

François Roddier

LE TEMPS D'APPRENDRE

De la thermodynamique à l'économie

Le tourbillon de la vie



éditions
parole

De la thermodynamique à l'économie

Collection « Le temps d'apprendre »

La collection « Le temps d'apprendre » a pour mission de transmettre des connaissances, des idées, des points de vue, des témoignages, des vécus. Elle est tout à fait représentative du métier d'éditeur. Elle peut permettre au lecteur d'apprendre, de comprendre, d'entendre, de confronter ses propres idées, de se poser des questions, d'évoluer.

L'éditeur n'est rien d'autre qu'un passeur entre les deux rives d'un paysage déjà en place. Sur une rive il y a l'auteur et sur l'autre le lecteur. Le choix d'éditer, de prendre la décision et le risque de la traversée, n'est pas dû au fait d'aimer ou de ne pas aimer. C'est une question qu'un éditeur ne doit pas se poser, un sentiment auquel il ne doit pas se laisser aller, sous peine de déséquilibrer sa barque. Éditer procède plutôt du devoir de partage en donnant la parole. Car donner la parole c'est donner la vie. Donner la vie à toutes ces choses, toutes ces forces qui sommeillent aussi bien chez les auteurs que chez les lecteurs.

Particulièrement dans la collection « Le temps d'apprendre », c'est le point de vue de l'auteur qui s'exprime nourrissant ainsi la bibliodiversité.

François Roddier

De la thermodynamique à l'économie

Le tourbillon de la vie

éditions
parole

*À tous les jeunes
qui auront la lourde tâche
de construire une société meilleure.*

Remerciements

Je remercie ici tous ceux qui ont accepté de lire la première version de ce livre et m'ont fait des suggestions très pertinentes pour en améliorer la compréhension par un public aussi large que possible. Ma reconnaissance va tout particulièrement à Roger Bonnet, Vincent Cheynet, Alain Coussement, Jacques de Gerlache, André Gorius, Khellil Mehenni et Jean Sirmai. Enfin ce livre n'aurait jamais vu le jour sans l'aide et les encouragements de mon épouse et de ma fille Mireille.

On ne peut produire durablement
du travail mécanique qu'en effectuant
des *cycles de transformations* prenant
de la chaleur à une source chaude
pour en rendre une partie
à une source froide.

*Principe fondamental
de la thermodynamique
dû au physicien français
Sadi Carnot*

Avant propos

Ce livre s'adresse à un public aussi large que possible. Mais couvrir un domaine allant des sciences physiques aux sciences humaines en passant par la biologie demanderait toute une bibliothèque. Je n'en ai ni les connaissances ni les moyens. Le lecteur trouvera aisément ailleurs tout ce qui concerne la physique et la biologie. La nouveauté est dans son application à l'économie. J'ai donc rédigé ce petit livre en priorité à l'attention des économistes. Cela impliquait de vulgariser les notions essentielles de physique et de biologie, sans toutefois m'étendre sur l'économie qui n'est pas ma spécialité. J'espère surtout susciter de l'intérêt pour ces questions en montrant qu'elles ouvrent des perspectives pour une meilleure organisation de la société.

Cet ouvrage est en quelque sorte une suite à mon livre sur la *Thermodynamique de l'évolution*¹. On pourra s'y référer pour les questions d'énergie et leurs unités. À part cela, il peut être lu de façon indépendante du premier. Les deux livres se complètent. Ils expriment tous deux un point de vue de physicien. Le vivant comme le non-vivant fait partie de l'univers. Il obéit aux mêmes lois. Cependant, le vivant fait partie de ce qu'on appelle des « systèmes complexes ».

1. édité aux éditions Parole en 2012.

Ceux-ci se distinguent des autres par leur très grand nombre de variables et leur non-linéarité. Dans mon précédent livre, je montre comment on aborde aujourd'hui ces difficultés. Le problème du grand nombre de variables se résout par l'approche statistique. C'est le domaine de la mécanique statistique, appelée aussi thermodynamique. Le problème de la non-linéarité est celui de la dynamique non linéaire. Ce domaine a fait beaucoup de progrès grâce aux ordinateurs.

Parmi les systèmes complexes, le plus complexe d'entre tous est certainement ce qu'on appelle la vie. Les spécialistes eux-mêmes s'interrogent encore sur sa définition exacte. La thermodynamique a d'abord permis de développer la chimie. Elle est devenue ensuite indispensable pour comprendre la biochimie. Pour aller plus loin, il fallait introduire le concept de thermodynamique hors équilibre. On doit cette extension au physico-chimiste Ilya Prigogine. La vie est un processus thermodynamique hors équilibre.

Les systèmes thermodynamiques hors équilibre ont une propriété curieuse, celle de s'auto-organiser. Une de leur caractéristique est qu'ils le font de façon difficile à prévoir. Chaque jour, la pluie et le beau temps s'auto-organisent. Malgré les progrès de la météorologie, ils le font de façon difficile à prévoir, en particulier à long terme.

Il en est de même de la vie. Dans mon précédent livre, je montre comment la vie s'est auto-organisée sur terre. Elle s'est développée suivant un mécanisme décrit par l'astrophysicien Erich Jantsch, puis étudié par le physicien danois Per Bak qui lui a donné le nom de « criticalité auto-organisée ». On observe une alternance entre une « macroévolution » lente et une « microévolution » rapide. La macroévolution lente favorise les êtres vivants les mieux adaptés à leur environnement : c'est la sélection naturelle de Darwin, appelée aussi sélection K. La microévolution rapide favorise les êtres vivants les plus adaptables au changement ; on lui donne le nom de sélection r.

Ces deux types de sélection s'appliquent depuis toujours à l'évolution des gènes. Chez l'Homme, ils s'appliquent aujourd'hui à la culture. C'est ce qu'on appelle l'évolution culturelle. Une partie entière de mon précédent livre y est consacrée. L'évolution culturelle suit des lois analogues à celle de l'évolution génétique, mais elle est beaucoup plus rapide. Au lieu d'être transmise à travers les gènes, l'information y est transmise par imitation.

Comprendre l'évolution culturelle permet de comprendre l'auto-organisation des sociétés humaines. La section 12-4 de mon précédent livre traite de ce sujet. Elle implique que, si l'on veut bâtir une véritable science économique, celle-ci doit nécessairement reposer sur les lois de la thermodynamique. Cela me paraissait à l'époque une tâche difficile qui surpassait de loin les

buts que je m'étais assignés. J'ai donc provisoirement laissé ce sujet de côté.

L'occasion m'a été donnée d'y revenir lorsqu'on m'a demandé de faire un exposé sur les transitions économiques. Thermodynamiquement, il était clair qu'il s'agissait d'un processus de transition de phase. L'évolution génétique des espèces animales et végétales en donne de nombreux exemples. Il me fallait transposer ces exemples à l'évolution culturelle.

Le mécanisme suivant lequel les êtres vivants dissipent l'énergie s'appelle le métabolisme. Pour transposer ce mécanisme aux sociétés humaines, il fallait considérer l'économie comme le métabolisme des sociétés humaines et l'étudier de la même façon. En biochimie, l'étude du métabolisme se fait à l'aide de potentiels de Gibbs. J'ai donc été amené à définir des potentiels de Gibbs pour l'économie.

Cela pouvait se faire à l'aide de deux potentiels économiques dont l'un correspondait à la valeur d'usage et l'autre à la valeur d'échange. Le premier permettait d'étendre à l'économie la notion de pression. Il s'agit d'une pression sociale au sens d'Émile Durkheim. Le second permettait d'étendre la notion de température, une notion intuitive chez les économistes qui parlent de surchauffe économique.

Progressivement, je suis arrivé à l'idée qu'une société humaine ou un écosystème avaient en commun avec les fluides la propriété d'être un ensemble d'agents échangeant de l'information, c'est-à-dire de former un réseau neuronal, et que tout réseau neuronal traversé par un flux suffisant d'énergie s'auto-organise comme le font les fluides, l'exemple type étant celui de la casserole d'eau sur le feu (section II-1).

Exposer des concepts aussi abstraits à un large public devenait délicat. Je ne pouvais plus me contenter d'idées générales sur l'énergie et l'entropie comme je l'avais fait dans mon premier livre. Il me fallait aller plus loin. Mais rédiger un manuel au caractère nécessairement scolaire risquait de me priver d'emblée d'un grand nombre de lecteurs. C'est pourquoi j'ai choisi l'approche historique. J'y ai trouvé deux avantages. Le premier est de maintenir l'intérêt du lecteur. Le second est de suivre un ordre naturel, même s'il n'est pas nécessairement le plus logique (le second principe de la thermodynamique a été énoncé avant le premier).

Ce livre se divise en trois parties. La première traite de la thermodynamique dite classique, ou thermodynamique à l'équilibre. La seconde aborde la thermodynamique hors équilibre. Née dans la deuxième moitié du XX^e siècle, celle-ci repose sur la notion de structure dissipative. Les structures dissipatives s'auto-organisent spontanément et décrivent des cycles semblables

à ceux des machines thermiques. C'est le cas de tous les êtres vivants ou ensembles d'êtres vivants.

J'introduis ensuite la notion de réseau neuronal. Elle nous vient de la structure de notre propre cerveau. Les informaticiens s'y sont intéressés dans les années 80 dans le but de développer l'intelligence artificielle. Je montre la généralité de cette notion. Tout ensemble de molécules ou d'êtres vivants interagissant entre eux et parcouru par un flux permanent d'énergie peut être considéré comme un réseau neuronal. Je montre que les réseaux neuronaux sont des structures dissipatives : ils décrivent des cycles semblables à ceux des machines thermiques. On retrouve ces cycles dans le cycle diurne de notre propre cerveau.

La troisième partie aborde le sujet proprement dit, c'est-à-dire l'économie. Après avoir étendu à l'économie les notions de pression et de température, je pose la question de l'existence d'une équation d'état. En physique, une telle équation relie tous les états que peut prendre un même fluide (voir section I-8). Il en est de même des états économiques. Introduite pour l'étude des fluides condensables, l'équation de van der Waals s'avère convenir également à l'économie. Elle permet de retrouver les résultats de Gerhard Mensch sur les cycles économiques comme ceux de Turchin et Nefedov sur les cycles historiques. Elle explique pourquoi nos sociétés traversent périodiquement des phases de crises et pourquoi nos civilisations éventuellement s'effondrent.

La question se pose alors de savoir si l'on peut y porter remède. La réponse nous est donnée par l'organisation de notre propre organisme. Notre cerveau se divise en deux parties que les biologistes qualifient de « ago-antagonistes » : le système sympathique et le système parasympathique. Comme les pistons d'une machine thermique à deux cylindres, ils agissent en opposition l'un de l'autre. Le premier agit surtout de jour, le second principalement la nuit. Ils permettent de réguler notre dissipation d'énergie.

Je termine ce livre en montrant la correspondance manifeste qui existe entre d'une part le système sympathique et l'économie libérale et, d'autre part, le système parasympathique et l'économie dirigée. Je montre qu'il serait possible d'appliquer ce même mécanisme dit « ago-antagoniste » à l'économie grâce à l'emploi de deux monnaies, jouant le rôle de deux neurotransmetteurs différents. Cela permettrait de réguler notre dissipation d'énergie, ce qui éviterait à nos sociétés de s'effondrer.

Ce livre est un appel aux économistes pour qu'ils y réfléchissent très sérieusement. Certains comme Bernard Lietaer ou Philippe Derudder ont déjà écrit des livres sur ce sujet. Je leur apporte une confirmation de leur intuition à partir des sciences dites « exactes ». J'espère appuyer ainsi leurs idées en contribuant à l'organisation d'une société meilleure.

I.

La thermodynamique classique

1. Quelques notions de base

Les notions de *force*, de *travail* ou de *puissance* font partie du langage courant. Elles s'appliquent à des objets matériels aussi bien qu'à des êtres vivants ou des ensembles d'individus comme une société humaine. Un employeur parle du *travail* de ses employés. Un chef militaire parle de *force* de frappe pour décrire la puissance de son armée. Deux cerfs qui convoitent la même femelle appuient leurs fronts l'un contre l'autre. On dit qu'ils s'affrontent. Celui qui avance est reconnu être le plus fort. On appelle cela une démonstration de *force*. De même deux armées s'affrontent le long d'un front militaire.

Une difficulté du langage courant est qu'un même mot peut avoir plusieurs sens. Pour un physicien, une grandeur n'est parfaitement définie que si elle est mesurable. Une façon commode de mesurer une force est de la comparer à la force de pesanteur, c'est-à-dire au poids d'un même objet. Celui-ci est à très peu près le même partout à la surface du globe. La comparaison se fait à l'aide d'une balance.

En général, les deux bras de la balance sont égaux. Les Romains savaient cependant que l'on peut équilibrer un poids donné par un poids deux fois plus faible à condition de le mettre au bout d'un bras deux fois plus long. C'est le principe de la balance

romaine. Celle-ci utilise un seul poids qu'on fait coulisser le long du bras le plus long.

C'est aussi le principe du levier. Il permet de soulever de lourdes charges en s'appuyant sur un point fixe appelé point d'appui. La force à exercer est d'autant plus faible que le bras du levier est plus long. On cite souvent cette phrase d'Archimède : « *Donnez-moi un point d'appui et je soulèverai le monde.* »

Tous les navigateurs savent qu'il est difficile de manœuvrer une voile dès que le vent souffle un peu fort. Ils utilisent pour cela un palan appelé hale-bas. Celui-ci est constitué de deux mouffles ou groupes de poulies montées sur un même axe. Le moufle supérieur est fixé sur la bôme et l'autre au pied du mât. La force à exercer est divisée par le nombre de brins qui relient les deux mouffles.

Qu'il s'agisse de levier ou de palan, le déplacement à effectuer est d'autant plus grand que la force à exercer est plus réduite. Autrement dit, le produit de la force par le déplacement reste toujours le même. On dit que c'est une quantité qui se conserve et on l'appelle un invariant. Pour un physicien, l'invariance est le signe qu'il s'agit d'une grandeur fondamentale : ici elle mesure le travail effectué. Dans tous les cas de figure, le travail effectué reste le même. On lui donne le nom de « travail mécanique ».

Lorsqu'un cheval tire une charrue pour labourer un champ, il effectue un certain travail mécanique qui est le produit de la force qu'il exerce par le déplacement qu'il a effectué. Supposons maintenant qu'au lieu d'utiliser un cheval, on en utilise deux. Le travail sera le même, mais il sera fait en deux fois moins de temps. On dit que la puissance de deux chevaux est deux fois celle d'un seul cheval. C'est pourquoi les physiciens appellent « puissance » le travail effectué par unité de temps. Par analogie, on mesure encore de nos jours la puissance d'un moteur automobile en « chevaux-vapeur », ce qui nous amène à la thermodynamique.

Pour un résumé de ces notions, voir figure 1 et 2.

$$\begin{aligned} \text{Force} &= \text{masse} \times \text{accélération} \\ \text{Travail mécanique} &= \text{Force} \times \text{Déplacement} \\ \text{Puissance} &= \frac{\text{Travail mécanique}}{\text{Temps}} \end{aligned}$$

Figure 1. Les notions de force, de travail et de puissance en physique.

$$\text{Force} = \text{Pression} \times \text{Surface}$$

Le travail mécanique effectué par un piston est une fonction de sa surface et de son déplacement :

$$\begin{aligned}\text{Travail} &= \text{Force} \times \text{Déplacement} \\ &= \text{Pression} \times \text{Surface} \times \text{Déplacement} \\ &= \text{Pression} \times \text{Volume de gaz déplacé}\end{aligned}$$

Figure 2. Travail mécanique effectué par un piston.

2. Un peu d'histoire

Tandis que les membres d'une même société tendent à coopérer entre eux, ils sont souvent en compétition avec les membres d'autres sociétés. Un chef est alors tenté de montrer la supériorité de son propre peuple par une démonstration de force. Comme je l'ai dit plus haut, une façon commode de mesurer une force est de la comparer à la force de pesanteur. Pendant longtemps, les peuples ont montré leur force et leur cohésion par la taille des blocs de pierre qu'ils ont été capables de soulever.

Quiconque visite Cuzco, ville bâtie dans les Andes à 3 400 mètres d'altitude, ne peut être qu'impressionné par ses monuments incas. La taille des blocs de pierre et la précision de leur ajustement montrent toujours la puissance de leur civilisation. Dans des temps plus anciens, les Égyptiens ont construit leurs pyramides, tandis qu'à Babylone on construisait des ziggourats, dont l'une est restée célèbre sous le nom de tour de Babel.

Rien n'est plus tentant que d'aller démolir les tours des autres. Si, de nos jours, les techniques ont beaucoup évolué, les mentalités beaucoup moins. En 2016, les Américains ont choisi comme président un bâtisseur de tours, tandis que la date du 11 septembre 2001 est toujours dans leur mémoire.

Pendant des siècles, l'homme s'est contenté de ses propres forces ou de celle d'animaux domestiques. Sur mer, il n'avait pas d'autre choix que de ramer ou, occasionnellement, d'utiliser la force du vent. Sur terre, il a fallu attendre le Moyen Âge pour voir apparaître les moulins à eau et les moulins à vent, essentiellement pour moudre le grain.

Vers la fin XV^e siècle, les progrès de la navigation à voile permettaient à Christophe Colomb de découvrir l'Amérique. Au XVI^e siècle, les navires de Magellan faisaient le tour de la Terre. Au XVII^e siècle l'or arrivait en abondance du Pérou servant de monnaie aux échanges internationaux. Avec le commerce, des biens mais aussi des idées allaient être échangés à travers toute l'Europe.

En Italie, Galilée venait d'énoncer le principe d'inertie : livrée à elle-même, une masse décrit une trajectoire rectiligne à vitesse constante. Autrement dit, les forces sont liées non pas aux vitesses mais aux accélérations (voir figure 1). Avec l'invention de la lunette, il apportait des arguments en faveur de l'héliocentrisme copernicien et ouvrait de nouvelles perspectives à l'astronomie.

En France, Blaise Pascal reprenait les expériences de l'Italien Torricelli et mettait en évidence la pression atmosphérique. Une trentaine d'années plus tard, l'Anglais Boyle et le Français

Mariotte établissaient la relation entre le volume d'un gaz et sa pression. Mais c'est surtout l'Anglais Isaac Newton qui révolutionnait la pensée scientifique en introduisant la notion de la gravitation universelle.

À cette époque, l'église voyait d'un mauvais œil le développement des nouvelles idées, jugées dangereuses et souvent hérétiques. Elle n'a pas hésité à condamner Galilée pour son soutien à l'héliocentrisme. Niée par Aristote, l'existence du vide était, elle aussi, jugée contraire au dogme.

En 1648, les traités de Westphalie réorganisaient l'Europe sous la forme d'un ensemble d'États-nations indépendants, dotés chacun d'une religion d'État. En France, l'édit de Nantes avait mis fin aux guerres de religion, mais la monarchie absolue de Louis XIV imposait le catholicisme comme religion officielle. En 1685, Louis XIV révoquait l'édit de Nantes. À partir de ce moment-là, les idées nouvelles allaient se développer en Angleterre.

3. Les premières machines à vapeur

En cette deuxième moitié du XVII^e siècle, les communications se développent rapidement. Les intellectuels échangent une abondante correspondance et n'hésitent pas à voyager. Les idées remontent de l'Italie vers l'Angleterre.

En 1647, dans la région de Blois, naît d'une famille de Huguenots Denis Papin. Après avoir fait des études de médecine à Angers, il s'intéresse à la physique et réalise l'importance des forces mécaniques. Il passera sa vie à chercher les moyens d'en produire.

À l'âge de 24 ans, il est embauché à Paris par le Néerlandais Christian Huygens. Il y fait la connaissance de l'Allemand Leibniz avec lequel il maintiendra une longue correspondance. Avec de la poudre à canon, il démontre le principe d'un moteur à combustion interne.

En 1675, sur la recommandation de Huygens, Papin part en Angleterre travailler avec Robert Boyle. Il y étudie les propriétés de la vapeur d'eau et construit ce qu'il appelle un digesteur, l'ancêtre de la cocotte minute. Il s'intéresse alors au vide comme moyen de transporter au loin la force des rivières.

En 1688, les protestants prennent le pouvoir en Angleterre avec l'appui des Hollandais. Affecté par la révocation de l'édit de Nantes, Papin préfère aller poursuivre ses expériences en Allemagne où on lui offre un poste d'enseignant. C'est là qu'il développe les principes selon lesquels seront plus tard construites les premières machines à vapeur. Il y construit le premier bateau muni de roues à aubes, mais la plupart de ses inventions seront jugées farfelues, voire dangereuses.

En 1707, il est élu membre de l'académie de Berlin, mais il est poursuivi pour avoir provoqué un accident. Il met ses affaires dans son bateau et cherche à regagner Londres. Les mariners l'arrêtent et détruisent son bateau. Son épouse le quitte. Il arrive seul à Londres. Boyle est mort. Les Anglais Savary et Newcomen ont repris les idées de Denis Papin sans lui accorder le moindre crédit. N'intéressant plus personne, il meurt dans la misère.

En ce début du XVIII^e siècle, l'Angleterre s'industrialise. Peu à peu le charbon naturel remplace le charbon de bois pour les fonderies, mais les mines sont souvent inondées et il faut pomper l'eau. Dès 1698, l'Anglais Thomas Savery avait déposé un brevet couvrant le principe général d'une machine capable de pomper l'eau à l'aide du feu. Mais, sans piston, la machine de Savery était inefficace. Un mécanicien, Thomas Newcomen, accepte d'aider Savery. En 1712, il s'inspire des travaux de Denis Papin et réussit à construire la première machine capable de pomper l'eau.

C'est seulement en 1759 qu'un Écossais nommé James Watt est amené à réparer une machine de Newcomen. En mai 1765, Watt réalise le temps perdu à réchauffer le cylindre qu'on vient de refroidir pour condenser la vapeur. Il modifie avec succès la machine en condensant la vapeur dans un récipient séparé. Avec l'aide d'un industriel de Birmingham, Matthew Boulton, il obtient un brevet mais doit attendre huit ans les fonds nécessaires au développement.

La première machine de Watt est construite en 1776. En 1781, Watt et Boulton brevettent un système de bielle et manivelle pour convertir le mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation. En 1788, un régulateur à boules est ajouté pour stabiliser le mouvement. La machine à vapeur qui allait équiper les locomotives du siècle suivant était née.

4. De la pratique à la théorie

Pendant que les Anglais fabriquent les premières machines de Watt, les Français font la révolution. L'Europe entre en guerre contre la France. En juin 1793, un homme politique, Lazare Carnot, est nommé membre du comité de salut public. Les Français gagnent la guerre à Valmy. Lazare Carnot restera connu comme l'organisateur de la victoire.

Ingénieur militaire, Lazare Carnot est aussi un intellectuel qui s'intéresse à ce qu'on appelle encore à l'époque la philosophie naturelle. Élu membre de l'Académie des sciences, il nie la possibilité d'un mouvement perpétuel. Il s'intéresse également à l'économie qu'il considère comme une discipline scientifique. Nommé ministre de la Guerre par Napoléon 1^{er}, il sera parmi des fondateurs de l'école polytechnique.

En juin 1796, il a un fils qu'il prénomme Sadi, du nom d'un de ses poètes favoris. Il aura sur lui une influence considérable. Sadi va s'intéresser aux machines à vapeur. Bien que l'Anglais James Watt ait appris à les construire, personne ne sait vraiment pourquoi elles marchent ni comment les améliorer. On ignore encore la vraie nature de la chaleur. Celle-ci apparaît comme un fluide mystérieux qu'on appelle alors « le calorique ». On sait cependant que la chaleur est responsable du vent et des courants atmosphériques.

Sadi Carnot considère le travail mécanique comme une grandeur fondamentale, puisqu'elle se conserve (section I.1). Il exclut la possibilité de tout mouvement perpétuel. Il sait que lorsqu'on freine une roue sa température augmente. Dans une machine à vapeur, c'est l'inverse qui se produit : pour pouvoir ramener le piston au fond du cylindre, *il faut refroidir l'eau*. Plus on la refroidit, plus la machine accélère. Sadi Carnot en conclut que le travail mécanique est lié à la *chute de température du calorique*, comme il est produit par une chute d'eau dans un moulin.

Il a alors un trait de génie. Il appelle source de calorique tout système capable de fournir ou d'absorber du calorique sans changer de température. Il montre que, si la machine est parfaitement réversible (sans perte de calorique), son rendement est maximum et ne dépend que de la différence de température des deux sources. En particulier, elle ne dépend ni du fluide utilisé ni de son état (liquide ou vapeur). Aujourd'hui ce rendement maximum est appelé le rendement de Carnot.

Sadi Carnot décrira son raisonnement dans un mémoire intitulé : *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. La nature abstraite de son raisonnement fait que personne n'en réalisera vraiment la portée. Publié en 1824, cet ouvrage sera rapidement oublié.

Sadi Carnot meurt en 1832 d'une épidémie de choléra. La plupart de ses manuscrits seront brûlés pour éviter toute contagion. D'autres provenant de son frère Hippolyte seront publiés beaucoup plus tard. Ils montrent que Sadi Carnot avait entrevu la relation d'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique. Celle-ci ne sera vérifiée qu'une dizaine d'années plus tard par l'Anglais James Prescott Joule (section 5).

En 1834, un physicien, Émile Clapeyron, réalise enfin l'importance des idées de Carnot et réédite son manuscrit. L'Anglais William Thomson, alias lord Kelvin, n'en prendra connaissance qu'en 1851. Avec l'Allemand Rudolf Clausius, il jettera les bases d'une nouvelle science à laquelle il donnera le nom de thermodynamique. Elle reposera sur deux « principes ». Le premier énonce la découverte de Joule, le second celle de Carnot. Le second principe avait été énoncé en France avant même que le premier ne le soit en Angleterre.

5. La conservation de l'énergie

En 1840, l'Anglais James Prescott Joule s'intéresse au calorique. Il découvre qu'un courant électrique augmente la température de l'eau : pour lui, il y a création de calorique. Grâce à un appareil conçu en 1820 par le Français André-Marie Ampère (et qu'on appellera plus tard « ampèremètre »), Joule mesure l'intensité d'un courant électrique et montre que la quantité de calorique qu'il crée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant, un effet qu'on appelle depuis « l'effet Joule ».

Joule sera désormais convaincu que le travail mécanique ne se contente pas d'élever la température du calorique : il *crée* du calorique. Il va construire l'appareil nécessaire pour le prouver. Fils de brasseur, il construit une cuve semblable à celle utilisée dans une brasserie. Il y met de l'eau pure qu'il brasse à l'aide d'un mécanisme actionné par des poids et constate effectivement une légère augmentation de la température de l'eau. La descente des poids lui permet de déterminer exactement le travail mécanique fourni. Il est bien proportionnel à l'accroissement de la température de l'eau.

Désormais, on ne parlera plus de calorique mais de chaleur. Les frottements mécaniques convertissent du travail mécanique en chaleur, tandis qu'une machine à vapeur convertit de la chaleur

en travail mécanique. Chaleur et travail mécanique ne sont que des formes particulières d'une même grandeur qui se conserve, un « invariant » que lord Kelvin proposa d'appeler « énergie ». Il proposa aussi d'appeler « thermodynamique » la science qui étudie ces transformations.

Aujourd'hui, dans le système de mesure international, l'unité d'énergie est le « Joule ». C'est le travail mécanique effectué par une force de un Newton (équivalente à un poids d'environ 102 grammes) dont le point d'application se déplace de un mètre. La chaleur se mesure en calories. Une calorie permet d'élever un gramme d'eau de un degré Celcius. On admet communément qu'une énergie de un Joule équivaut à 4,18 calories. Notons toutefois que les nutritionnistes utilisent une unité appelée Calorie (avec un C majuscule) équivalente à mille calories. Elle permet d'élever un litre d'eau de 1°C .

Lord Kelvin est surtout connu pour sa découverte de l'échelle absolue de température. Il a montré que la pression de tous les gaz tend asymptotiquement vers zéro pour une même température de $-273,15^{\circ}\text{C}$ qu'il a appelée le zéro absolu. Depuis, on appelle température absolue la valeur obtenue en ajoutant 273,15 à la température usuelle mesurée en degrés Celcius. En mémoire de Lord Kelvin, on appelle cette unité de température le degré Kelvin. D'une façon générale, lorsqu'elle est suffisamment faible, la pression P d'un gaz est proportionnelle à sa

température absolue notée T et inversement proportionnelle à son volume V . Cette loi est connue sous le nom de « loi des gaz parfaits ».

À partir de 1850, James Prescott Joule et Lord Kelvin échangeront une correspondance régulière. Carnot avait imaginé une machine idéale *réversible*. Si on la fait marcher à l'envers, elle va utiliser du travail mécanique pour transférer de la chaleur de la source froide vers la source chaude. C'est le principe de la pompe à chaleur, celui de nos réfrigérateurs et climatiseurs. On constate en effet que, lorsqu'un gaz thermiquement isolé est comprimé, il s'échauffe. Lorsqu'on le détend, il se refroidit. En souvenir de cette constatation, on appelle cette dernière opération une détente de Joule-Thompson ou Joule-Kelvin.

Désormais, Lord Kelvin sera convaincu par les arguments de Joule. Il résumera le second principe de la thermodynamique en une seule phrase : il est impossible de convertir de la chaleur en travail mécanique à partir d'une seule source de chaleur. Le rendement maximum de la conversion, dit rendement de Carnot est $(T_2 - T_1)/T_2$ où T_2 est la température absolue de la source chaude et T_1 celle de la source froide. Plus cette dernière est basse, plus le rendement est élevé.

6. Rudolf Clausius et l'entropie

L'année 1850 est celle durant laquelle l'Allemand Rudolf Clausius prend connaissance du mémoire de Sadi Carnot. Convaincu par les idées de Joule sur la conservation de l'énergie, il en fait le premier principe de la thermodynamique et reformule les idées de Carnot sous le nom de second principe.

Il montre que pour une machine de Carnot parfaitement réversible, les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 échangées avec les deux sources sont proportionnelles à leurs températures absolues T_1 et T_2 , autrement dit les rapports Q_1/T_1 et Q_2/T_2 sont les mêmes. Il donnera à ce rapport le nom d'*entropie*. Il s'en suit que l'entropie d'un système isolé (où rien ne peut entrer ni sortir) est constante tant qu'il subit des transformations réversibles. Elle augmente s'il subit des transformations irréversibles. Clausius en fait l'énoncé du second principe.

Il nous faut dire maintenant quelques mots sur les notations et le vocabulaire utilisés par les physiciens. On appelle « énergie interne » la quantité totale d'énergie que contient un système et on la note par la lettre U . Une petite variation d'énergie interne sera notée dU . Le symbole « d » devant la lettre U est dû à Leibnitz. Il représente une petite différence entre deux valeurs successives de la quantité U . Ce symbole est à la base du calcul différentiel.

L'usage est de compter positivement les quantités qu'un système reçoit, et négativement celles qu'il fournit. Le premier principe de la thermodynamique implique que toute variation dU de son énergie interne peut s'écrire :

$$dU = W + Q \quad (1)$$

où W est le travail mécanique reçu par le système (en anglais « Work ») et Q la chaleur reçue. W et Q doivent bien sûr être mesurés avec la même unité, par exemple en joules ou en calories.

Nous avons vu que le travail mécanique fourni par des forces de pression est le produit de la pression P par la variation de volume dV du système (figure 2). Le travail reçu s'écrit :

$$W = -P \cdot dV \quad (2)$$

Le point entre P et dV représente une multiplication.

De la même façon, la chaleur reçue est le produit de la température absolue T par la variation d'entropie dS :

$$Q = T \cdot dS \quad (3)$$

La variation dU de l'énergie interne U est alors :

$$dU = -P.dV + T.dS \quad (4)$$

Les physiciens disent qu'un système est isolé s'il ne peut pas échanger (recevoir ou fournir) du travail mécanique ou de la chaleur avec le milieu extérieur. Le premier principe de la thermodynamique implique que l'énergie interne U d'un système isolé est constante : $dU = 0$.

Le second principe implique que son entropie S ne peut pas diminuer. Elle reste constante tant qu'il subit des transformations réversibles. Elle augmente dès qu'il subit des transformations irréversibles. Lorsqu'elle atteint sa valeur maximale, toute évolution cesse. On dit que le système a atteint l'équilibre thermodynamique.

7. La théorie cinétique des gaz

Au début du XIX^e siècle, avec les progrès de la chimie, il devenait clair que les constituants de la matière se combinent entre eux toujours dans les mêmes proportions, constatation que l'Anglais John Dalton venait d'énoncer en loi. L'hypothèse était que la matière est formée d'atomes simples qui se combinent entre eux pour former des molécules plus complexes, bien que personne n'ait jamais vu ni atomes ni molécules.

On doit à l'Italien Amadéo Avogadro d'avoir clairement montré qu'à la limite des gaz parfaits, un même volume de gaz, dans les mêmes conditions de température et de pression, contient toujours le même nombre de molécules, quel que soit le gaz considéré. Il s'en suit que la masse d'un même volume de gaz est proportionnelle à la masse de ses molécules. Il devenait alors possible de déterminer la masse relative des différentes molécules.

L'atome le plus léger étant celui de l'hydrogène, l'usage fut pris de prendre comme unité de masse, dite « atomique », la masse de 1 gramme d'hydrogène. On savait alors que les molécules d'hydrogène étaient constituées de deux atomes d'hydrogène. La masse « moléculaire » de l'hydrogène était donc de 2 grammes. On préfère aujourd'hui parler de masse « molaire » et dire que c'est la masse d'une « mole » d'hydrogène.

Dans les conditions dites normales de température et de pression ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 1 bar^2), une mole de gaz parfait occupe un volume de $22,4$ litres. Nous avons vu que ce volume contient toujours le même nombre de molécules, appelé nombre d'Avogadro. On sait aujourd'hui que ce nombre N est voisin du chiffre 6 suivi de 23 zéros !

À l'approximation dite des gaz « parfaits », on pouvait alors décrire l'état de n'importe quel gaz par une équation très simple appelée équation d'état des gaz parfaits. Celle-ci s'écrit :

$$P.V = n.R.T \quad (5)$$

où n est le nombre de moles de gaz et R une constante universelle appelée constante des gaz parfaits qui est proche de $8,31$ joule/degré Kelvin.

Vers le milieu du XIX^e siècle, avec les progrès de la thermodynamique, il devenait tentant d'essayer d'expliquer les propriétés des gaz à partir de l'hypothèse atomique, ce qu'ont fait avec succès le physicien anglais James Clark Maxwell et son homologue allemand Ludwig Boltzmann. Ils ont considéré les molécules comme des particules en mouvement qui n'interagissent entre elles qu'à l'occasion de collisions, auquel cas elles suivent les

2. Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est typiquement de 1 bar , soit 105 N/m^2 .

lois générales de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Maxwell est particulièrement connu pour avoir montré que les vitesses des molécules doivent être mathématiquement distribuées selon une courbe en cloche connue sous le nom de courbe de Gauss. La pression P était due aux impacts des molécules sur la paroi du récipient, tandis que la température T reflétait l'énergie cinétique des molécules.

Boltzmann a montré que, dans le cas d'une molécule complexe, son énergie cinétique est en moyenne égale à $kT/2$ par degré de liberté où $k = R/N$ est une constante universelle, appelée constante de Boltzmann, obtenue en divisant la constante R des gaz parfaits par le nombre N d'Avogadro.

8. La notion d'équation d'état

Les progrès spectaculaires accomplis au XIX^e siècle dans la compréhension des phénomènes physiques n'auraient pu avoir lieu sans un développement similaire des mathématiques. Dès le début du XVII^e siècle, René Descartes unifiait l'algèbre et la géométrie. Le développement du calcul infinitésimal par Newton et Leibnitz conduira à l'analyse algébrique puis à la géométrie analytique. Au XVIII^e siècle, ces progrès permettront de développer à leur tour la mécanique classique et l'optique.

Dans ces développements, la notion de fonction devint essentielle. De même que la longitude et la latitude indiquent la position d'un point quelconque à la surface du globe, de même deux nombres x et y , appelés « coordonnées », peuvent indiquer la position d'un point sur un plan. Le nombre x s'appelle l'abscisse du point tandis le nombre y est son ordonnée. Lorsque ces deux nombres sont liés par une relation algébrique, on dit que y est une fonction algébrique de x et on écrit $y = f(x)$. L'ensemble des points du plan satisfaisant cette relation forme un sous-ensemble du plan appelé courbe algébrique.

Une relation ou fonction f est dite linéaire si elle est de la forme $y = ax + b$, où a et b sont des constantes appelées coefficients de la relation. Une telle relation est représentée par une droite.

Une relation telle que $y = 1/x$ est représentée par une courbe algébrique appelée hyperbole. Lorsque x tend vers zéro, la courbe tend vers l'axe des y . Lorsque y tend vers 0, la courbe tend vers l'axe des x . Cela s'applique à tout couple de variables x, y tel que le produit $x \cdot y$ est constant.

Ainsi la loi de Boyle-Mariotte qui donne la pression P d'un gaz en fonction de son volume V nous dit que, pour une température T donnée, le produit $P \cdot V$ reste constant. Si l'on représente l'état du gaz par un point du plan d'abscisse V et d'ordonnée P alors, pour toute transformation isotherme (à température constante), ce point va se déplacer le long d'une hyperbole. À chaque température T correspond une hyperbole différente de sorte que l'état d'un gaz parfait peut être représenté par tout un réseau d'hyperboles différentes.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que des fonctions y d'une seule variable x . On peut aussi considérer des fonctions $z(x, y)$ de deux variables différentes x et y et représenter z par la hauteur d'un point au-dessus du plan défini par la relation $z(x, y) = 0$. Ainsi, on peut représenter l'état d'un gaz par un point de hauteur T au-dessus du plan $T = 0$, et de coordonnées horizontales P et V .

L'état d'une mole de gaz parfait étant décrit par la relation $P \cdot V = R \cdot T$ (voir section précédente), cet état est représenté par

un point de coordonnées P , V et T sur un réseau d'hyperboles formant une surface hyperbolique. Si l'on considère maintenant une quantité quelconque de gaz parfait, son état sera représenté par un point appartenant à toute une famille de surfaces hyperboliques, chacune caractérisée par le nombre n de moles de gaz mises en jeu.

Une relation telle que $P.V = n.R.T$ s'appelle une équation d'état. Cette équation particulière caractérise l'état d'un gaz idéal appelé gaz parfait. On sait que les gaz réels se rapprochent d'autant plus des gaz parfaits que leur densité est plus faible. À partir des années 1870, les physiciens vont s'intéresser au comportement des gaz réels et voir s'il est possible d'établir une équation d'état valable pour un gaz quelconque.

9. Les transitions de phase

Chacun sait, par expérience, qu'une même substance telle que l'eau peut être observée dans plusieurs états différents tels que la vapeur d'eau, l'eau liquide ou la glace. Les physiciens parlent alors de « phases » différentes. Ainsi la vapeur d'eau est de l'eau en phase gazeuse, tandis que la glace est de l'eau en phase solide. Le passage d'une phase vers une autre s'appelle une transition de phase. Ainsi l'ébullition est la transition d'une phase liquide vers une phase gazeuse. Lorsque la vapeur d'eau se condense en gouttelettes, il s'agit de la transition inverse d'une phase gazeuse vers une phase liquide.

Dans ce qui suit, nous prendrons comme exemple l'eau à l'état liquide ou à l'état vapeur. Comme pour tous les fluides, l'état d'une certaine quantité d'eau dépend de sa température T et de sa pression P . L'usage est de fixer la température T et de faire varier le volume V en mesurant la pression P . Si l'on porte la pression P mesurée en fonction de V et T , on obtient une surface représentée sur la figure 3. Les courbes tracées sur cette surface joignent l'ensemble des mesures faites à une même température. On appelle ces courbes des isothermes.

On remarque l'existence d'un point C particulier, appelé point critique, au-delà duquel les courbes changent d'allure. La température correspondant au point C s'appelle la température

critique. Pour l'eau, elle est voisine de $374\text{ }^{\circ}\text{C}$. La pression correspondante est environ 220 fois la pression atmosphérique au niveau de la mer. Pour des températures très supérieures à celles du point C, les isothermes tendent vers des hyperboles. Cela implique qu'à ces températures l'eau est sous forme gazeuse et que ce gaz tend à se comporter comme un gaz parfait.

Pour des températures inférieures à celle du point C, les isothermes comportent un palier horizontal appelé palier de condensation. Ce palier se trouve dans la zone marquée en sombre sur la figure. L'expérience montre que dans cette zone l'eau forme un mélange d'eau liquide et d'eau vapeur. Lorsqu'on comprime ce mélange, sa pression ne change pas, mais la vapeur d'eau se condense. Arrivée au bout du palier, toute la vapeur s'est condensée. Il ne reste plus que de l'eau liquide très peu compressible. La pression se met alors à augmenter très rapidement.

Ces propriétés s'appliquent à tous les fluides, mais la température et la pression du point critique diffèrent énormément d'un fluide à un autre. Les fluides pour lesquels le point critique se rapproche le plus des conditions ambiantes sont le dioxyde de carbone ($5,1\text{ bars}$ et $31,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) et l'hexafluorure de soufre ($3,7\text{ bars}$ et $45,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Plus sa température critique est élevée, plus un fluide est condensable. Les gaz les moins condensables sont les gaz dits rares ou nobles. Leurs propriétés sont proches de celles des gaz parfaits.

Nous avons vu (section 7) que l'hypothèse atomique rendait bien compte des propriétés des gaz parfaits à condition de considérer les molécules comme des particules indépendantes qui n'interagissent entre elles qu'à l'occasion de collisions, auquel cas elles suivent les lois générales de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Vers 1870, la question commençait à se poser de savoir comment modifier ces hypothèses pour rendre compte des propriétés physiques des fluides réels.

L'idée vint tout naturellement que si la vapeur d'eau se condense en gouttelettes c'est qu'une force d'attraction doit attirer les molécules d'eau les unes vers les autres et les maintenir ensemble. Pour ne pas perturber les collisions, cette force d'attraction ne devait agir que si les molécules d'eau sont suffisamment proches les unes des autres.

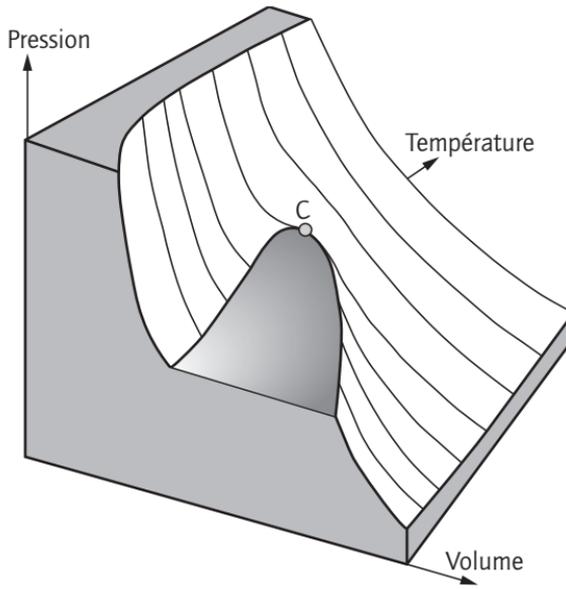


Figure 3. État d'un fluide au voisinage de son point critique C. La zone sombre en dessous du point C est une zone de condensation. À l'intérieur de cette zone, une phase liquide est en équilibre avec une phase vapeur.

10. L'équation de van der Waals

Né aux Pays-Bas en 1837, van der Waals a d'abord été instituteur puis professeur de physique à La Haye. En 1873, il soutint une thèse très remarquée sur la continuité entre l'état liquide et l'état gazeux. Comme d'autres physiciens de l'époque, van der Waals s'interrogeait sur la nature des forces d'attraction moléculaires qui permettent aux fluides de se condenser.

Très proches des gaz parfaits, les gaz dits « nobles » tels que l'hélium, l'argon ou le néon semblaient à l'époque impossibles à condenser. Constituées d'un seul atome, leurs molécules sont chimiquement inertes. Beaucoup plus réactives chimiquement, les molécules d'azote ou d'oxygène sont constituées de deux atomes. Les propriétés de ces gaz s'écartent davantage de celle des gaz parfaits. En 1877, on réussit pour la première fois à les condenser sous forme liquide.

Il vint naturellement à l'idée de van der Waals que les forces d'attraction responsables de cette condensation étaient de nature dipolaire. De même que les aimants s'attirent parce qu'ils ont un pôle Nord et un pôle Sud distincts, de même les molécules d'azote ou d'oxygène s'attiraient entre elles parce que le centre de leurs charges positives était distinct du centre de leurs charges négatives. Cela permettait aux charges positives d'une molécule d'attirer les charges négatives d'une autre. Depuis, ce

type de forces d'attraction porte le nom de forces de van der Waals.

Un des mérites de van der Waals est d'avoir proposé une équation d'état (voir section 8) pour représenter les gaz réels. Quoiqu'imparfaite, l'équation de van der Waals représente assez bien les propriétés des gaz réels. Pour le lecteur non rebuté par les expressions mathématiques, elle s'écrit :

$$(P + a/V^2).(V-b) = n.R.T \quad (6)$$

Par rapport à l'équation (5) des gaz parfaits (section 7), elle comporte deux termes correctifs qui s'ajoutent l'un à la pression P , l'autre au volume V . À la pression P , il faut ajouter une pression supplémentaire d'autant plus grande que le volume V est petit. Cette pression supplémentaire correspond aux forces d'attraction dipolaires entre les molécules. Quant au coefficient b , il correspond au volume occupé par les molécules lorsqu'elles sont au contact les unes des autres. Le volume V du gaz ne saurait donc être inférieur à b .

La figure 4 montre les isothermes (courbes à température constante) de l'équation de van der Waals. On retrouve bien l'allure générale des isothermes de la figure 3. Le point C est le point critique. En dessous du point C, les isothermes de van der Waals ont une partie ascendante. Elle représente des états

instables, donc inobservables, pour lesquels la pression diminue avec le volume. La courbe en cloche détermine une zone dite de condensation à l'intérieur de laquelle le fluide se sépare en deux phases : une phase liquide et une phase gazeuse. À l'intérieur de cette zone, les isothermes doivent être remplacées par des segments de droites horizontaux appelés « paliers de condensation ».

Moyennant ces modifications, l'équation de van der Waals rendait compte des observations. Celles-ci s'expliquaient par une combinaison de forces d'attraction à courtes distances et de répulsion au cours des collisions. En élevant la température au-dessus de celle du point critique, on pouvait passer continûment de l'état liquide à l'état gazeux : d'où le titre de la thèse de van der Waals.

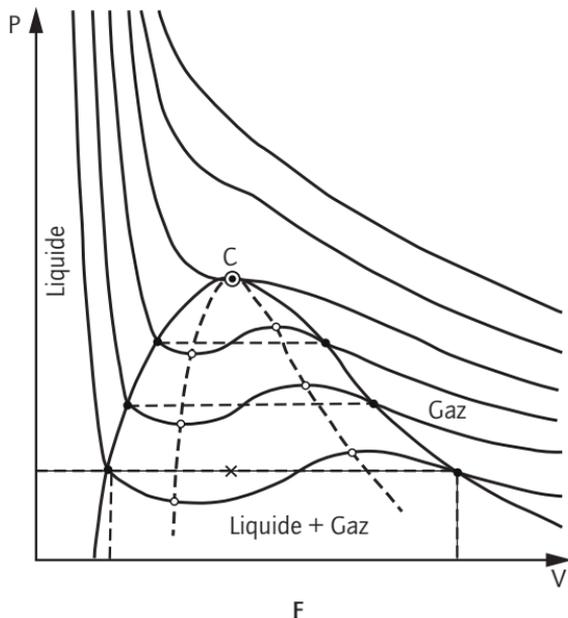


Figure 4. Isothermes de van der Waals. La zone située à l'intérieur de la courbe en cloche sous le point C est la zone de condensation. À l'intérieur de cette zone, une phase liquide est en équilibre avec une phase vapeur.

1 1. Boltzmann et l'entropie.

Vers la fin du XIX^e siècle, l'hypothèse atomique paraissait de plus en plus vraisemblable. L'application des lois de la mécanique à ces particules hypothétiques rendait parfaitement compte des propriétés de la matière, notamment celle des gaz. La pression s'expliquait par l'impact des molécules sur les parois du récipient, tandis que la température était le reflet de leur agitation.

Il ne restait plus qu'à interpréter cette grandeur mystérieuse à laquelle Clausius avait donné le nom d'entropie (section 6). On doit cette interprétation au physicien autrichien Boltzmann. Clausius avait montré que l'entropie d'un système isolé augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondant à l'équilibre thermodynamique. À ce moment-là, les différences de température s'estompent et les mouvements à grande échelle s'arrêtent.

Si la température était le reflet de l'agitation thermique des molécules alors, *à l'équilibre*, leur vitesse d'agitation devait, en moyenne, être la même pour toutes les molécules. Boltzmann établit qu'à l'équilibre thermodynamique l'énergie cinétique moyenne des molécules valait $kT/2$ par degré de liberté (paramètre du mouvement), où T est la température absolue et k une constante universelle, appelée constante de Boltzmann, égale à R/N où R est la constante des gaz parfaits et N la constante d'Avogadro (voir section 7).

Lorsqu'une certaine quantité de chaleur Q se dissipe dans un gaz, elle se répartit non seulement entre toutes les molécules du gaz mais aussi entre tous les degrés de liberté de ses molécules. À l'équilibre, elle est uniformément répartie. Le nombre de degrés de liberté entre lesquels elle est distribuée est $2Q/kT$. On reconnaît ici l'expression de l'entropie au facteur $2/k$ près. Ainsi l'entropie mesure le nombre de degrés de liberté entre lesquels l'énergie est distribuée.

Le mot « *degré de liberté* » désigne tout paramètre décrivant un mouvement. Ainsi une molécule ponctuelle a 6 degrés de liberté. Trois caractérisent sa position dans l'espace. Les trois autres sont les composantes de sa vitesse dans l'espace. Une molécule plus complexe a aussi des degrés de liberté de rotation et de vibration. L'ensemble de tous ces paramètres, appliqués à chaque molécule, forme un espace mathématique à un très grand nombre de dimensions, appelé espace des phases. Chaque point de cet espace représente un état microscopique particulier (voir encadré figure5).

Ainsi, l'état macroscopique d'un système tel qu'on l'observe (pression, température, etc.) correspond à un très grand nombre d'états microscopiques possibles. Les points représentatifs de ces états microscopiques occupent un certain volume Ω de l'espace des phases. Plus Ω est grand plus l'entropie S du système est élevée.

Considérons deux systèmes indépendants. L'un a un espace des phases à n_1 dimensions, l'autre à n_2 dimensions. L'état macroscopique du premier correspond à un volume Ω_1 , celui du second à un volume Ω_2 . L'espace des phases de l'ensemble des deux systèmes a pour dimensions le produit $n_1.n_2$. Dans cet espace, l'état macroscopique de l'ensemble occupe un volume $\Omega_1.\Omega_2$, mais l'entropie de l'ensemble est la somme S_1+S_2 des entropies de chacun. Cela implique que la relation entre S et Ω est logarithmique. Boltzmann a établi qu'à l'équilibre, l'entropie d'un système est $S = k.\log \Omega$. Cette formule a été gravée sur sa tombe au cimetière de Vienne. Au lieu de Ω , Boltzmann utilisait la notation W , aujourd'hui réservée au travail mécanique (en anglais : work).

Au début du XX^e siècle, l'hypothèse atomique était encore mise en doute par certains physiciens, notamment dans l'entourage de Boltzmann. Mal compris, son travail était critiqué. En 1906, il se suicida.

Chacun sait que la taille d'un objet est caractérisée par trois nombres : sa largeur, sa hauteur et sa profondeur.

Son volume se mesure en mètres cubes. Par exemple, le volume d'un cylindre est le *produit* de sa surface de base (en m^2) par sa hauteur (en m). On dit que l'espace dans lequel nous vivons a trois dimensions.

Il est courant en mathématiques de considérer des espaces à un nombre n quelconque de dimensions.

Si l'on décompose ces espaces en deux sous espaces de dimensions p et q tels que $p + q = n$, alors le volume d'un objet à n dimensions est le *produit* des « volumes » qu'il occupe dans chacun de ces sous-espaces.

Figure 5. Espaces à nombre quelconque de dimensions

12. La contribution de Gibbs

De l'autre côté de l'Atlantique, un physicien américain nommé Josiah Willard Gibbs s'était lui aussi intéressé à la thermodynamique qu'il dénomma mécanique statistique. Esprit abstrait, Gibbs est connu pour avoir été mal compris, notamment par ses étudiants. On lui doit d'avoir généralisé l'expression de Boltzmann pour l'entropie aux situations hors équilibre.

Nous avons vu (section 11) qu'à l'équilibre la chaleur est uniformément distribuée entre tous les états microscopiques d'un même système thermodynamique. Pour généraliser l'expression de Boltzmann, il suffisait d'assigner des probabilités p_i différentes à des états microscopiques différents. Si p_i est la probabilité d'un état microscopique i , alors l'entropie du système est $S = -k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$ où la somme \sum est étendue à tous les états microscopiques i . Tout lecteur ayant une formation élémentaire en mathématiques vérifiera aisément que si le système a Ω états microscopiques ayant tous la même probabilité $1/\Omega$, on retrouve bien l'expression de l'entropie donnée par Boltzmann. L'expression de Gibbs allait prendre de l'importance au cours du XX^e siècle.

Dès le XIX^e siècle, les physiciens ont cherché à généraliser la thermodynamique à d'autres formes d'énergie que l'énergie mécanique. Ainsi, l'Allemand von Helmholtz a appelé *énergie*

libre toute forme d'énergie intégralement convertible en énergie mécanique. C'est le cas par exemple de l'énergie électrique. Nous avons vu (section 6) qu'une quantité élémentaire d'énergie mécanique se met sous la forme $P.dV$ tandis qu'une quantité élémentaire de chaleur se met sous la forme $T.dS$. De même, une quantité élémentaire d'énergie électrique se met sous la forme $V.dq$ où V est un potentiel électrique et dq une charge électrique élémentaire. Par extension, un couple thermoélectrique peut être considéré comme une machine de Carnot fournissant de l'énergie électrique à partir de sources de chaleur de températures différentes.

Les grandeurs qui ne dépendent pas de la taille du système comme la pression, la température ou le potentiel électrique sont dites intensives. Celles qui en dépendent comme le volume, l'entropie ou la charge électrique sont dites extensives. On voit que toute variation dU de l'énergie interne d'un système peut se mettre sous la forme du produit d'une quantité intensive par la variation d'une quantité extensive.

Cela a conduit Gibbs à généraliser la mécanique statistique aux échanges de matière. Tout apport de matière augmente l'énergie interne d'un système d'une quantité $\mu.dn$ ou dn représente la quantité de matière fournie et μ son potentiel thermodynamique appelé aussi potentiel de Gibbs.

Cela a permis au Français Pierre Duhem d'appliquer la thermodynamique à la chimie. Dans ce cas μ porte le nom de potentiel chimique. Il est exprimé en Calories par grammes sur nos paquets de nourriture. Nous verrons dans la troisième partie de ce livre comment la notion de potentiel thermodynamique peut s'appliquer à l'économie humaine.

13. Démons et paradoxes

Les notions de pression ou de volume font appel au sens commun. Lorsque quelqu'un ouvre une bouteille de champagne et que le bouchon saute en l'air, vous constatez que le liquide y est sous *pression*. Selon que votre verre est plus ou moins plein, le *volume* de liquide qu'on vous a versé est plus ou moins grand. Sa *température* est aussi une grandeur tangible. Vous constaterez facilement que le champagne est servi bien frais. Par comparaison, la notion d'*entropie* apparaît mystérieuse. Depuis sa définition par Clausius, des générations de physiciens se sont penchées sur sa signification concrète.

Le premier n'est pas le moindre. Il s'agit du physicien anglais James Clark Maxwell lui-même. Il a proposé le raisonnement suivant. Imaginons un récipient isolé du monde extérieur et formé de deux volumes communiquant entre eux à travers un petit orifice. À l'équilibre, la température est la même dans les deux volumes. Imaginons maintenant qu'un « démon » puisse contrôler le passage des molécules à travers l'orifice en faisant glisser sur elle-même une cloison très légère et bien huilée. Le travail nécessaire pour faire glisser cette cloison sur elle-même peut être aussi petit que l'on veut.

Supposons maintenant que le « démon » laisse toujours passer les molécules les plus rapides du même côté et les molécules les

plus lentes de l'autre. Au bout d'un certain temps une différence de température va apparaître entre les deux côtés, bien que le démon ait fourni un travail arbitrairement petit. L'entropie du système aura diminué, ce qui est contraire au principe disant que l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter. En termes d'aujourd'hui, on pourrait dire qu'on a fabriqué un réfrigérateur qui ne consomme pas d'électricité, ce qui est bien évidemment impossible. J'anticipe en disant que ceci montre que l'entropie d'un système dépend de notre connaissance des propriétés individuelles de ses molécules.

Un peu plus tard, Gibbs arrivait à la même conclusion en introduisant la notion d'entropie de mélange. Considérons un système isolé formé de deux récipients séparés par une cloison amovible. Chacun des récipients contient le même gaz à la même température et sous la même pression. Retirons (sans travail) la cloison amovible en la faisant glisser sur elle-même. L'état macroscopique du système n'a pas changé. En particulier, son entropie reste la même. Supposons maintenant que quelqu'un vous apprenne que les deux récipients ne contenaient pas le même gaz mais des isotopes d'apparence et de propriétés voisines. Le fait de retirer la cloison a mélangé irréversiblement les deux isotopes.

L'ensemble des deux gaz forme un système thermodynamique isolé. Dans le premier cas (gaz identiques), son entropie n'a pas

changé. Dans le second cas (gaz différents), le système a subi une transformation irréversible, donc son entropie a augmenté. À nouveau, on constate que l'entropie d'un système dépend de la connaissance que nous avons du système. Pour un observateur qui croit que les deux gaz sont les mêmes, l'entropie du système n'a pas changé. Pour un observateur qui sait que les deux gaz sont différents, l'entropie a augmenté. C'est ce qu'on appelle le « paradoxe de Gibbs ».

Pour en revenir au champagne, son entropie mesure les informations manquantes, mais que nous aimerions bien connaître. Par exemple, sa marque et son millésime, surtout si on les soupçonne d'être prestigieux...

14. L'entropie au XX^e siècle

On peut dire que les physiciens ont passé le XX^e siècle à s'interroger sur la notion d'entropie. Le premier est sans doute Leó Szilárd. Reprenant le raisonnement de Maxwell, il considère un piston fermant un cylindre contenant une seule molécule chauffée à haute température. Il imagine un dispositif capable de détecter la position de la molécule. Lorsque celle-ci est au fond du cylindre, le piston peut être repoussé sans effort. Ultérieurement, le choc de la molécule sur le piston va produire du travail mécanique, tout en diminuant la température de cette dernière. On peut répéter l'opération jusqu'à ce que la molécule soit froide. Ainsi la *connaissance* de la position de la molécule permet de convertir intégralement de la chaleur en travail mécanique, en s'affranchissant des limites de Carnot.

Vers la fin de sa vie, Erwin Schrödinger s'interroge lui aussi sur la notion d'entropie. Il constate que les êtres vivants sont des systèmes ordonnés (donc à faible entropie) qui maintiennent leur ordre grâce à un apport régulier d'*information* génétique qu'il qualifie de « néguentropie ». Mais c'est à Claude Shannon qu'on doit un progrès décisif en la matière. En 1948, il travaille sur la transmission des signaux et s'interroge sur la notion d'information. Cherchant une mesure de la quantité d'information transmise, il aboutit à une expression en tout point semblable à celle de Gibbs pour l'entropie, à part le signe qui est opposé.

À partir de cette date, les physiciens vont s'interroger sur la relation qu'il y a entre le concept d'entropie et celui d'information. En 1956, le physicien Léon Brillouin apporte une contribution majeure au débat en utilisant la formule de Shannon pour mesurer la quantité d'information apportée par le démon de Maxwell. Il montre que celle-ci est très exactement égale à la diminution d'entropie du système. Ainsi entropie et information sont bien des mesures d'une même grandeur physique (au signe près) : toute augmentation d'entropie correspond à une perte d'information.

La difficulté venait du fait que, appliquée à l'homme, l'information est longtemps apparue comme une notion subjective. Avec le développement de l'informatique, chacun de nous s'est habitué à considérer l'information comme une grandeur physique, mesurée en bits, que l'on peut stocker dans un ordinateur. De son côté, l'entropie est une grandeur thermodynamique mesurée en calories par degré Kelvin. On peut la convertir en bits par l'intermédiaire de la constante de Boltzmann, mais elle s'applique à une information très particulière : celle sur la position ou le mouvement des molécules. Un nouveau pas en avant va être franchi en 1961 par un informaticien Ralph Landauer.

À cette époque, on s'évertuait à miniaturiser les ordinateurs. Le temps de transmission de l'information étant limité par la vitesse de la lumière, plus un composant est petit, plus sa vitesse de

calcul est élevée, mais plus il chauffe. Les ingénieurs se demandaient s'il existe une limite inférieure au dégagement de chaleur. La réponse a été donnée par Ralph Landauer : chaque fois qu'on efface un bit d'information, on dégage nécessairement $kT/2$ calories. Perdre de l'information devenait une manière particulière de produire de l'entropie. Mais Shannon avait montré que toute production d'entropie créait une perte d'information. Il s'en suit que produire de l'entropie ou perdre de l'information sont des expressions synonymes. Entropie et information devenaient des grandeurs équivalentes au signe près.

En 2015, des chercheurs lyonnais (Lutz et al.) ont pu enfin mesurer expérimentalement la chaleur dégagée en effaçant un bit d'information. Elle est bien conforme aux prévisions.

15. La mémorisation de l'information

Bien que le XX^e siècle ait permis d'élucider la relation entre l'entropie et l'information, cette dernière est encore aujourd'hui souvent ressentie comme ayant un caractère subjectif. Chacun tend en effet à penser que l'information c'est ce que l'on sait, c'est-à-dire ce qui est mémorisé dans notre propre cerveau.

Avec le développement de l'informatique, on s'est cependant peu à peu habitué à l'idée que l'information peut aussi être mémorisée dans des objets matériels appelés « ordinateurs » ou, plus précisément, dans un de leurs composants désigné à juste titre sous le nom de « mémoire ». À ce titre, l'information est bien une grandeur physique mesurable en bits ou ses unités dérivées. Elle s'applique à tout ce qui peut être mémorisé (dans un cerveau comme dans tout autre dispositif physique).

Il est courant de parler de relation de cause à effet. On ne peut distinguer une cause de son effet que parce celle-ci précède toujours l'autre, ce qui nécessairement implique une mémorisation d'information. Cette mémorisation est caractéristique des phénomènes qui dépendent du sens du temps, c'est-à-dire des phénomènes irréversibles. On a vu que ceux-ci produisent de l'entropie, c'est-à-dire dissipent de l'énergie. On voit ainsi le lien direct qu'il y a entre le temps, la mémorisation de l'information et la dissipation de l'énergie.

On reconnaît une relation de cause à effet par le fait qu'une même cause produit toujours le même effet. L'irréversibilité du phénomène est due au fait que l'effet persiste après la cause ait cessé d'être. L'exemple type est celui de l'aimantation d'un morceau de fer placé dans un champ magnétique. On sait que cette aimantation persiste après suppression du champ magnétique, une propriété du fer appelée ferromagnétisme. Lorsqu'on place un morceau de fer dans un champ magnétique, son aimantation suit avec un certain retard et persiste après la suppression du champ magnétique. Il est possible de supprimer l'aimantation en inversant le sens du champ magnétique.

Lorsque le fer est placé dans un champ magnétique alternatif, son aimantation alterne également mais avec un certain retard dans le temps. Si l'on porte l'aimantation du fer en fonction du champ qui l'aimante, on obtient la courbe fermée de la figure 6 appelée cycle d'hystérésis. Une propriété des cycles d'hystérésis est que l'aire à l'intérieur du cycle mesure l'énergie dissipée, ce qui montre le lien entre l'irréversibilité et la dissipation d'énergie.

Vers la fin des années 50 sont apparus les premiers calculateurs de bureaux silencieux. Ils n'étaient plus mécaniques mais électroniques. Leur mémoire était constituée de tores de ferrites. Chaque tore était traversé par des fils conducteurs capables de l'aimanter dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens du

courant. Il pouvait donc mémoriser un bit d'information, 0 ou 1, suivant le sens de son aimantation. Ceci montre le lien entre l'irréversibilité et la mémorisation de l'information.

Une particularité de l'information mémorisée est qu'elle permet de reproduire un même effet un très grand nombre de fois. Comme le dit un proverbe chinois, donner un poisson à quelqu'un le nourrit pour un jour, lui apprendre à pêcher le nourrit pour la vie. Ceci illustre bien l'importance de la mémorisation de l'information dans la dissipation de l'énergie. Elle peut engendrer des cascades ou avalanches d'événements dissipant tous de l'énergie.

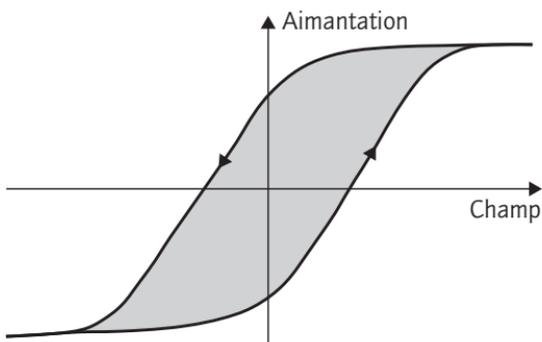


Figure 6. Exemple de cycle d'hystérésis

II.

La thermodynamique hors équilibre

1. L'exemple de la casserole d'eau sur le feu

Nous avons vu (section I) que la thermodynamique est née de l'étude des propriétés des fluides, notamment celles de l'eau. Nous prendrons à nouveau de l'eau comme exemple. Mettons de l'eau avec quelques glaçons dans une bouteille thermos. On a là un système isolé. Ni chaleur ni travail mécanique ne peuvent être fournis au contenu de la bouteille. Son énergie interne U reste constante.

L'expérience montre que les glaçons vont fondre et la température de l'eau va s'uniformiser. La transformation étant irréversible, l'entropie du système va augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale à l'équilibre thermodynamique. Cette évolution est générale : tout système isolé évolue de façon irréversible jusqu'à atteindre l'équilibre thermodynamique, qui est son état d'entropie maximale.

Pour maintenir un système thermodynamique hors équilibre, il faut lui apporter un flux d'énergie. Lorsque ce flux est constant, le système atteint un état de régime permanent qualifié d'état stationnaire. Une façon très simple de créer un tel système est de poser une casserole d'eau sur le feu. Un gradient de température s'établit à l'intérieur de la casserole. L'eau devient chaude au fond de la casserole mais reste plus froide à la surface. Divers phénomènes peuvent alors se produire.

Tant que le gradient de température reste suffisamment faible à l'intérieur de la casserole, rien de particulier ne s'observe. La chaleur se propage simplement de bas en haut à travers l'eau de la casserole. On dit qu'elle se propage par *conduction*. Plus agitées en bas de la casserole qu'en haut, les molécules d'eau transmettent leur agitation du bas vers le haut à travers leurs collisions, sans qu'il y ait de mouvement d'ensemble de l'eau. C'est ce qui se passe dans le manche de la casserole où la chaleur se propage aussi par conduction.

Lorsque le fond de la casserole devient suffisamment chaud, un certain nombre de molécules acquièrent suffisamment de vitesse pour entrer dans une région plus froide sans être ralenties de façon appréciable. Ces molécules provoquent alors des collisions en chaîne ou avalanches de collisions. Plus chaude que l'eau ambiante, l'eau provenant de ces avalanches est aussi moins dense. Elle subit une poussée d'Archimède vers le haut qui accélère leur mouvement. Apparaît alors ce qu'on appelle des courants de *convection*. L'eau chaude monte jusqu'à la surface, où elle se refroidit, puis redescend vers le fond de la casserole. On parle alors de *boucle de convection*.

La figure 7 montre le flux de chaleur en fonction du gradient vertical de température dans la casserole. Le flux de chaleur dû à la conduction est proportionnel au gradient de température. Celui dû à la convection est proportionnel au carré du gradient.

Tant que ce dernier est faible, la conduction domine. Lorsqu'il devient suffisamment important, la convection domine.

On voit que le processus qui dissipe le plus d'énergie l'emporte. Alfred Lotka a remarqué qu'on retrouve ce phénomène en biologie où la sélection naturelle favorise toujours les espèces qui dissipent le plus d'énergie. Ce phénomène est considéré aujourd'hui comme un principe fondamental de la thermodynamique hors équilibre. On l'appelle le principe de *production maximale d'entropie*.

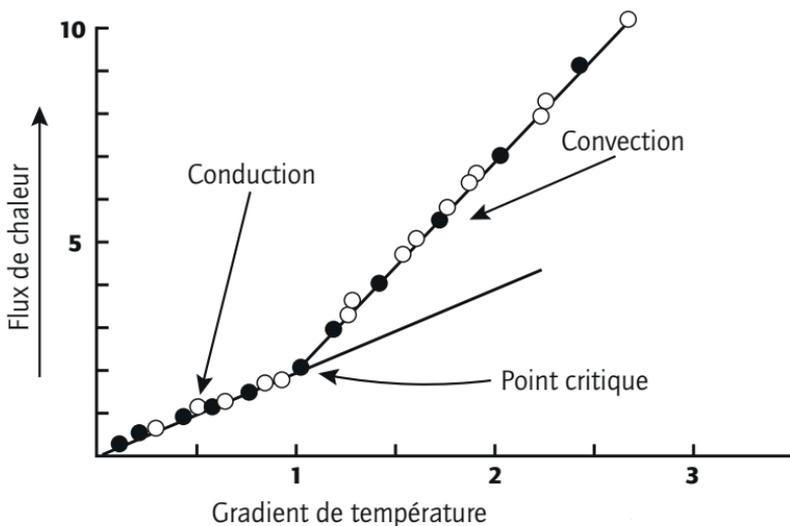


Figure 7. Conduction et convection (échelles logarithmiques)

2. Du linéaire au complexe

L'expérience montre que les phénomènes décrits dans les sections précédentes sont généraux. Ils s'appliquent à tous les systèmes thermodynamiques dits « ouverts », maintenus dans un même état dynamique grâce à un flux permanent d'énergie. Leur énergie interne reste constante, mais elle se renouvelle sans cesse. Ces systèmes dissipent de l'énergie donc produisent de l'entropie, mais cette dernière est évacuée aussi vite qu'elle est produite de sorte que l'état dynamique du système ne change pas : on dit qu'il est stationnaire.

Le flux d'énergie y est entretenu par le gradient d'une grandeur scalaire tel qu'un gradient de température, de pression ou de concentration chimique. Tant que ce gradient est faible, le flux d'énergie reste proportionnel au gradient. C'est le cas de la conduction de la chaleur décrite à la section II-1. C'est le cas aussi d'un fluide qui se déplace dans une canalisation. Tant que la vitesse du fluide est faible, l'écoulement reste laminaire. Due à la viscosité du fluide, la dissipation d'énergie est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Au-delà d'une certaine vitesse, dite critique, l'écoulement devient turbulent. La dissipation d'énergie devient alors proportionnelle au carré de la vitesse.

D'une façon générale, un système thermodynamique peut être maintenu hors équilibre grâce au gradient d'une grandeur

scalaire qui maintient un flux permanent d'énergie à travers le système. On observe alors deux régimes distincts. Tant que le flux d'énergie est suffisamment faible, celui-ci est proportionnel au gradient de la grandeur scalaire. On est dans un régime de dissipation linéaire. À partir d'un certain gradient dit critique, le flux d'énergie croît plus vite que le gradient. Le régime de dissipation devient non linéaire.

L'étude des systèmes thermodynamiques maintenus hors équilibre n'a commencé sérieusement qu'au XX^e siècle. Les progrès dans le régime linéaire sont dus au physicien Lars Onsager. Il s'est intéressé à des systèmes soumis à la fois à plusieurs flux d'énergie et a montré que ces flux ne sont pas indépendants. Si une différence de potentiel crée un flux d'électricité et une différence de température crée un flux de chaleur, alors une différence de potentiel peut aussi créer un flux de chaleur (effet Joule) tandis qu'une différence de température peut créer un flux d'électricité (effet thermoélectrique). Ces flux croisés sont liés par des relations qu'on appelle depuis les relations de réciprocité d'Onsager.

Il a fallu attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour progresser dans l'étude du régime non linéaire. On parle alors de systèmes complexes. Ceux-ci sont définis comme des systèmes *non linéaires* à un très grand nombre de degrés de liberté. Leur étude fait partie de la mécanique statistique, mais la non-linéarité lui

confère une difficulté supplémentaire. On doit ses progrès initiaux au physico-chimiste Ilya Prigogine.

Jusque là, les physiciens s'étaient habitués à l'idée que l'entropie est une grandeur qui ne peut qu'augmenter. Elle reste constante tant que les transformations sont réversibles. Elle augmente lorsque les transformations sont irréversibles. Nous avons vu que ceci n'est vrai que pour des systèmes fermés et isolés. Qu'en est-il des systèmes ouverts ? Prigogine a fait progresser leur étude en se limitant aux systèmes parcourus par un flux constant d'énergie. Reprenons l'exemple de la section précédente, celui de l'eau sur le feu. Celle-ci est parcourue de bas en haut par un flux de chaleur, donc d'entropie, qu'elle évacue à la surface. Au-delà du point critique, l'évacuation de l'entropie devient tellement importante que l'entropie interne du système décroît. Cela se traduit par l'apparition de mouvements ordonnés. Prigogine a montré qu'il s'agit là d'un processus universel.

3. L'émergence de structures ordonnées

Nous avons vu qu'un système fermé et isolé tend vers un état permanent dit d'équilibre thermodynamique, caractérisé par le fait qu'à l'intérieur du système toutes les différences de température s'estompent et tous les mouvements mécaniques s'arrêtent. On dit qu'il est dans un état d'équilibre statique.

De façon analogue, un système ouvert parcouru par un flux constant d'énergie tend lui aussi vers un état permanent, mais celui-ci n'est plus statique : il est dynamique. Lorsque le flux d'énergie est suffisant, des structures ordonnées apparaissent, mais celles-ci sont en mouvement. Prigogine leur a donné le nom de « structures dissipatives ». Le mouvement étant permanent, il est nécessairement périodique. Le cas de l'eau dans une casserole d'eau sur le feu (section II-1) en est un exemple.

On associe souvent la notion d'entropie à celle de désordre. Nous avons vu que l'état d'équilibre thermodynamique est celui d'entropie maximale. L'énergie mécanique y est uniformément distribuée entre tous les degrés de liberté du système, ce qui signifie : répartie au hasard entre toutes les molécules : le désordre y est le plus complet. Lorsque des mouvements ordonnés apparaissent, le mouvement des molécules n'est plus dû entièrement au hasard. Certains mouvements, dits d'ensemble, sont privilégiés. Les physiciens disent que l'entropie du système a

diminué : il y a apparition d'ordre. L'équivalence (au signe près) entre l'entropie et l'information (section I- 14) signifie que toute diminution d'entropie s'accompagne d'un apport d'information.

Shannon a montré que l'information se mesure en termes d'imprévisibilité. Par définition, un phénomène parfaitement prévu n'apporte aucune information. Toute information implique au départ une certaine imprévisibilité. Dans le cas de l'eau sur le feu, on sait que des mouvements vont apparaître, mais il est difficile de dire à quel moment ou à quel endroit exact de la casserole.

Dès que le système ordonné est un peu plus complexe, le caractère imprévisible de ses mouvements devient encore plus évident. Chauffée par le Soleil, l'atmosphère terrestre est parcourue par un flux permanent d'énergie allant de l'équateur aux pôles. Des mouvements ordonnés y apparaissent sous forme de cyclones et d'anticyclones. Chacun sait qu'il est très difficile de prédire leur évolution exacte à plus de quelques jours d'intervalle. Le comportement d'une tornade est encore plus imprévisible.

L'Américain Willard Gibbs et le Français Pierre Duhem ont étendu les lois de la thermodynamique aux réactions chimiques. Le flux permanent d'énergie qui nous vient du Soleil permet aussi l'apparition sur Terre de structures physico-chimiques

ordonnées. Prigogine a émis l'hypothèse que les êtres vivants sont de telles structures. Elles se sont développées sur Terre pour y dissiper l'énergie solaire. Beaucoup plus complexes que les structures atmosphériques, les êtres vivants ont un comportement encore plus imprévisible.

Les philosophes parlent d'*émergence*. Il s'agit clairement d'une propriété des systèmes complexes, c'est-à-dire non linéaires à un très grand nombre de degrés de liberté : l'apparition de comportements nouveaux, non prévisibles à partir de nos connaissances du système. Ce que les philosophes n'ont pas vu est qu'il s'agit d'une propriété dynamique propre aux systèmes traversés par un flux continu d'énergie. La notion d'émergence est liée à celle d'*auto-organisation*. Lorsqu'un système thermodynamique s'auto-organise, son entropie diminue. Ce qui conduit à des propriétés nouvelles dites émergentes. L'exemple type de propriété émergente est l'apparition de la vie. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons tout particulièrement aux structures vivantes.

4. Les écosystèmes : des structures dissipatives vivantes

L'origine de la vie est encore aujourd'hui discutée. Si certaines molécules organiques sont présentes dans l'espace, il paraît clair aujourd'hui que, sur notre planète, la vie s'est développée d'abord dans l'océan. Deux sources d'énergie sont envisageables : l'énergie géothermique et l'énergie solaire. L'évolution du métabolisme des êtres vivants laisse à penser qu'initialement la source d'énergie était géothermique. La découverte, près des bouches volcaniques, d'une vie sous-marine abondante vient à l'appui de cette hypothèse. Nous donnerons plus loin des arguments montrant que la vie est probablement née au voisinage du point critique de l'eau, à 2 200 m de profondeur et à une température de 374 °C.

La vie se serait ensuite déplacée vers la surface des océans où l'énergie solaire aurait pris le relai. De nouveaux métabolismes seraient apparus liés à un mécanisme nommé « photosynthèse ». Ce mécanisme, qui provoque un dégagement d'oxygène, est à l'origine des végétaux, notamment des végétaux marins. Ceux-ci se déplacent au gré des courants ; on les désigne sous le nom générique de phytoplancton. Avec les plantes terrestres, nous lui devons l'oxygène que nous respirons. Aujourd'hui encore, le phytoplancton est nécessaire au maintien de la vie sur terre, du moins telle que nous la connaissons.

Un écosystème marin peut être considéré comme une structure dissipative vivante. Conformément au principe de Carnot, il utilise deux sources de chaleur : une source chaude, le rayonnement solaire, et une source froide vers lequel la chaleur est évacuée : le ciel nocturne. Conformément au principe de Carnot, il décrit des cycles appelés chaînes trophiques. Le phytoplancton sert de nourriture au zooplancton, ensemble de micro-organismes de type animal qui nourrit les petits poissons. Ces derniers alimentent à leur tour les plus gros poissons. L'ensemble produit des déchets organiques qui servent d'engrais au phytoplancton.

On parle beaucoup aujourd'hui d'économie circulaire et de recyclage des déchets. On voit que l'homme ne fait que recopier ce que la nature fait depuis longtemps. C'est la base même de toute économie durable. Ce que l'on sait moins, c'est que la nature ne fait que suivre le second principe de la thermodynamique ou principe de Carnot (section I-5).

Comme l'eau dans une casserole sur le feu, toute structure dissipative décrit des cycles. Une particularité de ces cycles est de ne pas avoir de période propre. Leur période est liée au débit d'énergie. Plus le flux d'énergie qui traverse la structure est grand, plus la vitesse de parcours du cycle est élevée. Les physiciens appellent cela des oscillateurs de relaxation. Une particularité de ces oscillateurs est de se synchroniser aisément sur une période extérieure. Nous en verrons de nombreux exemples dans ce livre.

C'est le cas des écosystèmes, notamment des écosystèmes terrestres. Chacun sait qu'aux latitudes tempérées la végétation, mais aussi les insectes, évoluent avec les saisons. Il est intéressant de voir qu'on distingue quatre saisons comme on distingue quatre temps dans un cycle de Carnot, ou que l'on peut décomposer en quatre temps le mouvement de l'eau dans une casserole sur le feu. Nous comparons ces quatre temps au chapitre suivant. Leur universalité est telle que nous les retrouverons dans le fonctionnement du cerveau humain, les cycles économiques et même les cycles historiques qualifiés de cycles séculaires.

5. Le cycle des structures dissipatives

Traditionnellement, on distingue quatre temps ou phases dans le cycle d'une machine de Watt. Ces phases ont été décrites par Carnot lui-même : on les qualifie de *détente isotherme*, *détente adiabatique*, *compression isotherme* et *compression adiabatique*. Le mot *isotherme* signifie à température constante, le mot *adiabatique* signifie sans échange de chaleur. Au lieu d'*adiabatique* on dit aussi *isentropique* parce que l'entropie du système reste constante. Nous allons les passer brièvement en revue.

Durant la phase de *détente isotherme*, le fluide est en contact avec une source de chaleur, dite source chaude. Sa température est constante et élevée. Dans une machine à vapeur, le cylindre communique avec la chaudière. La pression de la vapeur pousse le piston tandis que le cylindre se remplit de vapeur chaude. Bien que la température du fluide reste constante, c'est une phase de *réchauffement* car le cylindre se réchauffe, causant une perte de rendement de la machine.

Durant la phase suivante, dite de *détente adiabatique* ou *isentropique*, le cylindre est isolé de la chaudière. Son volume continue à augmenter car la vapeur se détend. Sa pression diminue, ce qui cause son refroidissement. Lorsque la vapeur d'eau arrive à la pression atmosphérique extérieure, le mouvement du piston s'arrête.

Le cylindre est alors mis en contact avec une chambre à la température et à la pression atmosphérique ambiante appelée condenseur. Cette chambre joue le rôle de source froide. On entre dans une phase dite de *compression isotherme*. Le mouvement du piston s'inverse envoyant la vapeur d'eau dans le condenseur. Suit enfin une phase de compression *adiabatique* ou *isentropique* durant laquelle la vapeur d'eau du cylindre est comprimée de façon à amener sa pression et sa température aux valeurs de celles de la chaudière avec laquelle elle est remise en contact.

Par comparaison, on peut diviser également en quatre temps le mouvement de l'eau dans une casserole sur le feu. Durant la phase que j'ai précédemment qualifiée de *réchauffement*, l'eau se réchauffe au fond de la casserole. Durant la phase suivante, devenue moins dense, l'eau se détend et monte à la surface : c'est une phase de *détente*. À la surface, l'eau se refroidit : c'est une phase de *refroidissement*. Devenue plus dense, elle sombre de nouveau au fond de la casserole : c'est une phase de *compression*.

On peut, de même, diviser en quatre temps l'évolution d'un écosystème saisonnier. Passé l'équinoxe d'hiver, la terre se réchauffe lentement : c'est la phase de *germination*. Suit le printemps qui est une phase d'expansion ou de *croissance*. L'été est une phase où la végétation atteint son *apogée*, qualifiée en anglais de « *climax* ». La température redescend peu à peu. Enfin l'automne

est une phase de *régression* durant laquelle la plupart des arbres perdent leurs feuilles.

Le tableau de la figure 8 montre comment les phases de ces différents cycles se correspondent, montrant leur analogie. Dans tous les cas, on observe une suite de transformations prenant de la chaleur à une source chaude pour en rendre une partie à une source froide. L'ordre des phases est celui que j'ai utilisé pour décrire le mouvement de l'eau dans une cellule convective (section II-1).

Cycle de Carnot	Cycle convectif	Cycle des saisons
Expansion isotherme	Réchauffement	Hiver (germination)
Expansion isentropique	Ascension (expansion)	Printemps (croissance)
Compression isotherme	Refroidissement	Été (apogée ou climax)
Compression isentropique	Descente (compression)	Automne (régression)

Figure 8. Comparaison entre le cycle de Carnot, le cycle convectif et le cycle des saisons.

6. Les réseaux neuronaux

Nous avons vu que les *écosystèmes* s'auto-organisent pour dissiper l'énergie en décrivant des cycles de Carnot tout à fait analogues à ceux des *fluides*. Qu'ont-ils donc de commun ? La réponse tient dans la notion de « réseau neuronal ».

On appelle réseau neuronal un ensemble « d'agents » capables de mémoriser et d'échanger de l'information à la manière des neurones du cerveau. Cette notion a été développée vers les années 1980 lorsque les ingénieurs ont commencé à s'intéresser à l'intelligence artificielle et au rapport qu'il y a entre le cerveau et les ordinateurs. Elle présente un très grand intérêt pour comprendre la manière dont la nature fonctionne et, en particulier, s'auto-organise.

Le tableau de la figure 9 donne dix exemples de réseaux neuronaux différents. Chacun d'eux est capable de s'auto-organiser pour dissiper l'énergie. Nous verrons que tous le font en décrivant des cycles autour d'un point critique. Les deux derniers exemples s'appliquent aux sociétés humaines. On connaît depuis longtemps l'existence des cycles économiques. On découvre aujourd'hui celle des cycles historiques. Leur importance est primordiale pour comprendre la manière dont nos sociétés s'auto-organisent.

Le premier exemple est celui d'un ensemble d'atomes échangeant leurs moments cinétiques lors de collisions. C'est celui du gaz que nous supposerons parfait. Nous avons vu que, soumis à un flux d'énergie, celui peut s'organiser pour former des cellules convectives. De la même façon, l'atmosphère terrestre s'auto-organise en cyclones et anticyclones responsables du temps qu'il va faire et qui est si difficile à prévoir. Dans le cas des fluides condensables, les interactions dipolaires électriques prennent de l'importance (section I-10) faisant la différence entre la pluie et le beau temps.

Lorsqu'il y a échange d'électrons, des réactions chimiques se produisent dissipant l'énergie. Il arrive qu'en présence d'un flux continu d'énergie chimique, des réactions chimiques oscillantes apparaissent : l'exemple le plus connu porte le nom de réaction de Belousov et Zhabotinski. On admet aujourd'hui que la vie est apparue à la suite de réactions chimiques capables de produire leurs propres catalyseurs, appelés enzymes. C'est le phénomène d'autocatalyse. De telles réactions ont tendance à se reproduire et à croître exponentiellement.

Les êtres vivants eux-mêmes s'auto-organisent. Les bactéries forment des colonies en échangeant des plasmides, tandis que les insectes forment des essaims en échangeant des phéromones. De façon générale, les écosystèmes s'auto-organisent grâce aux échanges trophiques.

Les animaux dotés d'un système nerveux central ont une double organisation. Leurs organes échangent de l'information au moyen d'hormones, tandis que leurs neurones échangent de l'information au moyen de neurotransmetteurs. L'organisation de leur cerveau a conduit à la notion de réseau neuronal. On voit que ce type d'organisation n'a rien de particulier au cerveau : il est général.

Dans la section suivante, nous rappellerons la structure d'un réseau neuronal et montrerons qu'on peut l'assimiler à une machine de Carnot.

Flux d'énergie	Agents	Information	Structure
Chaleur	Molécules	Moments cinétiques	Convective
Chaleur	Molécules	Moments électriques	État condensé
Chimique	Molécules	Électrons	Chimique
Chimique	Molécules	Enzymes	Biochimique
Chimique	Bactéries	Plasmides	Colonie
Chimique	Insectes	Phéromones	Essaim
Chimique	Êtres vivants	Trophique	Écosystème
Chimique	Organes	Hormones	Être vivant
Multiple	Êtres humains	Monnaie	Économie
Multiple	Êtres humains	Langage	Sociologie

Fig. 9. Exemples de réseaux neuronaux (autres que le cerveau).

7. Réseau neuronal et machine thermique

Dans un précédent livre (*Thermodynamique de l'évolution*, chapitre 9), je décris le modèle de réseau neuronal développé par le physicien danois Per Bak et son collègue Dimitris Stassinopoulos. Leur schéma est reproduit ici sur la figure 10. Pour la clarté de l'exposé, le réseau représenté est régulier, mais il pourrait tout aussi bien être quelconque.

Un certain nombre de « neurones » sont sensibles à l'environnement. Ils sont représentés ici sur la rangée supérieure. Suivant l'état de l'environnement, ils deviennent excités ou non. Lorsqu'un neurone est excité, il peut communiquer son excitation à un neurone représenté dans la rangée suivante. La connexion dépend de deux paramètres : son seuil et son intensité. On peut les comparer à un seuil de tension et à une intensité électrique. Per Bak les compare à la hauteur d'un barrage et au flux d'eau qui passe par dessus le barrage.

Chaque neurone d'une rangée peut ainsi communiquer avec des neurones de la rangée suivante, de sorte que l'excitation d'un neurone à l'entrée du réseau peut finalement entraîner l'excitation d'un neurone à la sortie de celui-ci. On dit alors que le réseau percole, comme l'eau percole à travers le marc de café dans un percolateur.

Les neurones de la dernière rangée sont des neurones moteurs. Lorsqu'ils sont excités, ils déclenchent la contraction d'un muscle capable de produire du travail mécanique. Lorsque ce travail mécanique apporte de la nourriture à l'animal dont on simule le cerveau, alors ce dernier est récompensé par un apport d'énergie dont profitent tous les neurones. Cet apport augmente l'intensité de toutes connexions qu'elles soient responsables ou non de l'apport de nourriture.

La figure 10 montre que, comme une machine thermique, le modèle de Bak et Stassinopoulos a deux entrées et une sortie. La sortie correspond à la production de travail mécanique. Une des entrées correspond aux calories fournies par la nourriture : elle correspond à l'apport de calories de la source chaude à la machine thermique. L'autre entrée correspond à un apport d'information.

Au chapitre 14 de la partie I, nous avons vu qu'information et entropie sont des grandeurs de même nature mais de signe opposé. Cela implique que cette dernière entrée peut aussi être considérée comme une sortie d'entropie. Elle joue donc bien le rôle de la source froide dans une machine thermique. On sait, en effet, que toute machine thermique reçoit de l'entropie de sa source chaude pour en rendre à sa source froide. Idéalement, elle en évacue autant qu'elle en reçoit. C'est le cas de la machine de Carnot idéale dont le rendement est égal au rendement maximal de Carnot.

On a vu que l'apport d'information dû aux organes sensoriels provoque une réorganisation du cerveau, semblable à celle d'un solide qui cristallise. En physique, une telle auto-organisation correspond à ce qu'on appelle une « transition de phase abrupte ». Celles-ci sont caractérisées par le fait qu'elles dégagent de la chaleur. Ainsi, lorsqu'un liquide cristallise, on observe un dégagement de chaleur appelé chaleur latente de cristallisation. De même, lorsque le cerveau se réorganise, il dégage vraisemblablement de la chaleur, emportée par la circulation sanguine.

Cela implique que, comme une machine thermique, tout réseau neuronal décrit des cycles. La manifestation la plus évidente en est le cycle diurne d'éveil et de sommeil du cerveau humain : tous les soirs, nous éprouvons le besoin de dormir.

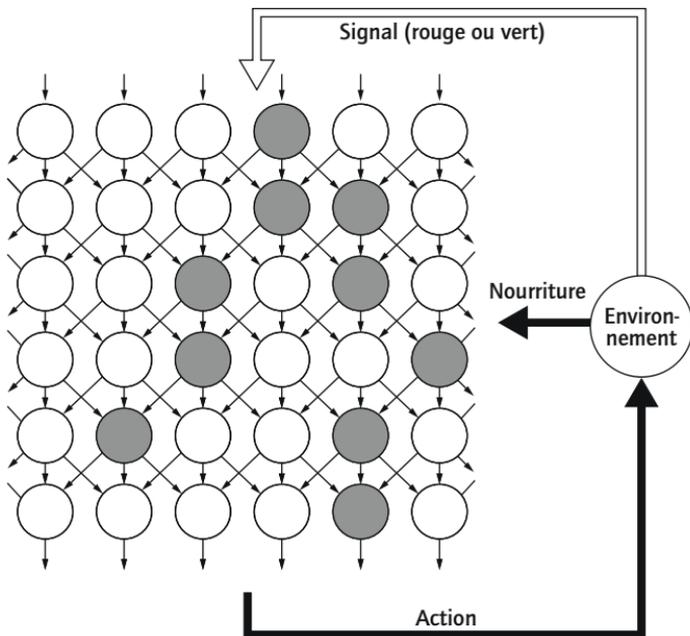


Fig. 10. Étant donné une information à l'entrée (signal rouge ou vert), un réseau neuronal peut apprendre à déclencher l'action appropriée qui provoque un apport de nourriture (les neurones excités sont en gris).

8. Les cycles du cerveau

Comme pour toute structure dissipative, on doit s'attendre à ce que le cerveau décrive des cycles constitués de quatre phases comparables à celles d'une machine thermique. Les biologistes ont effectivement remarqué que les neurones du cerveau peuvent exister sous quatre états différents, chacun étant caractérisé par une onde de fréquence différente, observable sur un électro-encéphalogramme. Ces quatre états du cerveau correspondent vraisemblablement aux quatre phases de ses cycles d'activité.

Lorsqu'il est en pleine activité, notre cerveau émet des ondes rapides appelées ondes bêta (β) dont la fréquence est de l'ordre de 15 à 30 Hz, ou même plus si l'activité mentale est très intense. Il semble naturel d'identifier cet état à la phase d'expansion du cycle convectif ou à la phase de croissance du cycle des saisons (figure 8). La phase suivante correspondrait aux ondes alpha (α) de l'ordre de 9 à 14 Hz, émises lorsque nous méditons sur le résultat de nos efforts. Ensuite viendrait le sommeil profond engendré par la fatigue avec des ondes dites delta (δ) de fréquences très basses de l'ordre de 1 à 3 Hz, puis le sommeil paradoxal durant lequel nous rêvons. Notre cerveau émet alors des ondes thêta (θ) de fréquences comprises entre 4 et 8 Hz.

Ces quatre phases sont représentées sur la figure 11 dans l'ordre que suit le mouvement d'un fluide dans une cellule convective,

montrant l'analogie entre ces deux phénomènes pourtant très différents. Si l'on suit le modèle de Bak et Stassinopoulos, les seuils des connexions neuronales varient comme l'inverse de la température du fluide. Ils sont moins élevés à gauche (où le fluide chaud monte) qu'à droite (où le fluide froid redescend). Lorsque nous méditons après l'effort, ces seuils augmentent régulièrement (le fluide refroidit) jusqu'à ce que notre cerveau ne percole plus, provoquant l'endormissement. Il recommence à percoler lorsqu'on entre dans le sommeil dit paradoxal, durant lequel les rêves apparaissent (le fluide se réchauffe).

En poursuivant toujours l'analogie entre le cerveau et la convection dans un fluide, l'intensité des connexions joue le rôle de la pression. Elle croît du haut vers le bas. Elle est minimale durant la phase de méditation. Cela explique que cerveau puisse errer rapidement d'une idée à une autre : il émet des hypothèses sans arriver à des certitudes. L'intensité est, au contraire, maximale durant la phase de sommeil paradoxal : on se réveille souvent avec des idées très claires, voire des certitudes nouvelles, et un désir prononcé d'agir.

Nous avons vu à la section II-4 que ces cycles n'ont pas de période propre. Ils se synchronisent facilement sur une période extérieure. Le cerveau de la plupart des animaux, y compris nous-mêmes, se synchronise sur le jour et la nuit. Chez certains, comme la marmotte, il se synchronise sur les saisons. L'individu

qui voyage sait à quel point il est pénible de se resynchroniser après un décalage horaire. Cela implique aussi que des cycles plus courts peuvent être imbriqués à l'intérieur de cycles plus longs : on peut avoir des insomnies durant la nuit et faire une sieste au milieu de la journée.

On voit l'analogie profonde qu'il y a entre la convection dans un fluide et les oscillations d'un réseau neuronal comme le cerveau. Il paraît vraisemblable que cette analogie s'applique à tous les réseaux neuronaux listés sur la figure 9. Nous verrons qu'elle s'applique au réseau neuronal que forme une société humaine.

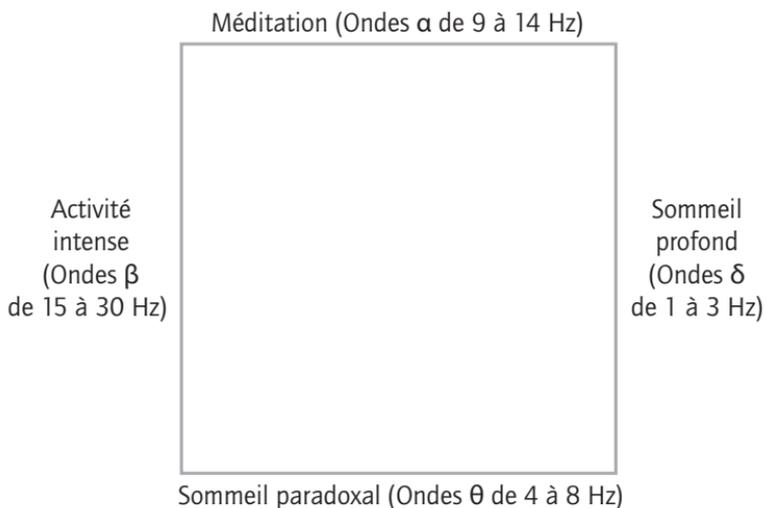


Figure 11. Le cycle diurne du cerveau

9. La vie : un état de la matière ?

On apprenait autrefois à l'école que la matière existe sous trois états différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. À cette époque, les physiciens avaient déjà ajouté un quatrième état : celui de plasma. On observe cet état à très haute température lorsque les particules ont perdu des électrons. On dit qu'elles sont ionisées, c'est-à-dire chargées électriquement. Aujourd'hui, ces quatre états sont considérés comme étant seulement les plus fondamentaux. À la température ambiante, on peut ajouter l'état vitreux (souvent considéré comme un état liquide très visqueux, en surfusion), mais aussi les cristaux liquides.

Le degré de désorganisation de la matière se mesure par son entropie. Il diffère d'un état à un autre. Par exemple, un solide contient des cristaux qui sont plus organisés que les liquides. Ces derniers sont eux-mêmes plus organisés que les gaz. Le passage d'un état de la matière à un autre s'appelle une transition de phase (chapitre I-9). Les physiciens distinguent deux types de transitions de phase : les transitions abruptes et les transitions continues. Dans le premier cas, de la chaleur est échangée avec l'environnement, mais pas dans le second.

Au chapitre I-9, nous avons vu que l'eau peut passer de l'état vapeur à l'état liquide soit de façon abrupte soit de façon continue. Au-dessous de la température critique, l'état vapeur est bien

distinct de l'état liquide : la transition se fait de façon abrupte avec dégagement de chaleur. Au-dessus du point critique, la distinction se fait de façon progressive : la transition est continue sans dégagement de chaleur.

Lorsqu'une transition se produit d'un état peu organisé vers un état mieux organisé, on dit que le système s'auto-organise. Les cristaux de neige sont un bon exemple de structure auto-organisée. Comme nous l'avons vu à la section II-3, la matière peut s'auto-organiser lorsqu'elle est parcourue par un flux permanent d'énergie. C'est le cas des structures dites dissipatives.

En 1987, Per Bak, Chao Tang et Kurt Wiesenfeld ont montré que tous les systèmes dynamiques s'auto-organisent au voisinage d'un point critique. Ils ont donné à ce processus le nom de *criticalité auto-organisée*. Traversé par un flux permanent d'énergie, le système subit des transitions de phase tout à fait semblables à celles d'un fluide au voisinage de son point critique, lorsque liquide et vapeur ne forment plus qu'un seul état dit « *supercritique* » (voir section I-9).

Ceci est à rapprocher de la découverte d'un astrophysicien, Erich Jantsch, qui a montré que tout l'univers s'auto-organise par alternance entre une macroévolution et une microévolution. La macroévolution consiste en la formation lente de macrostructures (étoiles, planètes...). Elle est suivie d'une microévolution

sous la forme d'avalanches de microstructures (atomes, molécules...). Il est tentant d'identifier la macroévolution d'Erich Jantsch à une transition de phase continue, et sa microévolution à une transition de phase abrupte.

Cela implique que tout l'univers s'auto-organise en décrivant des cycles de Carnot autour d'un point critique dont les propriétés sont très semblables à celles du point critique de la surface de van der Waals (chapitre I-10). Nous en verrons des exemples dans les prochains chapitres.

Ceci s'applique en particulier aux réseaux neuronaux, notamment à ceux dont on a donné la liste sur la figure 9. Il s'applique donc aux structures vivantes telles qu'une colonie de bactéries ou un essaim d'abeilles. Les états différents que prennent ces structures peuvent donc être aussi considérés comme des états différents de la matière.

10. L'origine de la vie : une hypothèse

Nous avons vu (section II-4) que la source d'énergie initiale grâce à laquelle la vie s'est développée était sans doute de nature géothermique. En 1977, le sous-marin Alvin découvrait des sources hydrothermales à 2700 m de profondeur : la vie sous-marine y est foisonnante. La vie serait-elle née dans l'océan ?

Curieusement, peu de gens semblent réaliser que, chauffée par un volcan, l'eau de l'océan peut facilement atteindre 374 °C. Vers 2200 m de profondeur, elle se trouve alors à son point critique. Imaginez maintenant un volcan sous-marin en activité à 2700 m de profondeur. Il va projeter de l'eau très chaude vers le haut. Lorsque cette eau atteint 2200 m, elle est à sa pression critique. Pour peu qu'elle se soit un peu refroidie, elle peut être précisément à son point critique...

Plus généralement, l'eau provenant d'un volcan sous-marin en activité voit sa pression diminuer en même temps qu'elle se refroidit. Elle forme ce qu'on appelle une « plume convective ». Une certaine quantité d'eau va monter au-dessus de la profondeur critique. En se refroidissant, cette eau devenue plus dense va redescendre en direction du volcan d'où elle est issue, formant une boucle de convection tout à fait semblable à celle de l'eau dans une casserole sur le feu (voir section II-1).

Tandis que l'eau de cette boucle monte à une température supérieure à celle du point critique, elle redescend à une température qui lui est inférieure. Cela implique que l'eau décrit un cycle de Carnot autour de son point critique. Or nous venons de voir (section précédente) que tout notre univers s'organise à partir de cycles de Carnot autour de points critiques. Il serait donc bien étonnant que la vie elle-même ne soit pas apparue de cette façon-là !

De nombreux chercheurs se sont penchés sur le problème de l'origine de la vie. Tous se sont heurtés au problème fondamental du catalyseur. Comment assembler des macromolécules complexes ? Les propriétés catalytiques des microgouttes d'eau sont pourtant bien connues, mais personne ne semble avoir songé au phénomène d'opalescence critique.

Une des clés du processus est que certaines parties des macromolécules sont attirées par l'eau (les parties aquasolubles) tandis que d'autres sont au contraire repoussées (les parties liposolubles). Cette différence de propriété va naturellement orienter les différentes parties à assembler les unes par rapport aux autres. Une autre clé du processus est que c'est un phénomène de surface. Plus la goutte d'eau est petite, plus le rapport surface/volume est élevé et plus l'action catalytique est puissante. Nous avons donc là un processus très puissant pour synthétiser des molécules organiques complexes.

Il est intéressant de noter que si l'on tourne en sens inverse autour du point critique, au lieu de former des microgouttes d'eau, on forme des microbulles de vapeur d'eau. En éclatant, ces microbulles tendent au contraire à détruire les molécules organiques complexes. Des chercheurs essaient actuellement de mettre à profit cette propriété pour détruire les déchets organiques qui encombrent la station orbitale.

Deux orientations de recherche entrent ainsi en conflit. Dans le premier cas, on s'intéresse à l'origine de la vie : il s'agit de recherche fondamentale. Dans le deuxième cas, on cherche à détruire des déchets organiques : il s'agit de recherche appliquée. Dans un monde où, comme aujourd'hui, on finance la recherche scientifique uniquement en fonction de ses applications, le lecteur devinera aisément lequel de ces deux sujets d'étude est favorisé. Malheureusement, en ne finançant que les applications, on tue la « poule aux œufs d'or », c'est-à-dire la véritable source de toutes les innovations.

III.

Thermodynamique et économie

1. Température et pression économique

Les concepts développés dans les précédents chapitres s'appliquent à tous les réseaux neuronaux, notamment ceux dont la liste est donnée sur la figure 9. Les étudier tous dépasserait le cadre de cet ouvrage. Je me contenterai ici de les appliquer à l'économie, définie ici comme l'ensemble des échanges monétaires entre les différents membres d'une même société.

Selon Bak et Stassinopoulos, l'état d'un réseau neuronal est déterminé par deux paramètres : l'intensité et les seuils des connexions. Il est clair qu'en économie, l'intensité des connexions correspond à l'importance des sommes échangées tandis que les seuils sont ceux des transactions financières, c'est-à-dire ceux à partir desquels un marché est conclu. Si l'analogie que nous avons établie entre les cycles du cerveau et ceux d'une cellule convective est générale, alors les seuils des connexions jouent le rôle de l'inverse d'une « température » et leur intensité le rôle d'une « pression » (voir section II-8). Nous allons voir que c'est effectivement le cas.

L'idée d'une « température » de l'économie est intuitive. Les économistes parlent couramment de refroidissement ou de surchauffe économique. Ils utilisent des expressions comme : « prendre la température de l'économie ». N'est-ce qu'une figure de style ? En thermodynamique la température est usuellement

définie pour des systèmes à l'équilibre. Lorsque deux systèmes à des températures différentes, donc hors équilibre, échangent de l'énergie, on peut encore définir leurs températures absolues respectives par la relation :

$$T = \partial U / \partial S$$

où $\partial U / \partial S$ est la dérivée, dite partielle, de leur énergie interne U par rapport à leur entropie respective. En bon français, cette expression nous dit que la température T mesure l'apport d'énergie nécessaire pour produire une unité d'entropie.

Comme chacun sait, la monnaie est une information (portée par exemple sur un compte en banque) et l'entropie mesure une perte d'information. Dans un précédent livre³, j'ai suggéré qu'en économie la production d'entropie se mesure en termes de monnaie dépensée. Si l'on adopte cette mesure, alors la « température » d'une économie y est donnée par l'inverse du coût de l'énergie. Plus le prix de l'énergie est bas, plus la « température » de l'économie est élevée. Une analogie amusante consiste à verser une source d'énergie comme du sucre sur une fourmilière : vous voyez aussitôt les fourmis s'agiter comme les molécules d'un gaz qu'on chauffe. La découverte du pétrole semble avoir eu un effet similaire sur l'humanité : elle a augmenté la « température » de notre économie.

3. Thermodynamique de l'évolution - éditions Parole - 2012.

Nous avons vu (section I-12) comment Gibbs a généralisé la mécanique statistique aux échanges de matière : en introduisant des « potentiels de Gibbs ». On peut faire de même en économie. Appelons dV un volume élémentaire de marchandise produit par une entreprise économique. Cette production a nécessité un certain travail mécanique dU que l'on peut mettre sous la forme $dU = P.dV$, où P est le potentiel de Gibbs associé au volume dV produit. On peut considérer P comme la « pression sociale » sous laquelle ce travail a été effectué.

Il est clair que le produit $P.dV$ correspond à ce que les économistes appellent « la demande » tandis que produit $T.dS$ correspond à « l'offre ». En régime stationnaire, $dU=0$, d'où $P.dV = T.dS$. C'est ce que les économistes appellent l'équilibre entre l'offre et la demande.

2. Une équation d'état pour l'économie

Pour chaque produit manufacturé (ou service proposé), on peut définir un état de l'économie par la valeur des potentiels P et T qui lui sont associés. Dans le cas d'un ensemble de produits offerts par une société, T représente leurs valeurs ou potentiels d'échange. Ils sont indépendants de la nature du produit considéré. P représente leurs valeurs ou potentiels d'usage. Ils dépendent du produit considéré. Pour un ensemble de produits indépendants, le potentiel P global de la production est la somme des potentiels partiels des différents produits proposés. Ils sont les analogues des pressions partielles dans un mélange de gaz sans interactions entre eux.

En physique, les variables P , V et T sont liées par une relation appelée équation d'état. Pour un gaz dit « parfait », cette relation s'écrit $PV=RT$, où R est la constante des gaz parfaits (voir section I-7). Appliquée à la production économique, la relation des gaz parfaits implique un potentiel économique P d'autant plus grand que le volume V de la production est plus faible. C'est le cas des objets faits en métaux précieux comme l'or ou l'argent, ou des objets de luxe comme les bijoux, les œuvres d'art ou les pièces de collection. Une robe de grand couturier a d'autant plus de valeur que très peu de gens ont la même. La pression P d'achat est d'autant plus grande que le volume V de la production est plus faible. On retrouve bien la loi Boyle-Mariotte des gaz parfaits.

On a vu que l'équation d'état des gaz réels diffère de celle des gaz parfaits d'autant plus qu'on se rapproche des températures auxquelles le gaz se condense et devient liquide. Diverses expressions analytiques ont été proposées pour tenir compte de ces liaisons. La plus utilisée est l'équation de van der Waals (voir section I-10). Elle s'écrit : $(P + a/V^2)(V-b) = nRT$.

Appliquée à la production économique, l'équation de van der Waals implique l'existence d'un potentiel économique supplémentaire de la forme a/V^2 . Pour un gaz réel, il est spécifique à certaines molécules. En économie, il est spécifique à certaines productions. Comme tout potentiel, a/V^2 est une grandeur intensive, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas du volume de la production. Cela implique que le coefficient « a » croît comme le carré du volume V de la production. Il s'applique à des denrées dont le potentiel économique est d'autant plus grand qu'elles sont produites en très grandes quantités. C'est le cas des services communs comme les communications ou les transports. De même, l'équation de van der Waals implique un volume de production minimal « b » que l'on pourrait qualifier de volume de survie.

Le cas général est intermédiaire entre les objets de luxe et les objets de première nécessité. Un bon exemple est la propriété immobilière. Dans une économie d'abondance (T élevé), la propriété immobilière est considérée comme un placement :

sa valeur d'échange domine. Beaucoup achètent des maisons secondaires. Dans une économie de pénurie (T faible), c'est sa valeur d'usage qui est importante. Les familles ont tendance à partager un même logement.

La figure 12 montre la surface de van der Waals appliquée à l'économie. Elle comporte un pli. Les mathématiciens parlent de catastrophe de type « fronce », selon la terminologie du français René Thom. Tout point à l'intérieur du pli représente un état du système qui est nécessairement instable. Les états situés sur la partie supérieure du pli, entre les flèches marquées a et b , sont dits métastables : à tout moment, la production peut s'effondrer. Les économistes parlent de récession, les historiens parlent de crises. Lorsque la production s'effondre, les capitaux doivent être réinvestis ailleurs. Il s'agit d'une époque de restructuration de l'économie.

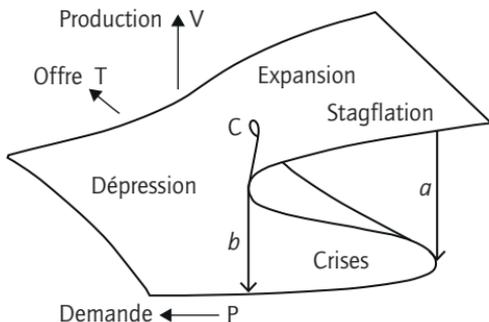


Fig. 12. Surface de van der Waals appliquée à l'économie.

3. Les cycles économiques

Nous avons défini l'économie comme décrivant les échanges monétaires entre les différents membres d'une même société. Nous avons vu que ces échanges ont la structure d'un réseau neuronal. On s'attend aussi à ce que tous les réseaux neuronaux décrivent des cycles thermodynamiques semblables à ceux du cerveau (section II-7). C'est effectivement ce qu'observent les économistes : ils ont mis en évidence toute une variété de cycles de périodes très différentes.

On peut citer les cycles suivants, avec leur période caractéristique entre parenthèses : les cycles de Kitchin (3 à 5 ans), les cycles de Juglar (7 à 11 ans), les cycles de Kuznets (15 à 25 ans) et les cycles de Kondratiev (45 à 60 ans). Plus récemment des historiens, Peter Turchin et Sergey A. Nefedov, ont mis en évidence l'existence de cycles historiques encore plus longs qu'ils qualifient de séculaires. Leur période est de l'ordre de quelques siècles. Ils y distinguent quatre phases qu'ils qualifient dans l'ordre de dépression, expansion, stagflation et crises. Il est clair que la phase de crises correspond au pli de la surface de van der Waals. C'est durant cette phase que la production économique chute brutalement. Les autres phases en découlent. Leur nomenclature est portée sur la figure 12.

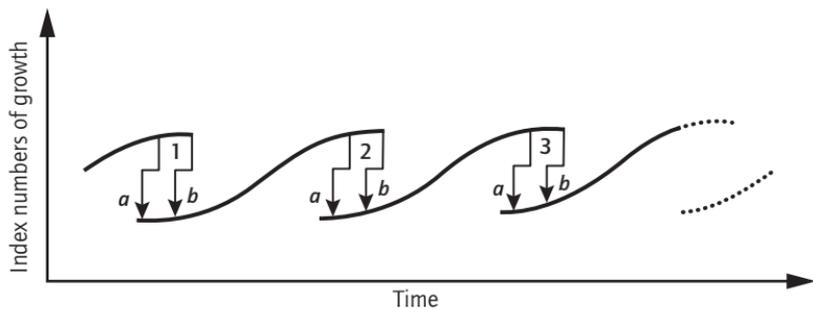
Durant les années 1970, un économiste allemand, Gerhard Mensch, a fait une étude statistique détaillée de ce phénomène qu'il a publiée dans un livre, traduit en anglais sous le titre *Stalemate in Technology*. Il y montre que le progrès technique n'est pas du tout continu. Il constate que les vagues d'innovations apparaissent toujours après les crises économiques, le plus souvent à la suite d'une intervention gouvernementale, durant une phase qu'il qualifie de dépression. Suit alors une phase d'expansion rapide de l'économie puis une phase de stagnation ou stagflation, ce qui correspond tout à fait à la nomenclature de Turchin et Nefedov.

Gerhard Mensch a qualifié son modèle de « *metamorphosis model* ». La croissance économique y est représentée par une suite de sigmoïdes qui se chevauchent partiellement comme indiqué sur la figure 13, reproduite de ce livre. Les flèches *a* et *b* représentent des chutes brutales de la production économique. C'est effectivement ce qu'on observe lorsqu'on tourne autour du point critique C de la figure 12 où les mêmes flèches *a* et *b* sont aussi représentées. La zone de recouvrement entre les deux flèches est qualifiée de zone de transition économique : elle correspond à ce que les physiciens appellent une zone de transition abrupte.

À l'appui de Mensch, l'historien Giovanni Arrighi montre l'existence de périodes successives, se superposant partiellement,

qu'il appelle respectivement le long XV-XVI^e siècle (1340-1640), le long XVII^e siècle (1560-1780) et le long XIX^e siècle (1740-1920). Je propose ici d'appliquer la nomenclature de Turchin et Nefedov à un long XX^e siècle en distinguant quatre phases de 30 ans chacune : une phase de dépression (1918-1948) marquée par la grande dépression de 1929, une phase d'expansion (1948-1978) connue sous le nom de « trente glorieuses » et une phase de stagflation (1978-2008). Avec la crise économique de 2008, nous serions entrés dans la phase de crise qui devrait durer jusqu'à 2038...

On en conclut que l'équation de van der Waals représente bien les états successifs de l'économie que l'on observe lorsqu'on tourne autour du point C dans le sens des aiguilles d'une montre. Rappelons qu'en 1987, Per Bak, Chao Tang et Kurt Wiesenfeld ont montré que tous les systèmes dynamiques s'auto-organisent au voisinage d'un point critique (voir section II-9). Ils ont donné à ce processus le nom de « *criticalité auto-organisée* ». Il est intéressant de constater que cette propriété s'applique effectivement à l'auto-organisation de l'économie dans les sociétés humaines.



Source : Mensch (1979 : 73).

Fig. 13. Le « *metamorphosis model* » de Gerhard Mensch.
 Les flèches notées a et b correspondent à celles de la figure 12.

4. La falaise de Sénèque

À la section I-10, nous avons vu que la surface de van der Waals ne représente que partiellement l'état des gaz réels. En dessous du point C, les isothermes ont une partie ascendante qui représente des états instables, donc inobservables, pour lesquels la pression diminue avec le volume. La courbe en cloche de la figure 4 détermine une zone dite de condensation à l'intérieur de laquelle le fluide se sépare en deux phases : une phase liquide et une phase gazeuse. À l'intérieur de cette zone, les isothermes doivent être remplacées par des segments de droites horizontaux appelés « paliers de condensation ». On peut se poser la question de savoir quel serait l'équivalent du palier de condensation pour l'économie.

Il est clair qu'il ne peut s'agir que d'un comportement statistique valable pour un très grand nombre d'économies similaires indépendantes. Dans ce cas, on peut représenter les divers effondrements observés entre les flèches *a* et *b* de Mensch (figure 13) par un effondrement moyen unique. Cet effondrement est représenté sur la figure 14 par une paroi verticale que je propose d'appeler la « falaise de Sénèque » en référence au livre de Ugo Bardi *The Seneca effect*. Cette « falaise » est représentée sur la figure 14.

On voit que lorsque le point représentatif de l'économie tourne autour du point critique C, il y a alternance entre ce

que les physiciens appellent une transition de phase continue représentée ici par une croissance économique régulière et une transition de phase abrupte représentée ici par un effondrement économique brutal le long de la falaise de Sénèque. Ce comportement est aussi tout à fait conforme au modèle d'évolution universel d'Erich Jantsch : celui-ci parle d'une alternance entre une macroévolution lente suivie d'une microévolution rapide.

Il est remarquable que ce comportement s'applique aussi bien à l'économie d'une entreprise qu'à celle d'un pays. Dans le cas d'une entreprise, la phase dite de dépression correspond à ce qu'on appelle une phase de développement : c'est la phase durant laquelle l'entreprise met au point la fabrication d'un nouveau produit. La phase d'expansion est celle durant laquelle ce nouveau produit est mis en vente : c'est une phase de production durant laquelle celle-ci atteint son maximum. La phase de stagflation pourrait être qualifiée de phase d'obsolescence. C'est la phase durant laquelle le marché devient peu à peu saturé, tandis que la concurrence commence à proposer de nouveaux produits. Enfin la phase de crises est une phase de transition durant laquelle la production originale chute brutalement et il faut trouver de nouveaux produits à développer.

L'économie d'un pays a pour rôle de faciliter le développement des entreprises et leur coordination. Elle joue un rôle essentiel dans le développement des communications et des transports. On y

retrouve les mêmes phases de développement, d'expansion et de stagflation suivies d'une transition abrupte. Ainsi, à la fin du XVIII^e siècle, la France s'est caractérisée par le développement d'un réseau dense de canaux pour le transport des marchandises. Le XIX^e siècle s'est caractérisé ensuite par le développement d'un large réseau de voies ferrées. La fin du XIX^e siècle a vu le développement de l'électricité, tandis que le XX^e siècle devenait l'âge du pétrole et de l'automobile puis celui de l'aviation. On parle d'aujourd'hui comme étant l'âge de l'informatique.

Il n'est pas étonnant que les différentes transitions dites « abruptes » ne se soient pas produites sans crises, notamment deux guerres mondiales. Nous allons maintenant essayer de mieux comprendre le phénomène.

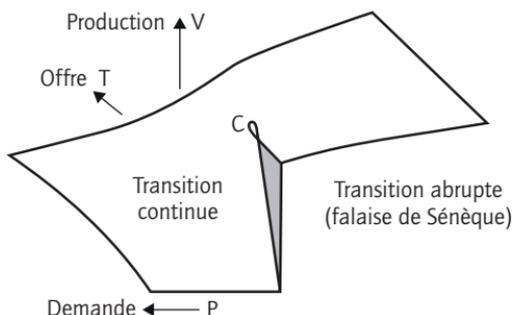


Fig. 14. Même figure que la figure 12 dans laquelle le pli a été remplacé par une paroi verticale (en gris) appelée falaise de Sénèque.

5. La tornade de Shumpeter

Nous avons vu que le point représentatif de l'état d'une économie décrit des cycles dans le plan (P, T). Dans la mesure où le flux d'énergie dissipée est constant, ce point tourne à une vitesse linéaire constante de composantes dP/dt et dT/dt qui ne dépend pas de la distance au point C. Plus cette distance est grande, plus la période de rotation est longue et plus la hauteur de la falaise de Sénèque est élevée. On retrouve bien la propriété caractéristique des phénomènes d'avalanches à savoir que l'amplitude des effondrements est inversement proportionnelle à leur fréquence [1].

L'économiste Joseph Schumpeter (1883-1950) est sans doute le premier à avoir reconnu que l'économie évolue systématiquement dans le temps. Il a notamment montré que l'économie traverse des phases de « destruction créatrice », une propriété qui a inspiré les travaux de son disciple Gerhard Mensch (voir section III-3). Ce dernier a montré que les innovations se concentrent durant la phase de dépression qui suit les périodes de crise.

On pourrait songer à limiter l'amplitude des effondrements en maintenant constamment l'économie au voisinage du point C, mais plus on s'en rapproche, plus les différences de températures économiques diminuent au cours d'un même cycle et plus le

rendement de Carnot devient faible, d'où la tendance opposée en faveur d'une mondialisation de l'économie.

La figure 15 montre une distribution de points représentatifs d'économies indépendantes dans le plan (P,T). Elle explique pourquoi Schumpeter compare l'économie à une tornade. Chacun des points de la figure 15 tourne autour du point C à des vitesses linéaires très semblables. Dans la mesure où ces productions économiques sont indépendantes, elles s'effondrent à des moments différents, ce qui affecte peu l'économie globale.

Supposons maintenant que l'économie se globalise. Devenant dépendantes les unes des autres, les différentes productions tendent à se synchroniser. Lorsqu'une production s'effondre, elle entraîne toutes les autres. Le biologiste Robert Ulanowicz a observé le même phénomène en biologie. Il a montré qu'un écosystème tend à accroître son « interconnectivité » et qu'il existe une interconnectivité optimale au-delà de laquelle un écosystème tend à s'effondrer. L'économiste Bernard Lietaer a montré que cette propriété s'applique à l'économie.

Ainsi, plus une économie se globalise, plus son rendement augmente mais plus elle devient fragile et plus elle risque de s'effondrer. Cette dualité entre l'efficacité et la résilience est bien connue en biologie. On la retrouve dans deux formes complémentaires de sélection naturelle appelées sélection r et

sélection K, formes que l'on peut illustrer pour le grand public par la fable de La Fontaine « Le chêne et le roseau ».

Les arbres et le chêne en particulier sont des plantes particulièrement efficaces. Elles pompent chaque jour des quantités d'eau considérables qu'elles vaporisent dans l'atmosphère. Mais ce sont des plantes très sensibles à leur environnement. Lorsque celui-ci change, elles meurent en premier, souvent dans les incendies.

Beaucoup moins efficace, le roseau est bien plus résilient. Tant qu'il y a de l'eau, il s'adapte à des climats très différents. Il est bon de savoir que la même distinction s'applique aux économies.

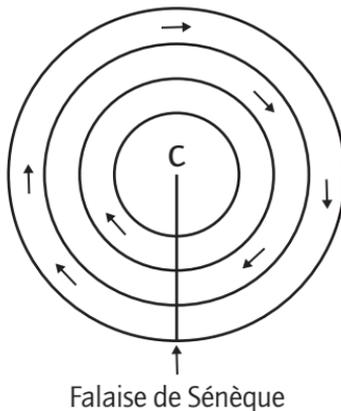


Fig. 15. La tomade de Schumpeter. Chaque entreprise économique est représentée par un point du plan (P, T) qui tourne à vitesse constante autour du point C. Lorsqu'un point traverse la falaise de Sénèque, la production économique correspondante s'effondre.

6. La criticalité auto-organisée en biologie

Il est instructif de comparer les processus d'auto-organisation en économie et en biologie. Dans les deux cas, il s'agit de processus de criticalité auto-organisée.

De même que les systèmes économiques croissent puis s'effondrent et sont remplacés par d'autres, de même les espèces animales ou végétales se développent puis disparaissent et sont remplacées par d'autres. C'est le phénomène des extinctions d'espèce. Les biologistes Stephen Jay Gould et Niles Eldredge se sont tout particulièrement intéressés à ce phénomène. Ils ont montré que les espèces se développent progressivement, mais s'éteignent de façon soudaine. Ils ont donné à ce phénomène le nom d'*équilibres ponctuels*.

Les paléontologues David Raup et Jack Sepkosky ont étudié le pourcentage d'espèces qui se sont éteintes en fonction de l'époque géologique, durant les derniers 600 millions d'années. Leur résultat est consistant avec une loi en $1/f$: l'amplitude des extinctions est inversement proportionnelle à leur fréquence. Le physicien danois Per Bak et son collègue Kim Sneppen ont développé un modèle théorique de ce processus, montrant qu'il s'agissait bien d'un processus de criticalité auto-organisée.

On retrouve ce même phénomène chez les bactéries. Celles-ci se développent en donnant naissance à des épidémies. Dans un

milieu isolé comme les îles Faroe, Rhodes et al. (1997) ont pu montrer que l'amplitude des épidémies de rougeole est inversement proportionnelle à leurs fréquences, comme il se doit d'un processus de criticalité auto-organisée.

Nous avons vu (section II-6) qu'une colonie de bactéries peut être considérée comme un réseau neuronal d'agents échangeant des plasmides (molécules d'ADN autonomes). De même, la structure d'un écosystème peut être considérée comme un réseau neuronal d'êtres vivants procédant à des échanges trophiques. Parallèlement, toute organisation économique peut être modélisée comme un réseau neuronal d'agents échangeant de la monnaie (voir fig. 9). Il n'est donc pas étonnant que ces différents types d'organisation aient des caractéristiques communes. En particulier, elles forment des structures qui tendent à s'effondrer avec une amplitude d'autant plus faible que la fréquence de l'effondrement est plus élevée (loi en $1/f$).

Le tableau de la figure 9 montre que tout être vivant peut également être considéré comme un réseau neuronal d'organes échangeant de l'information sous forme de molécules appelées « hormones ». On pourrait donc s'attendre à ce que l'évolution d'un être vivant suive aussi un processus de criticalité auto-organisée. Or ce n'est pas du tout le cas. Les êtres vivants s'arrêtent de croître à l'adolescence pour garder une taille constante durant la majeure partie de leur existence. Sauf accident, ils ont

une durée de vie moyenne caractéristique de chaque espèce.
Comment cela se fait-il ?

L'explication est que, contrairement aux populations qui tendent à croître indéfiniment pour s'effondrer ensuite aléatoirement, les *individus* possèdent tous un mécanisme de régulation qui limite leur dissipation d'énergie individuelle. Ils n'accroissent la dissipation de l'énergie qu'à travers leur mécanisme de reproduction.

Nous allons maintenant examiner ces processus de régulation et voir comment ils pourraient s'appliquer à l'économie des sociétés humaines.

7. Un exemple de régulation en biologie

On sait que le glucose (sucre) est la principale source d'énergie des êtres vivants tels que nous-mêmes. Un mécanisme de régulation très important en biologie est celui qui contrôle le taux de glucose dans le sang. Un excès de glucose peut en effet provoquer une maladie grave, appelée diabète, qui détruit les artères. C'est pourquoi nous possédons un mécanisme de régulation du taux de glucose dans le sang. Ce mécanisme est assuré par le pancréas.

Il arrive que notre sang contienne trop de glucose. C'est le cas, par exemple, après un bon repas terminé par un dessert très sucré. Notre pancréas sécrète alors une hormone appelée insuline qui réduit le taux de glucose de notre sang. Aux personnes, dites diabétiques, chez lesquelles ce mécanisme fonctionne mal, les médecins prescrivent des injections d'insuline.

Nous avons besoin de glucose pour toute activité physique et il arrive que le taux de glucose de notre sang devienne insuffisant. C'est le cas par exemple lorsque nous avons à fournir un effort important et que nous sommes à jeun. Dans ce cas notre pancréas sécrète une autre hormone appelée glucagon qui augmente le taux de sucre dans le sang. Insuline et glucagon sont qualifiés d'hormones ago-antagonistes. Elles agissent conjointement pour réguler le taux de sucre dans le sang.

Il est tentant de comparer le rôle du glucose chez les êtres vivants au rôle du pétrole dans nos sociétés modernes. Le pétrole est devenu la principale source d'énergie de nos sociétés modernes comme le sucre est la principale source d'énergie pour les individus. Nous aimons tous les sucreries, en particulier les jeunes enfants, mais cela peut devenir une addiction. Nos sociétés modernes semblent devenues dépendantes du pétrole comme certaines personnes sont dépendantes du sucre.

De même que le sucre a des effets délétères sur le corps humain, notamment les artères, de même le pétrole a des effets délétères sur la société. Il nous faut entretenir un réseau dense d'artères appelées autoroutes ou développer des aéroports de plus en plus gigantesques. Non seulement nous épuisons nos ressources, mais nous sommes également en train de provoquer un réchauffement irréversible du climat. Ne pourrait-on pas réguler la consommation de pétrole de nos sociétés comme le corps humain régule sa consommation de sucre ?

En l'absence de régulation, nos sociétés s'auto-organisent suivant un processus de criticalité auto-organisée. À la manière des espèces animales ou végétales ou des colonies de bactéries, nos sociétés humaines dissipent de plus en plus d'énergie jusqu'au moment où, ayant trop perturbé leur environnement, elles s'effondrent.

Grâce à leurs mécanismes de régulation, les êtres vivants cessent de croître à l'adolescence et ont une durée de vie caractéristique, propre à chaque espèce. Ne pourrait-il pas en être de même pour nos sociétés humaines ? Nous allons voir que c'est possible grâce au concept d'ago-antagonisme, une notion née de la recherche bio médicale qui s'est développée ensuite dans d'autres disciplines.

Deux processus sont dits ago-antagonistes lorsqu'ils coopèrent tous deux à la bonne marche d'un même système, alors que leurs effets sont opposés. C'est le cas de la production de l'insuline et celle du glucagon : toutes deux contribuant à stabiliser la concentration du sucre dans le sang. Dans la prochaine section, nous verrons comment le concept d'ago-antagonisme s'applique au fonctionnement d'une machine thermique. À la section suivante, nous verrons comment on peut l'appliquer à l'économie.

8. Les cycles ago-antagonistes

Si la notion d'ago-antagonisme est d'abord apparue en biologie, pour être ensuite étendue aux sciences de l'ingénieur, personne ne semble s'être aperçu qu'elle a, en fait, été appliquée aux premières machines à vapeur. C'est en effet Watt et Boulton qui eurent les premiers l'idée de construire un cylindre à double action dans lequel la vapeur est admise d'abord d'un côté du piston puis ensuite de l'autre, ramenant ce dernier à sa position initiale. Il s'agit bien de deux actions de nature antagonistes qui contribuent toutes deux au bon fonctionnement d'un même moteur.

Les lecteurs suffisamment âgés pour avoir connu les locomotives à vapeur se rappelleront qu'elles étaient équipées de deux cylindres, un de chaque côté de la chaudière. C'était des cylindres à simple action mais ils opéraient en *opposition de phase*. Lorsqu'un piston poussait activement sa bielle, le mouvement de la locomotive ramenait l'autre à sa position initiale. La locomotive avançait ainsi, poussant ses pistons l'un après l'autre, un peu comme nous avançons un pied après l'autre.

De nos jours, tous les moteurs à combustion interne qui équipent nos automobiles sont aussi à simple action, mais les plus petits ont toujours au moins deux cylindres, comme celui de la 2CV Citroën. Lorsqu'un cylindre est en phase d'expansion, l'autre

cylindre est en phase de compression. Là encore, il s'agit de deux actions opposées qui contribuent toutes deux à la bonne marche du moteur. On peut donc les qualifier d'ago-antagonistes. Dans chacun des deux cylindres, les gaz décrivent des cycles semblables à ceux décrits par Carnot, mais ces cycles sont en *opposition de phase*.

Revenons maintenant aux réseaux neuronaux. Nous avons vu (section II-7) que ceux-ci fonctionnent comme des machines thermiques. Ils décrivent des cycles analogues au cycle diurne de notre propre cerveau. Ce dernier forme un réseau neuronal très complexe, sans doute le plus évolué de la création. Pour des raisons d'efficacité, il devrait décrire, lui aussi, non pas un cycle, mais deux cycles ago-antagonistes. C'est en effet le cas.

L'anatomie distingue deux systèmes nerveux dits autonomes, le système nerveux sympathique (ou orthosympathique) et le système nerveux parasympathique. Le système nerveux sympathique prépare le corps à l'action, comme par exemple : « combattre ou fuir ». Il agit essentiellement le jour, lorsque nous sommes éveillés. Par opposition, le système nerveux parasympathique prépare le corps au repos. Il agit essentiellement la nuit lorsque nous dormons. Leurs cycles diurnes sont bien en *opposition de phase* : on peut donc les qualifier de systèmes nerveux ago-antagonistes.

Grâce à leurs effets opposés, ces deux systèmes nerveux peuvent contrôler l'activité du corps humain de la même manière que l'insuline et le glucagon contrôlent la teneur en sucre de notre sang. À la section précédente, j'ai comparé la consommation du sucre par les êtres vivants à la consommation du pétrole par les êtres vivants. Tandis que nos sociétés consomment du pétrole en permanence, nous limitons tous notre consommation de sucre. Même un petit enfant qui adore les bonbons s'arrête à un moment d'en manger. C'est le phénomène de satiété. Il fait partie des mécanismes grâce auxquels les individus limitent leur dissipation d'énergie.

Il paraît clair qu'un jour ou l'autre nos sociétés devront apprendre à limiter leur dissipation d'énergie. Elles le feront grâce à des économies ago-antagonistes. Ces économies existent déjà, mais sont aujourd'hui considérées comme purement antagonistes. L'existence des cycles économiques nous montre comment elles peuvent devenir ago-antagonistes.

9. Les économies ago-antagonistes

Quand on parle d'économies antagonistes, la première idée qui vient à l'esprit est l'opposition qui est l'enjeu de la majorité des débats politiques : celui entre les économies dites libérales et les économies dites dirigées, opposition qui se réduit le plus souvent à ses deux formes extrêmes : le capitalisme et le communisme.

Les économies libérales ont pour modèle les écosystèmes. Leur organisation repose sur la compétition entre les entreprises, comme celle des écosystèmes repose sur la compétition entre les espèces. Les économies dirigées reposent sur l'autorité de l'État. Elles sont souvent ressenties comme oppressives, même si celui-ci est élu démocratiquement. La majorité des débats politiques portent sur le rôle plus ou moins grand joué par l'État dans l'organisation économique.

Nous avons vu que les écosystèmes s'effondrent en provoquant des extinctions d'espèces. Il n'est donc pas étonnant que les économies libérales s'effondrent aussi : la fin de l'Empire romain en est un exemple. Les économies dirigées s'effondrent tout autant comme le montre l'exemple du bloc soviétique. Tous ces effondrements procèdent du même processus de criticalité auto-organisée. Ils ont lieu durant la phase de crise de leur cycle économique.

La discussion de la section précédente suggère l'idée de coupler deux économies en opposition de phase comme on couple deux cylindres d'un même moteur thermique. La phase de crise d'une des économies correspond à la phase d'expansion de l'autre et réciproquement. D'antagonistes, ces deux économies deviennent ago-antagonistes.

L'économie libérale est bien adaptée à la production. Nous avons vu que celle-ci repose sur l'innovation et que les innovations ne sont pas régulières. Gerhard Mensch a montré qu'elles ont toutes lieu durant des phases de dépression (section III-3). Suit alors une phase d'expansion, puis une phase de stagflation durant laquelle la production stagne.

On voit aujourd'hui se développer une économie dite de « services ». On appelle ainsi toute économie proposant des aides à la personne sans fourniture de biens matériels. C'est le cas des enseignants, mais aussi des gendarmes, des médecins, des coiffeurs, ou des artistes. S'y rattachent les concepts d'économie de fonctionnalité et d'économie collaborative, sociale et solidaire.

Une économie de services se développe naturellement lorsque la production est en crise. Lorsque la production est en phase de stagflation, les services seraient en phase de dépression, phase propice à l'innovation pour les services. C'est bien ce que l'on constate aujourd'hui avec le rôle croissant de l'informatique dans

l'organisation des services. La phase de crise de la production correspondrait ensuite à une phase d'expansion des services.

Qui pense aux services, pense aussitôt aux services publics, donc à l'économie dirigée. Nous avons vu (section III-2) le rôle particulier joué dans l'équation de van der Waals par les services comme les communications ou les transports. Contrairement aux produits de luxe, leur valeur économique est d'autant plus grande qu'ils sont plus utilisés. Vu sous cet angle, privatiser et mettre en concurrence des services publics apparaît comme un gaspillage d'énergie d'autant plus grave que nos sources d'énergie se raréfient et que le climat se réchauffe.

Cela nous amène à l'idée de coupler une économie de production de type libéral avec une économie de services dirigée par l'État pour former un couple d'économies ago-antagonistes. Nous allons voir comment un tel couple pourrait réguler la dissipation d'énergie de nos sociétés, grâce à l'usage de deux monnaies différentes.

10. De la nécessité d'une seconde monnaie

Du point de vue thermodynamique, nous avons vu (section III-3) que les cycles économiques ont une propriété commune avec ceux des machines thermiques : leur opération requiert deux sources de chaleur à des températures différentes. Ils ne peuvent se former que si la température de l'économie varie au cours du temps. Celle-ci est maximale lorsque l'énergie abonde et minimale en phase de crise lorsque l'énergie devient plus rare (section III-2). Tout cela prend du temps et implique de traverser une phase de crise.

On peut obtenir le même résultat plus facilement en couplant deux économies à des températures différentes, par exemple deux pays à l'intérieur desquels les coûts de l'énergie diffèrent. L'énergie y est plus chère dans l'un que dans l'autre. Cela implique non seulement des monnaies différentes, mais aussi des frontières avec des barrières douanières. Ces dernières jouent le rôle « d'isolant thermique ». C'est ainsi qu'au XIX^e siècle des pays comme l'Angleterre puis la France ont développé leurs économies grâce à des échanges commerciaux avec leurs colonies, dont la température économique était plus basse. Un taux de change approprié entre leurs monnaies a alors joué le rôle de catalyseur et favorisé les échanges.

Il devrait être possible d'obtenir le même résultat à l'intérieur d'un même pays en couplant deux économies antagonistes, par

exemple une économie de production et une économie de services, comme suggéré à la section précédente. Cela suppose l'usage de deux monnaies : une monnaie pour la production et une monnaie pour les services, avec un taux de change approprié. Comme dans un moteur à deux cylindres, la température d'une des économies sera maximale durant sa phase d'expansion pendant que la température de l'autre sera minimale puisqu'en phase de crise, l'inverse se produisant un demi-cycle économique plus tard.

Nous avons vu que les cycles économiques sont analogues à ceux de notre cerveau. La phase d'expansion économique correspond à la phase d'activité physique, tandis que la phase de stagflation correspond à une phase de méditation (voir figure 11). Suit une phase de crise durant laquelle la production s'effondre : elle correspond à la phase durant laquelle notre cerveau s'endort. La phase suivante, dite de dépression, correspond au sommeil paradoxal : c'est la phase durant laquelle on se réveille avec des idées nouvelles. Du point de vue économique, elle correspond à une phase d'innovation (voir section III-5).

Il est remarquable que notre propre cerveau contienne deux systèmes nerveux complémentaires : le système (ortho)sympathique et le système parasympathique. Le premier agit principalement de jour. Il prépare notre organisme à l'action (par exemple combattre ou fuir) tout en nous laissant la liberté de

décider. Il est l'analogie d'une économie de production dite libérale où la décision d'un seul individu peut être déterminante. Il met toutefois notre organisme dans des conditions de stress : nos battements de cœur s'accélèrent, notre digestion s'arrête, tandis que notre foie libère du glucose. Tandis que les agents économiques échangent de la monnaie, nos neurones échangent une substance appelée « neurotransmetteur ». Le neurotransmetteur du système sympathique est l'adrénaline. Elle joue le rôle de notre monnaie actuelle.

Le système parasympathique a les effets opposés du système sympathique. Il prend le contrôle de notre organisme lorsque nous dormons. Il ralentit nos battements de cœur et facilite la digestion. Il n'est plus question de libre arbitre : notre organisme est pris en charge. Son équivalent est une économie de service de type dirigée. Les décisions y sont collectives. Le neurotransmetteur du système parasympathique est l'acétylcholine. Elle joue le rôle de notre monnaie complémentaire.

Conclusion

Il est toujours hasardeux de parler de l'avenir. Un nombre croissant d'observateurs pensent cependant que nos civilisations les plus « avancées », c'est-à-dire celles qui dissipent le plus d'énergie, sont entrées dans une phase de crise durant laquelle elles risquent de s'effondrer. Il s'agit bien sûr des États-Unis d'Amérique, mais aussi de l'Europe qui les prend pour modèles.

Ce livre contribue à tirer le signal d'alarme. Historiquement, on sait que les civilisations s'effondrent : la fin de l'Empire romain en est sans doute l'exemple le mieux connu. Ce qui est nouveau est que le processus physique a été identifié. Il s'agit d'un processus thermodynamique appelé : « criticalité auto-organisée » (section II-9). L'objet de ce livre est de le faire connaître et d'en expliquer le mécanisme.

En quelques mots, plus une structure auto-organisée dissipe de l'énergie, plus elle modifie son environnement et plus vite elle modifie son environnement, plus vite elle doit se réadapter. Lorsqu'elle ne se réadapte plus assez vite, elle s'effondre. Ce processus s'applique aussi bien aux écosystèmes qu'aux sociétés humaines.

L'espoir est qu'une fois le processus identifié, il devient possible d'y remédier. La réalité n'est malheureusement pas aussi simple. L'idée doit faire son chemin et cela peut prendre plusieurs générations. Nous en avons vu de nombreux exemples en sciences.

À la fin de ce livre, je montre comment les organismes vivants individuels échappent au processus de criticalité auto-organisée grâce à un mécanisme ago-antagoniste de régulation de leur dissipation d'énergie (section III-8). Je montre ensuite comment ce même mécanisme pourrait s'appliquer aux sociétés humaines, en leur évitant de s'effondrer (sections III-9 et III-10). Il implique l'utilisation de deux monnaies.

L'idée de deux monnaies n'est pas nouvelle. Dans son livre *Au cœur de la monnaie*, Bernard Lietaer nous rappelle qu'un « système monétaire dual de nature yin-yang a fait ses preuves pendant plusieurs siècles en Europe pendant le Moyen Âge central. Le corollaire est qu'imposer un monopole d'une monnaie yang est peut-être plus efficace, mais le sera au prix d'une détérioration de la justice financière et de la stabilité sociale d'une société. »

Dans son livre *Une monnaie au service du bien commun*, Philippe Derudder se fait l'avocat des monnaies complémentaires. Beaucoup de gens les considèrent aujourd'hui comme un recours au cas où les banques deviendraient insolvables. Cela explique sans doute leur succès. Leur usage est malheureusement limité à l'échelle locale, alors qu'il faudrait l'étendre à plus grande échelle. On voit aujourd'hui ce mécanisme se mettre naturellement en œuvre, mais localement et de façon détournée. Il fait partie du processus naturel d'évolution.

Si mon raisonnement est correct, on éviterait bien des souffrances en introduisant dès aujourd'hui une monnaie complémentaire à l'échelle nationale. Cela va, malheureusement, à l'encontre de préjugés majoritairement répandus, notamment chez les économistes. Il est curieux de voir ceux-ci défendre une compétition « libre et non faussée » tout en décrétant que, lorsqu'il s'agit de monnaie, la compétition n'est pas souhaitable. Il faudra clairement du temps avant que l'idée d'une double monnaie ne fasse son chemin.

La mondialisation conduit à la formation d'empire. On sait comment les empires s'effondrent : ils se divisent en pays plus petits. C'est ce qui est arrivé à l'Empire romain et, plus récemment, à nos empires coloniaux ou à l'empire soviétique. Cela pourrait tout aussi bien arriver à l'Europe ; on le voit déjà avec la scission de la Grande-Bretagne. Cela pourrait aussi arriver à des pays plus petits comme l'Espagne ; on le voit avec l'exemple de la Catalogne.

À l'intérieur d'un même pays, le processus prend la forme d'une « régionalisation ». C'est ainsi qu'on a vu apparaître en Grande-Bretagne les « villes en transition ». C'est là que sont apparues les premières monnaies locales. Le phénomène s'étend aujourd'hui en France avec la multiplication des monnaies locales. Elles permettent de lutter contre la mondialisation en accordant une prime de fidélité aux échanges locaux.

Un service fondamental est cependant celui de l'éducation. On sait qu'à la fin de l'Empire romain, celle-ci s'est effondrée. Elle n'a repris que quatre cents ans plus tard, grâce à l'Église et à Charlemagne. Le même phénomène se répète aujourd'hui avec l'abandon des services publics. Or ce sont eux qui font l'unité d'un pays. Sans eux tout pays s'effondre.

L'éducation devient un privilège de gens fortunés, notamment aux États-Unis. On reviendra bientôt à l'usage d'un précepteur. En quête d'emploi, celui-ci sera embauché comme toute autre personne de service et rémunéré en monnaie locale. L'éducation sera à la carte. Une telle éducation ne peut que rompre l'unité d'un pays et conduire au chaos.

Dans cette description, tout physicien reconnaît effectivement les propriétés d'invariance, par changement d'échelle, propre au chaos. Elles s'appliquent aux structures fractales. Celles-ci apparaissent au-delà du point critique. En dynamique des fluides, elles caractérisent la turbulence pleinement développée. Si l'on veut éviter le chaos, il faut revenir au voisinage du point critique où, nous l'avons vu, tout s'organise. On sait que le calme revient après la tempête. Mon espoir est que ce livre puisse un jour servir de germe pour rebâtir nos sociétés.

Références

Livres :

Gerhard Mensch, *Stalemate in Technology*, Ballinger (1979).

Erich Jantsch, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon (1980).

Giovanni Arrighi, *The Long Twentieth Century*, Verso (1994).

Per Bak, *Quand la nature s'organise*, Flammarion (1999).

Stephen Jay Gould, *La structure de la théorie de l'évolution*, Gallimard (2006).

Peter Turchin and Sergey Nefedov, *Secular Cycles*, Princeton (2009).

François Roddier, *Thermodynamique de l'évolution*, Éditions Parole (2012).

Bernard Lietaer, *Au cœur de la monnaie*, Éditions Yves Michel (2013).

Philippe Derudder, *Une monnaie au service du bien commun*, Édition Yves Michel (2017).

Ugo Bardi, *The Seneca effect*, Springer (2017).

Articles :

Per Bak, Chao Tang and Kurt Wiesenfeld, « Self-organized criticality », *Physical Review Letters*, Vol. 59, N° 4, July 1987, p. 381.

Per Bak and Kim Sneppen « Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model Evolution », *Physical Review Letters*, Vol. 71, 1993, p. 4083.

Dimitris Stassinopoulos and Per Bak, « Democratic reinforcement: A principle for brain function », *Physical Review Letters*, Vol. 51, N° 5, May 1995, p. 5033.

C. J. Rhodes, H. J. Jensen and R. M. Anderson. « On the Critical Behaviour of Simple Epidemics », *Proceedings of the Royal Society of London B*, Vol. 264, pp. 1639-1646 (1997).

Robert Ulanowicz, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 4, N° 2 (2009) 83-96.

Bernard Lietaer et al., « Money and Sustainability » The Missing Link, Triarchy Press (2012).

François Roddier, « Thermodynamique et économie », *Des sciences exactes aux sciences humaines*, *Res Systemica* [En ligne], Vol. 12, article 3 (novembre 2014). URL : <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/res-systemica-numeros.html>

Élisabeth Lutz, Sergio Ciliberto, *Physics Today*, Vol. 68-9, sept. 2015, p. 30.

François Roddier, « La thermodynamique des transitions économiques », *Res Systemica* [En ligne], Vol. 14, article 1 (octobre 2015). URL : <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/res-systemica-numeros.html>

François Roddier, « L'équation de van der Waals appliquée à l'économie », *Res Systemica* [En ligne], Vol. 16, article 2 (printemps 2017). URL : <http://www.res-systemica.org/afscet/resSystemica/res-systemica-numeros.html>

Conférences filmées :

François Roddier, « La thermodynamique des transitions économiques », exposé du 12 mars 2015 aux ateliers du think-tank : The Shift Project. Voir :

<https://www.youtube.com/watch?v=5-qap1cQhGA>.

François Roddier, « Thermodynamique et économie », exposé du 12 avril 2018 à l'école des mines de Paris. Voir :

<http://dynamose.org/2018/02/09/thermodynamique-mondialisation-souverainete-quelle-europe-pour-quelle-transition-ecologique-et-economique-dans-une-france-et-un-monde-en-crise-systemique/>

Table des matières

Remerciements	9
Avant propos	13
I. La thermodynamique classique	21
1. Quelques notions de base	23
2. Un peu d'histoire	27
3. Les premières machines à vapeur	30
4. De la pratique à la théorie	33
5. La conservation de l'énergie	36
6. Rudolf Clausius et l'entropie	39
7. La théorie cinétique des gaz	42
8. La notion d'équation d'état	45
9. Les transitions de phase	48
10. L'équation de van der Waals	52
11. Boltzmann et l'entropie	56
12. La contribution de Gibbs	60
13. Démons et paradoxes	63
14. L'entropie au xx ^e siècle	66
15. La mémorisation de l'information	69
II. La thermodynamique hors équilibre	73
1. L'exemple de la casserole d'eau sur le feu	75
2. Du linéaire au complexe	78
3. L'émergence de structures ordonnées	81
4. Les écosystèmes : des structures dissipatives vivantes	84
5. Le cycle des structures dissipatives	87
6. Les réseaux neuronaux	90
7. Réseau neuronal et machine thermique	93

8. Les cycles du cerveau	97
9. La vie : un état de la matière ?	100
10. L'origine de la vie : une hypothèse	103
III. Thermodynamique et économie	107
1. Température et pression économique	109
2. Une équation d'état pour l'économie	112
3. Les cycles économiques	115
4. La falaise de Sénèque	119
5. La tornade de Shumpeter	122
6. La criticalité auto-organisée en biologie	125
7. Un exemple de régulation en biologie	128
8. Les cycles ago-antagonistes	131
9. Les économies ago-antagonistes	134
10. De la nécessité d'une seconde monnaie	137
Conclusion	141
Références	145

Ouvrages parus aux éditions Parole

Collection Main de femme

Isabelle Hasbroucq : *Rouge comme un cœur dans la bouche de dieu.*

Violette Ailhaud : *L'homme semence.*

Lacolaffaille : *L'amour fait aux femmes.*

Mélanie Laheurte : *Sensations photographiques du Verdon.*

Catherine Carage : *Le Coucou.*

Violaine Warin : *Femmes lunes.*

Juliet Schlunke : *Rosenthal, une enfance australienne.*

Isabelle Hasbroucq : *Petites têtes d'épingles et autres minuties.*

Maria Borrély : *Sous le vent.*

Brigitte Broc, Emeline Chatelin – CD poésie et harpe : *Mon désir est devenu jardin.*

Claire Frédéric : *Le piano à écrire.*

Maria Borrély : *Les Reculas.*

Édith Reffet : *Le Bout du Monde.*

Géraldine Hubinois : *Sur la plus haute branche.*

Édith Reffet : *Lit 54, retour de l'enfer.*

Emilie Kah : *La petite flingueuse - Retour à Diên Biên Phu.*

Ile Eniger : *La femme en vol.*

Juliet Schlunke : *La Dryade.*

Suzanne Ghersenzon-Spénale : *Celui qui déplaçait les montagnes.*

Traduit en allemand par Frédérique-Marie Miñana : *Der Samenmann – L'homme semence* de Violette Ailhaud.

Violette Ailhaud : *L'homme semence* – version illustrée de linogravures de Maryline Viard.

Sophie Alfieri : *Trois jeunes appelés dans les Aurès (Algérie 1956-1957).*

Émilie Kah : *L'automate du vide-greniers.*

Jackeline Van Bruaene : *Rua da Cruz et autres histoires.*

Marie Lébely : *Le large dans les poubelles.*

Soumya Ammar Khodja : *De si beaux ennemis et autres nouvelles.*

Mireille Barbieri : *C'était en février.*

Luisa Myrial : *L'île - Les sept nuits d'Ève à Lilith.*

Soumya Ammar Khodja : *Elle était ma première terre.*

Édith Reffet : *Ma mère - Chronique d'un non-amour.*

Nancy Huston : Livre biface – *Sois belle/Sois fort.*

Marie Lébely : *L'horizon d'un événement.*

Maria Borrély : *La tempête apaisée.*

Maria Borrély : *Les mains vides.*

Maria Borrély : *Le dernier feu.*

Mireille Barbieri : *À l'encre violette.*

Natacha Verdier, Cara Tael, Florence Batisse-Pichet, Valérie Marcoult,
Virginie Bardin, Corinne Pons, Caroline Gonnaud, Laurence Sharples, Sylvie Pellet,
Fannie Lefebvre, Isabelle Henry, Charlotte Naturelle : *12 mois, 12 femmes.*

Laure Sorasso : *Les guerrières.*

Suzanne Ghersenzon-Spénale : *Polina - Une Ukrainienne dans la tourmente.*

Anne Lecourt : *Sept jours en face.*

Stéphanie Quérité : *Rouges.*

Christine Demarchi : *La table de Joseph.*

Juliet Schlunke : *Pourquoi partir ? Le rêve australien.*

Fanny Saintenoy : *J'ai dû vous croiser dans Paris.*

L'homme semence de Violette Ailhaud, traduit en anglais par Nancy Huston :
The Seed Man.

Muriel Roche : *Fusil.*

Nancy Huston : *Rien d'autre que cette félicité.*

Emilie Kah : *Rendez-vous chambre 31.*

Nancy Huston : *Leçons d'indifférence.*

Simone Righetti : *Maille à maille.*

L'homme semence de Violette Ailhaud, traduit en occitan provençal par

Daniel Daumàs : *Samenaire de vidas*

Collection Regard d'homme

Gilles Vincent : *Si je cessais de vous écrire... - Le choix de l'intranquillité.*

Patrick Caffarel : *Sur la route de Ten Sleep - Un berger des Alpes au Far West.*

Jean Darot : *L'amer du thé - De la Chine en éruption à la nuit éternelle.*

Collection Le temps d'apprendre

François Roddier : *Le pain, le levain et les gènes.*

Laurence Verna-Vanin : *Voir et penser : de l'œil à l'esprit.*

Agnès Pastourel : *Presque encyclopédie de la vigne et du vin.*

Louis Brachet : *La terre prise au piège de l'homme.*

Paulette Borrély : *Maria Borrély 1890-1963.*

François Roddier : *Thermodynamique de l'évolution.*

Jack Meurant : *Jean Giono et le pacifisme, 1934-1940 - La tentation politique.*

Henry Lombard : *Sentiers philosophiques.*

Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Italie à l'Aquitaine.*

Jacky Plauchud Vaucher et Barney Vaucher : *Calanques : un siècle d'amour et de vigilance.*

Christiane Gaillard : *Le petit traité de l'amour.*

Yannick Bernier : *La face cachée du Verdon.*

Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Espagne à l'Aquitaine.*

Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Alsace à l'Aquitaine.*

Berthe Pélestor-Ravel : *Vingt ans de cohabitation dévastatrice : la colère d'une bergère.*

Langage Pluriel : *"La cuisine" D'un pays à l'autre - 100 recettes immigrées.*

Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre - Pays d'Eymet terre d'accueil.*

Emma Sanz-Delzars : *Paroles d'avant l'oubli - La retirada. Une famille dans l'exode des républicains espagnols en 1938 et 1939.*

Djamel Safsaf : *Le tango argentin, une marche à deux au sein du bal - Des origines à une méthode originale.*

François Roddier : *De la thermodynamique à l'économie.*

Jack Meurant : *Jean Giono et le pacifisme, 1934-1944 - De la paix à la guerre.*

La collection Le temps d'apprendre devient

Curieux par nature

Virginie Langlois, Philippe Granarolo, illustratrice : Céline Decorte : *Dessine-moi un chat de Schrödinger - Quand la philosophie quantique révèle l'Extra-Ordinaire de notre quotidien.*

Daniel Nahon : *Le réchauffement climatique commence sous nos pieds - Le scientifique, le citoyen et le politique, face à la crise.*

François Roddier : *Le pain, le levain et les gènes - Un essai sur l'évolution.*

Pierre Micheletti : *0,03 % - Pour une transformation du mouvement humanitaire international.*

Collection Chemins faisant

François Lupu : *L'équation, une vie d'une rive à l'autre.*

Pierre Micheletti : *Une mémoire d'Indiens.*

Joseph Périgot : *Le crépuscule des éditeurs.*

Daniel Nahon : *Dernière lettre à Irène.*

Collection Angle de vie

Yannick Bernier : *Ma Patagonie !*

Parc naturel régional du Verdon : *L'almanach - Ces petits ruisseaux qui font le Verdon.*

Collection La mescla

Miquèu Montanaro et Réka Fekete – Correspondance : *Un vélo dans les arbres.*

Jean-Loup Dariel – Roman : *Célestin de l'Étang.*

Bernard Loyer – Roman : *L'hiverne.*

Jean-Pierre Vaissaire – Roman-conte : *Chaconne.*

Raymond Jardin – Roman : *La guerre des moissons, tome 1 : L'Ardente et la Routière.*

Raymond Jardin – Roman : *La guerre des moissons, tome 2 : Les marins des hautes terres.*

Éric Schulthess – Recueil : *Marseille rouge sangs.*

Jack Meurant – Roman : *Prettye un amour envolé.*

Jean-Pierre Védrières – Conte : *Jean le roux.*

Éric Schulthess – Conte : *En attendant la pluie.*

Félix Chabaud : *Pour l'exemple.*

Violaine Warin – Contes : *Un gecko dans la calebasse et autres histoires extraordinaires.*

Barney Vaucher – Polar : *Meurtre au Verdon.*

Barney Vaucher – Polar : *À bas les masques.*

Jack Meurant – Biographie : *Commissaire Laviollette, alias Modeste Clarisse*

Pierre Souhaitée – Roman historique : *Le prix de la liberté.*

Daniel Picard – Roman historique : *Moi, Ambroise Paré.*

Raymond Jardin – Roman : *Le jour maudit.*

Violaine Warin – Contes : *Le cadeau de l'amant et autres contes d'amour.*

Jack Meurant – Roman : *Ravine*

Roger Mourier – Contes : *Bois d'aubaine et autres Têtes de mule.*

Éric Schulthess – Récit : *Il s'appelait Alphonse Richard, le premier Dignois tué à la Grande Guerre.*

Pierre Veranese – Conte philosophique : *Déclaration des Droits de l'Âme insoumise et joyeuse.*

Félix Chabaud : *Majid - Le chemin d'Azza.*

Olivier Soria : *La chèvre de Monsieur Crétin : Les frasques écologiques de l'être humain racontées par un olivier.*

Collection Biface

Daniel Daumàs – Livre : *Tessons de vie/Tròcs de vidas.*

Jean-David Gallet – Livre-CdRom : *Dans le secret de la nuit.*

Daniel Daumàs – Disque-livre : *Còtra Suberna/À contre-courant.*

Alain Billy – Livre : *Les Amandes.*

Daniel Daumàs – Contes de la Provence d'en haut : *L'attrape soleil/L'aganta soléu.*

Lieutenant Vallier/Claude et Jean-Michel Sivirine – Livre : *Le cahier rouge du maquis/L'homme boussole.*

Collection Pourquoi ?

Sagault - Jutta Ash : *La marmotte qui ne voulait pas siffler.*

Myriam Benois : *Grise Mine.*

René Frégni - Jutta Ash : *L'étrange Noël de Léa.*

Florence et Patrick Lanéelle – Livre-disque : *Djamil, le crocodile qui perdit ses dents.*

Marie Clauwaert et Éva Schlunke : *Xal, le lézard, donne sa langue au sorcier.*

Sagault - Jutta Ash : *Le gros petit loup.*

Marie-Pierre Aiello : *Olympe, une graine, un bébé, ou l'histoire d'une naissance médicalement assistée.*

Collection Globe

Marie-Pierre Aiello et Olivier Bauza - Livre-disque : *Les chants kanak du papayer.*

Bande dessinée

Mandragore et Laetitia Rouxel : *L'homme semence*, en coédition avec les éditions de l'Œuf.

Hors collection

Sébastien Authemayou et Marielle Gars, Duo Intermezzo - Livre-disque : *Astor Piazzolla - Libertad.*

**Rencontres avec des auteurs,
points de vue de libraires, de lecteurs...
découvrez nos ouvrages avec
nos livrets interactifs sur :
parolesautourdunlivre.com**

© 2018, Éditions Parole 83630 Artignosc-sur-Verdon
Groupe AlterMondo 83500 La Seyne-sur-Mer
Courriel : contact@editions-parole.net
Suivi commande : commande@editions-parole.net
www.editions-parole.net
Tous droits réservés pour tous pays

ISSN : 2115-8398
ISBN : 978-2-37586-028-1
Dépôt légal - 1^{re} édition : décembre 2018
3^e édition : décembre 2020

Maquette et mise en page : & com
Illustration de couverture : Mireille Roddier

Imprimé et façonné par Sepec en France
N° d'imprimeur : 2001471106



En France, un livre a le même prix partout.
Depuis 1981, C'est le « prix unique du livre ».
En librairie, en grande surface ou en ligne,
tous les commerçants doivent le respecter.
Si vous payez moins cher, c'est que le livre est d'occasion
ou que votre carte de fidélité vous fait bénéficier
d'une réduction jusqu'à 5 %.
**Les éditions Parole s'engagent aux côtés des libraires
pour préserver et encourager la bibliodiversité.**