturelle va alors favoriser les espèces non plus les mieux adaptées mais les plus adaptables, celles qui sont capables de s'adapter le plus rapidement à un nouvel environnement, comme dans la savane ou chez les petits mammifères. C'est la sélection r.

Plus vite une espèce s'adapte à un environnement qui évolue, plus vite elle dissipe l'énergie donc plus vite elle le fait évoluer. Elle va chercher à s'adapter de plus en plus vite jusqu'au moment où, le temps d'adaptation ne pouvant plus diminuer, l'espèce s'éteint. Un bon exemple est ce qu'on appelle « la course aux armements » entre une proie et un prédateur, dans laquelle chacun des deux essaye d'évoluer plus vite que l'autre. Le biologiste Leigh van Valen a appelé ce processus l'effet de la reine rouge en référence à l'œuvre de Lewis Carroll dans laquelle la reine rouge dit: « Ici il faut courir le plus vite possible pour rester sur place. »

6. Application à l'économie

L'Homme s'adapte à son environnement de façon à maximiser son bien-être. Selon le physicien anglais Frederick Soddy (1926) cela le conduit à maximiser sa dissipation d'énergie. L'énergie dissipée par une société est liée à son PIB (produit intérieur brut). Celui-ci mesure l'entropie qu'elle produit en dollars ou en euros (F. Roddier, 2012).

Les économistes parlent intuitivement de température de l'économie. Peut-on en donner une définition précise? En thermodynamique l'inverse de la température est l'entropie produite par unité d'énergie. En économie l'entropie produite se mesure en dollars et l'énergie consommée en barils de pétrole. On peut donc parler de température de l'économie comme étant l'inverse du prix du pétrole. Plus le prix du pétrole baisse, plus l'économie s'échauffe. Il peut arriver que la production excède la demande. Les économistes parlent alors de surchauffe de l'économie.

Lorsque que le prix de l'énergie est élevé, sa consommation est modérée et l'environnement reste stable. Pour améliorer leur niveau de vie, les individus coopèrent entre eux. Ils forment des sociétés de plus en plus grandes, voire des empires comme l'empire romain. Plus une société s'étend, plus son économie se développe. Le prix de l'énergie diminue mais l'environnement change: épuisement des matières premières, saturation de la demande, développement de la concurrence.

Il existe une température critique au delà de laquelle les empires s'effondrent. La sélection naturelle favorise alors les sociétés moins étendues mais plus adaptables. Celles-ci deviennent multi-culturelles. La compétition remplace la coopération. L'intérêt individuel l'emporte sur l'intérêt collectif. Le lecteur reconnaîtra sans peine l'évolution actuelle des sociétés dites développées ou en développement rapide. On voit que les progrès en

thermodynamique hors équilibre permettent d'ores et déjà de mieux comprendre l'évolution économique.

Nous avons vu que les sociétés humaines forment un réseau neuronal d'agents interconnectés. On peut lui appliquer le modèle de cerveau de Bak et Stassinopoulos. La figure 1 montre un schéma de ce modèle. Dans les simulations numériques l'information reçue se limite à un signal binaire, par exemple un feu vert ou rouge. L'action mécanique qui en résulte est également binaire, par exemple appuyer sur un levier droit ou gauche. Lorsque le bon levier est choisi, tous les neurones reçoivent le même signal de satisfaction lié à un apport d'énergie: pour dresser un animal, on lui apporte de la nourriture.

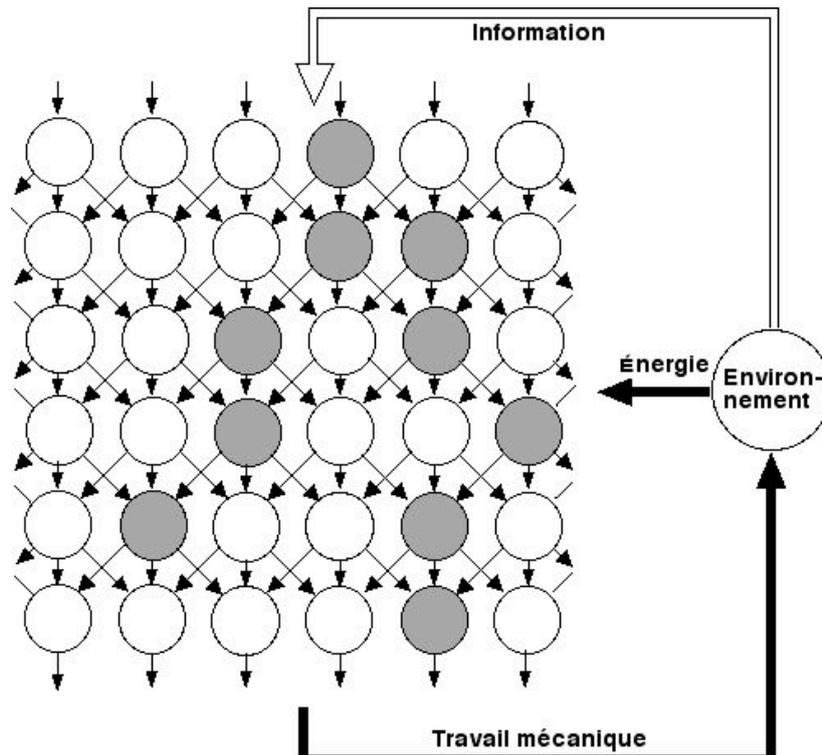


Figure 1. Le modèle de cerveau de Bak et Stassinopoulos. Les neurones excités (cercles gris) forment un domaine d'Ising. Lorsque ce domaine percole, il connecte une information reçue à une action (travail mécanique). Le modèle s'auto-organise de façon à maximiser l'énergie reçue.

La figure 1 représente un réseau régulier de neurones mais les simulations faites avec des réseaux quelconques marchent également. Dans le cas d'une société humaine, chaque agent peut aussi bien recevoir de l'information que déclencher une action. Il peut aussi communiquer à distance avec n'importe quel autre agent. Le schéma peut donc servir à modéliser l'économie dans une société faite d'individus tous interconnectés entre eux.

Comme toute structure dissipative, celle-ci reçoit de l'information de l'environnement et réagit en produisant du travail mécanique. La monnaie suit le circuit inverse de l'énergie. Le travail est accompagné d'un salaire qui permet de dépenser de l'énergie. Afin de maximiser son bien-être, chacun cherche à accroître sa richesse monétaire. C'est ainsi que, comme toute structure dissipative, la société maximise le flux d'énergie qui la traverse.

Un économiste sera surpris de voir que ce schéma ne comporte pas de flux de matière. La raison en est qu'une structure dissipative est, par définition, dans un état stationnaire. Toute matière y est recyclée. L'énergie nécessaire au recyclage est comptée dans l'énergie dissipée. Ce modèle s'applique donc à une économie dite « durable ». Si le recyclage n'est que partiel, alors la partie non recyclée est considérée comme une modification de l'environnement.

Dans un cerveau animal, l'ensemble des neurones excités forme des domaines d'Ising. Lorsqu'un domaine établit une connexion entre des neurones sensitifs et des neurones moteurs, on dit que le réseau percole. Dans un cerveau qui ne percole pas, les domaines d'Ising évoluent mais sans production de travail mécanique. Le cerveau se contente de réfléchir, sans passer à l'action.

Dans le cas d'une économie humaine, on peut assimiler l'excitation des neurones à la richesse monétaire des individus. Les signaux d'entrée expriment le besoin en produits ou services. La transmission des signaux correspond à des transactions financières. En l'absence de percolation, ces transactions se limitent à des placements financiers. Lorsque le réseau percole, il conduit à une offre commerciale. Dans ce schéma, l'économie financière représente les réflexions du cerveau global. L'économie de production traduit ses actions réelles.

Le modèle de Bak et Stassinopoulos ajuste automatiquement deux paramètres, l'intensité des connexions entre les neurones et leur seuil d'excitation. En économie, le premier paramètre correspond à l'intensité des échanges commerciaux, le second au seuil de richesse à partir duquel une transaction a lieu. Le modèle suppose que tout le monde puisse également profiter d'une offre, de façon parfaitement « démocratique » (4). C'est le cas par exemple d'une ligne de tramway ou d'un service de location de vélos. Si l'offre améliore le bien-être, elle intensifie tous les échanges commerciaux que ceux-ci soient directement liés à l'offre ou non. Dans le cas contraire, elle les diminue.

Le prix initial doit être suffisamment élevé pour rentabiliser l'offre mais suffisamment bas pour maintenir la demande. Les économistes parlent d'équilibre entre l'offre et la demande. Il s'agit en fait d'un seuil critique à partir duquel des avalanches se produisent. Les bénéfices des premiers échanges sont réinvestis pour produire davantage. Les prix baissent de façon à accroître la demande et continuer à investir. On assiste alors à des avalanches de profits. Comme l'ont montré B. Mandelbrot (1959) et P. Bak (1999), l'économie de marché est un processus de criticalité auto-organisée.

7. L'évolution des sociétés

La thermodynamique nous enseigne qu'aux points critiques se produisent des phénomènes de condensation comme le brouillard appelé « opalescence critique ». Dans le cas des sociétés humaines, ce sont les richesses qui se condensent. Liées aux avalanches, les inégalités de richesses se répartissent suivant une loi de puissance. C'est bien ce qu'a observé l'économiste Vilfredo Pareto.

Mais la mise sur le marché de produits de luxe ne bénéficie qu'aux riches. Elle n'intensifie les échanges commerciaux qu'entre les riches qui eux seuls continuent à s'enrichir. Il peut alors y avoir séparation de la société en deux phases, une phase « vapeur » de gens riches ayant conservé leur liberté d'action et une phase « liquide » de gens pauvres dont la liberté s'est considérablement amoindrie. La classe moyenne s'effondre.

Les gens pauvres ayant perdu tout pouvoir, l'action de la société se limite à celle des gens riches. Seule, une partie réduite du cerveau global continue à fonctionner. Mais plus les gens sont riches, plus ils dissipent d'énergie et plus ils font évoluer leur environnement. Ayant de plus en plus de mal à s'adapter à un environnement qui évolue de plus en plus vite, l'économie finit par s'effondrer. Même les économies dites « durables » s'effondrent.

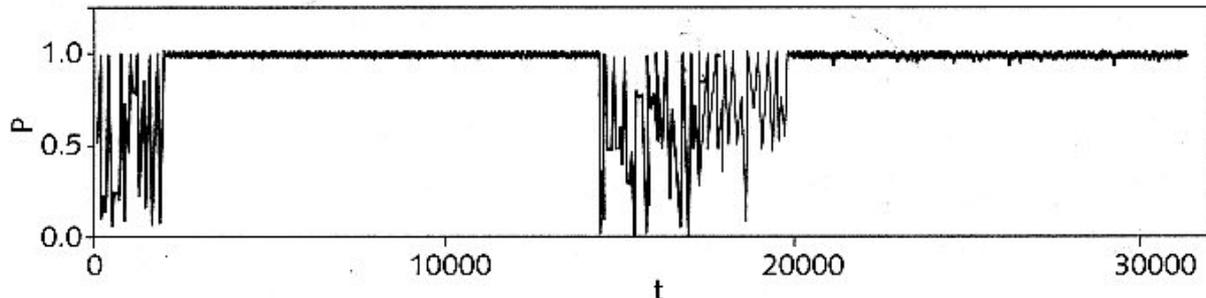


Figure 2. *Probabilité de bonne réponse en fonction du temps. Vers le milieu de l'échantillon, les réponses sont interverties. Le réseau neuronal met un certain temps à se reprogrammer.*

La figure 2 montre un exemple de simulation numérique du cerveau par Bak et Stassinopoulos. Après un certain nombre de fluctuations aléatoires, le pourcentage de bonnes réponses se stabilise au voisinage de 100%. Un peu plus tard, les signaux sont inversés. Le cerveau se reprogramme pour trouver la bonne réponse. C'est ce qui se passe quand l'environnement évolue. Si celui-ci évolue trop vite, le cerveau n'a plus le temps de se reprogrammer. Cela s'applique au cerveau global d'une société. Lorsque celui-ci n'est plus capable de s'adapter aux changements de l'environnement, la société s'effondre.

C'est ainsi que les sociétés s'organisent, prospèrent et périssent; d'autres les remplacent. Communisme ou libéralisme ne sont que des réponses correspondant à des phases particulières de leur évolution. Plus une société dispose d'énergie, plus elle se développe rapidement. La découverte des énergies fossiles et le progrès dans leur utilisation ont provoqué une véritable explosion démographique. Jamais l'humanité n'a fait évoluer aussi vite son environnement. Tandis que nos ressources pétrolières s'épuisent, le climat se réchauffe, la biodiversité diminue, la Terre est de plus en plus polluée. On peut donc s'attendre à un effondrement en chaîne de nos sociétés, à commencer par celles qui dissipent le plus d'énergie.

La question se pose alors de savoir s'il est possible d'éviter ou du moins de retarder l'effondrement d'une société. Pour cela, il lui faut évoluer suffisamment lentement pour avoir continuellement le temps de s'adapter. Cela implique qu'elle restreigne sa dissipation d'énergie de façon à rester au voisinage du point critique. Malheureusement restreindre le taux de dissipation n'est possible que dans le cadre d'une société unique ayant pris conscience du processus. Au dessus du point critique la compétition domine et la sélection naturelle fait que la dissipation d'énergie ne peut que s'accroître jusqu'à l'effondrement.

Per Bak a montré que le point critique est le point auquel, en moyenne, l'énergie se dissipe le plus vite. C'est pourquoi les structures dissipatives reviennent toujours au voisinage de ce point. Il donne comme exemple les embouteillages sur les autoroutes. Lorsque la vitesse du trafic augmente, il existe une vitesse critique au delà de laquelle des

embouteillages se produisent. C'est la vitesse à laquelle le flux de voitures est maximal. Comme on contrôle un flux de voitures, il faudrait contrôler le flux d'énergie dissipée par l'humanité de façon à rester constamment au voisinage du point critique. Celui-ci correspond à un juste équilibre entre l'intérêt des individus et celui de la communauté. Ce faisant, on limiterait les inégalités sociales, conciliant au mieux les trois désirs de liberté, d'égalité et de fraternité qui ont inspiré la révolution française et sont devenus la devise de sa république.

Il semble qu'à chaque itération du processus de criticalité auto-organisée, les nouvelles sociétés se rapprochent de cet idéal avant de s'en écarter à nouveau pour s'effondrer. Considérés comme des sociétés de cellules, les êtres vivants multicellulaires disposent de mécanismes leur permettant de réguler leur dissipation d'énergie. Ils atteignent ce que les biologistes appellent l'homéostasie. L'humanité atteindra-t-elle un jour l'état stationnaire caractéristique de l'homéostasie?

- (1) Dewar R. C., 2003. Information theory explanation of the fluctuation theorem, maximum entropy production and self-organized criticality in non-equilibrium stationary states. *J. Phys. A.: Math. Gen.* 36, No 3, p. 631-641.
- (2) Lotka, A. J., 1922a. Contribution to the energetics of evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 8, p. 147 & Lotka, A. J., 1922b. Natural selection as a physical principle. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 8, p. 151.
- (3) Wissner-Gross, A. D. and Freer, C. E., 2013. Causal entropic forces. *Phys. Rev. Lett.* 110, 168702.
- (4) Stassinopoulos, D. and Bak, P., 1995. Democratic reinforcement. A principle for brain function. *Phys. Rev. E* 51, 5033.

Bibliographie

- Bak, P. (1999), "How Nature Works", Princeton.
- Bloom, H. (2001), "The Global Brain", Wiley.
- Boltzmann, L. (1902, 1905), "Leçons sur la théorie des gaz", part. I et II.
- Carnot, S. (1824), "Réflexions sur la puissance motrice du feu".
- Comte, A. (1830), "Cours de philosophie positive", tome 1, leçon 2.
- Dewar, R. C. et al. (2013), "Beyond the Second Law", Springer.
- Jaynes, E. T. (2003), "Probability Theory. The logic of Science", Cambridge.
- Levy, P. (1994), "L'intelligence collective", La Découverte.
- Mandelbrot, B. (1959), "Fractales, hasard et finance", Flammarion.
- Mandelbrot, B. (2004), "The (Mis)Behaviour of Markets, Profile Books.
- Roddier, F. (2012), "Thermodynamique de l'évolution", Parole.
- Soddy, F. (2012), "Wealth, Virtual Wealth and Debt", George Allen & Unwin.
- Solé, R. V. (2011), "Phase Transitions", Princeton.