

La thermodynamique des transitions économiques

Texte de la conférence
donnée par François Roddier
le 12 mars 2015

Résumé: *Comme tout organisme vivant, une société humaine ne peut subsister que grâce à un apport constant d'énergie qu'elle dissipe. L'économie est l'étude de son métabolisme. Comme lui, elle suit les lois de la thermodynamique. De même qu'une machine thermique ne peut fonctionner durablement sans effectuer des cycles de transformations échangeant de la chaleur avec deux sources de températures différentes, de même un organisme vivant effectue des cycles de réactions chimiques grâce à des catalyseurs qui créent des "températures apparentes" différentes. De même enfin, une économie ne peut fonctionner durablement sans effectuer des cycles d'échanges avec des monnaies différentes. On montre que l'utilisation d'une monnaie unique conduit inévitablement à un effondrement. Thermodynamiquement, un effondrement économique a les propriétés d'une transition de phase abrupte.*

1. Introduction

Les organismes vivants ne subsistent que s'ils sont constamment alimentés par un flux d'énergie qu'ils dissipent. L'ensemble des processus thermodynamiques suivant lesquels ils utilisent cette énergie porte le nom de *métabolisme*.

Le physico-chimiste Ilya Prigogine, prix Nobel de Chimie (1977), a montré l'analogie qu'il y a entre les organismes vivants et des structures non-vivantes comme les cyclones qui eux-aussi ne subsistent qu'alimentés par un flux continu d'énergie. Ils possèdent aussi la propriété de s'auto-organiser. Prigogine a donné le nom de structures dissipatives à tous les objets qui possèdent ces propriétés. Un accord s'établit aujourd'hui entre les diverses disciplines pour dire qu'ils tendent à maximiser le flux d'énergie qui les traverse, c'est-à-dire la vitesse à laquelle ils dissipent l'énergie¹.

Il est clair que les sociétés humaines sont des structures dissipatives. Par analogie avec l'étude des organismes vivants, la science économique apparaît comme l'étude du « *métabolisme* » des sociétés humaines. Il est ainsi naturel de considérer l'économie comme l'étude des processus thermodynamiques suivant lesquels une société humaine s'auto-organise et dissipe l'énergie.

2. Le second principe de la thermodynamique

Les lois de la physique (mécanique, électromagnétisme) sont indépendantes du sens du temps. On dit qu'elles sont invariantes par changement de t en $-t$. Seule la dissipation d'énergie en chaleur est irréversible. Les lois de Newton nous apprennent que, lancée sur une surface plane et horizontale, une boule de pétanque doit poursuivre sa trajectoire en ligne droite à vitesse constante. On sait qu'elle finit par s'arrêter. On attribue cela à un phénomène parasite, souvent considéré comme secondaire, appelé frottement mécanique. Le phénomène est irréversible car une boule de pétanque ne repart jamais d'elle-même. C'est un phénomène de dissipation d'énergie.

(1) Voir: Bibliographie 3, section 2.2.

De même, les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent de façon irréversible. On sait aujourd'hui qu'il en est de même des civilisations, comme il en est des montagnes ou même des étoiles. Einstein pensait que l'univers était immuable jusqu'au jour où on a découvert son expansion. On sait aujourd'hui que l'univers observable est né d'un événement appelé le Big Bang et qu'il disparaîtra dans des trous noirs ou au delà de l'horizon cosmique. On en conclut que l'évolution de l'univers lui-même est un processus irréversible de dissipation d'énergie.

Dissiper l'énergie, c'est transformer du travail mécanique en chaleur. L'inverse est-il possible? On doit la réponse à un physicien français Sadi Carnot². Elle forme ce qu'on appelle le second principe de la thermodynamique (le premier principe étant la conservation de l'énergie). J'énoncerai ce principe sous la forme suivante: « On ne peut *durablement* produire du travail mécanique que par des *cycles* de transformations extrayant de la chaleur d'une source chaude pour en rendre une partie à une source froide ».

Ainsi transformer de la chaleur en énergie mécanique est possible mais, lorsqu'on revient au point de départ, la transformation ne peut être que partielle.

2. Le cycle de Carnot

En 1690 le français Denis Papin conçut la première machine avec cylindre et piston permettant de convertir de la chaleur en travail mécanique, mais c'est l'anglais Newcomen qui construisit la première machine utilisable industriellement (1712). Elle fut ensuite perfectionnée par James Watt.

Soit Q_1 la chaleur fournie par la source chaude. À l'aller la vapeur pousse le piston qui fournit un travail W_1 , mais pour ramener le piston au point de départ, il faut refroidir le cylindre en cédant une partie Q_2 de la chaleur à une source froide et fournir un travail W_2 . Le rendement de l'opération est:

$$r = (W_1 - W_2) / W_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$$

Pour des cycles réversibles, les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 sont proportionnelles aux températures absolues T_1 et T_2 des deux sources:

$$Q_1 / T_1 = Q_2 / T_2 \quad \text{d'où le rendement maximum dit de Carnot: } r = (T_1 - T_2) / T_1$$

Ce rendement est limité parce qu'il faut rendre au retour une partie du travail mécanique obtenu à l'aller. Si l'on ne rend pas assez d'énergie mécanique, le moteur cale. Si l'on en rend trop, le moteur s'emballe. Un moteur thermique est fondamentalement instable. C'est James Watt qui résout le problème grâce à un régulateur à boules (1788). Nous allons voir qu'une économie non régulée est instable exactement pour les mêmes raisons.

En 1865 Rudolf Clausius remarque que le rapport Q/T est le même en valeur absolue à l'aller et au retour. Il considère cette quantité comme la variation d'une fonction d'état S qu'il appelle *entropie*. Il en déduit que l'entropie S d'un système isolé ne varie pas s'il subit des transformations réversibles. Elle augmente s'il subit des transformations irréversibles:

$$\oint dQ/T = 0 \quad \text{pour tout cycle fermé réversible.}$$

Lorsqu'un système reçoit une quantité de chaleur élémentaire dQ , son entropie augmente d'une quantité dS telle que $dQ = T.dS$.

La variation dU d'énergie interne d'un moteur thermique est donnée par:

$$dU = -P.dV + T.dS$$

(2) Voir: Bibliographie 1.

où P est la pression dans le cylindre et V son volume. Pour un cycle fermé,

$$\oint dU = 0 \quad \text{d'où:} \quad \oint PdV = \oint TdS$$

La première intégrale donne le travail W effectué par le moteur au cours du cycle. La seconde donne la chaleur Q reçue par le moteur.

3. Les cycles naturels

En présence d'un flux permanent d'énergie, des structures dissipatives apparaissent. Elles s'auto-organisent en formant des cycles naturels. Ainsi :

- Les cycles atmosphériques apparaissent en présence de différences de température.
- Les cycles chimiques apparaissent en présence de différences de composition chimique.
- Les cycles économiques apparaissent en présence de différences de richesse.

Les cycles naturels ont des propriétés analogues à celles des cycles de Carnot qu'ils généralisent. Ainsi, le métabolisme des organismes vivants n'est possible que grâce à des cycles de réactions chimiques comme le cycle de Krebs. De façon générale, la vie s'auto-organise en cycles tels que le cycle diurne du sommeil ou les cycles de reproduction.

Il en est de même de l'économie. Si l'agriculture est associée au rythme des saisons, toute entreprise est assujettie à des cycles de production. On peut diviser ceux-ci en quatre phases:

- une phase de développement
- une phase de production
- une phase d'obsolescence
- une phase de transition

Les transitions économiques sont des phases de transition. Elles correspondent généralement à un déclin de ressources naturelles. C'est le cas, par exemple de la fin de l'âge de bronze, une transition abrupte que l'on situe en 1177 avant Jésus-Christ³. On peut s'attendre à ce que le déclin de nos ressources pétrolières produisent un phénomène du même type. Nous allons voir que, du point de vue thermodynamique, cela correspond à ce que les physiciens appellent une transition de phase abrupte.

Pour étudier les cycles naturels, il faut généraliser un certain nombre de notions liées à celle de cycle de Carnot.

4. Les machines thermiques généralisées

On doit à von Helmholtz la généralisation de la notion de travail mécanique en celle d'énergie libre. On appelle énergie libre F , toute forme d'énergie intégralement convertible en énergie mécanique. C'est le cas par exemple de l'énergie électrique. Dans ce cas, la variation d'énergie libre est donnée par:

$$dF = V.dq$$

où V est le potentiel électrique et q la charge électrique. D'une façon générale la variation d'énergie interne d'un système thermodynamique peut s'écrire sous la forme:

$$dU = dF + T.dS$$

Ainsi, un couple thermo-électrique devient une machine thermique capable de produire de l'énergie électrique à partir de deux sources de chaleur de températures différentes.

(3) Voir: Bibliographie 11.

À la même époque, l'américain Willard Gibbs généralise la thermodynamique au cas où il y a des échanges de matière. Le français Pierre Duhem l'étend au cas des réactions chimiques. Pour cela, ils mettent la variation d'énergie interne sous la forme:

$$dU = dF + T.dS + dG$$

où G est une fonction appelée depuis fonction de Gibbs. Dans le cas de nos aliments, la fonction de Gibbs mesure leur valeur énergétique telle qu'elle est indiquée sur l'emballage.

Gibbs remarque que toute variation d'énergie interne peut se mettre sous la forme du produit d'une grandeur intensive (mesurant une qualité) par la variation d'une grandeur extensive (mesurant une quantité), de sorte que toute variation de la fonction de Gibbs peut se mettre sous la forme:

$$dG = \sum \mu_i . dn_i$$

où μ_i est le potentiel de Gibbs du constituant i et n_i est le nombre d'unités de cet élément. En chimie, les potentiels de Gibbs portent le nom de potentiels chimiques.

Ces généralisations permettent d'étudier les cycles naturels des machines thermiques que sont les organismes vivants.

5. Entropie, information et démons de Maxwell

En 1877, Ludwig Boltzmann donne une expression statistique pour l'entropie à l'équilibre thermodynamique. Gibbs généralise cette expression au cas hors équilibre. Mais ce n'est qu'en 1948 que, cherchant à mesurer une quantité d'information, Claude Shannon trouve une expression en tout point identique à celle de Gibbs pour l'entropie.

L'irréversibilité thermodynamique apparaît alors comme due à une perte d'information sur l'état microscopique d'un système. Initialement associée à un mouvement macroscopique, commun à tout un ensemble de molécules, l'énergie mécanique se transforme en chaleur lorsque ce mouvement se disperse pour devenir un mouvement désordonné, différent pour chacune des molécules du système. Il y a perte d'information sur le système. L'entropie thermodynamique apparaît comme un cas particulier de l'expression de Shannon.

C'est Ralph Landauer qui, en 1961, montre que toutes les fois qu'on efface une mémoire, il y a production de chaleur. Entropie et information deviennent alors des grandeurs physiques identiques (au signe près). Cette identification permet de résoudre un certain nombre de paradoxes comme celui de Gibbs sur l'entropie de mélange. Mélanger deux gaz différents est généralement considéré comme une opération irréversible. Il y a augmentation d'entropie du système, aussi petite que soit la différence entre les deux gaz. Mais si ces deux gaz sont identiques, alors l'entropie du système ne change pas.

Il est plus satisfaisant de dire que l'entropie d'un système dépend de l'information qu'on a sur ce système, mais beaucoup de physiciens refusent encore de donner à l'entropie ce caractère subjectif. Il me paraît cependant nécessaire, si l'on veut conserver le libre arbitre et la possibilité de faire des choix éthiques. Bien que subjective au niveau individuel, l'entropie reste objective au niveau de la société. Elle est parfaitement mesurable de manière statistique.

C'est Maxwell lui-même qui eu l'idée de considérer un démon capable de séparer les molécules rapides des molécules lentes d'un gaz. Il suppose que cette opération est possible en faisant glisser une porte ne nécessitant aucun effort mécanique. Le démon crée ainsi, sans dépense d'énergie, une différence de température capable de faire fonctionner un moteur thermique. La encore, la seule information apportée par le démon

permet de réduire l'entropie du système et de convertir de la chaleur en énergie mécanique.

6. Les catalyseurs ou enzymes

Les catalyseurs ou enzymes sont des corps capables d'accélérer considérablement la vitesse des réactions chimiques. Nous allons voir que leurs propriétés sont formellement les mêmes que celles d'une entreprise industrielle ou commerciale.

Prenons par exemple un mélange stœchiométrique d'oxygène et d'hydrogène à l'état gazeux. Rien ne se passe. Introduisez un morceau de platine, le mélange explose. Pourquoi? Dans un mélange gazeux, les molécules se déplacent rapidement et ne se rencontrent qu'occasionnellement. Lorsqu'elles se rencontrent, elles ont tendance à se repousser. Elles n'ont pas assez d'énergie pour franchir la barrière de potentiel qui les séparent. Rien ne se passe.

Si, par contre, on introduit une surface de platine, friands d'électrons, les atomes d'oxygène viennent s'y fixer. Il deviennent alors beaucoup plus facile à saisir. Lorsqu'une molécule d'hydrogène vient les heurter, elle repart aisément avec un atome d'oxygène, pour former une molécule d'eau.

La grande barrière de potentiel qui empêchait la réaction de se produire a été remplacée par trois barrières plus petites. Une première barrière pour fixer l'oxygène sur le platine, une seconde barrière pour lui associer une molécule d'hydrogène et une dernière barrière pour en détacher une molécule d'eau (fig.1).

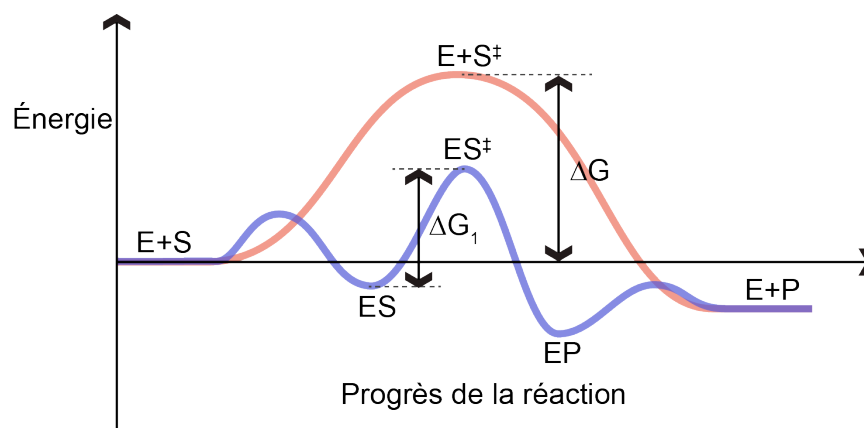


Figure 1: Potentiels chimiques. E: enzyme, S: substrat, P: produit. En rouge, la réaction non catalysée; en bleu, la réaction catalysée (d'après Wikipedia).

On peut considérer la surface de platine comme un "gigantesque" hall d'assemblage de molécules d'eau et dire qu'une réaction non catalysée est, par rapport à une réaction catalysée, ce que l'artisanat est par rapport à l'industrie. La différence est dans la vitesse à laquelle la formation du produit final s'effectue.

La figure 1 montre que la barrière de potentiel centrale sépare deux puits de potentiels de profondeurs inégales. La réaction ne se poursuit que si le niveau d'énergie final est inférieur au niveau initial, c'est-à-dire si la réaction est exothermique. Celle-ci peut en effet se produire dans les deux sens. Une molécule d'eau peut tout aussi bien arriver sur la surface de platine, y laisser fixé un atome d'oxygène et repartir sous la forme d'une molécule d'hydrogène. Cependant, la probabilité que cela se produise est beaucoup plus faible que celle de l'inverse, parce que le puits de potentiel final est plus grand que le puits de potentiel initial.

On voit que le catalyseur se comporte comme un démon de Maxwell. Il est capable de distinguer les molécules finales des molécules initiales, comme le démon de Maxwell

distingue les molécules rapides des molécules lentes. De fait, les différences de profondeur des puits de potentiels correspondent à des différences de température “fictives” proportionnelles à leurs profondeurs respectives.

La réaction a lieu parce que la combustion de l'hydrogène dégage de la chaleur. De même, la production industrielle n'a lieu que parce que le produit final a plus de valeur marchande que les produits initiaux. Les économistes parlent de plus value. Dans ce cas, c'est nous qui sommes les démons de Maxwell. C'est nous qui, statistiquement, apportons l'information sur la valeur marchande des produits fabriqués par la façon dont nous consommons.

7. Les cycles en biochimie

Nous avons vu que les organismes vivants sont des structures dissipatives. Comme les cyclones, ils se sont auto-organisés pour dissiper l'énergie. Comme eux ils forment des cycles naturels, mais ce sont des cycles de réactions chimiques. Ce sont les cycles de réactions parcourus par les enzymes en cours du temps. La figure 2 montre un exemple de tel cycle dans le cas d'un seul catalyseur ou enzyme produisant C à partir de A et B. Le cycle se termine lorsque l'enzyme est régénéré.

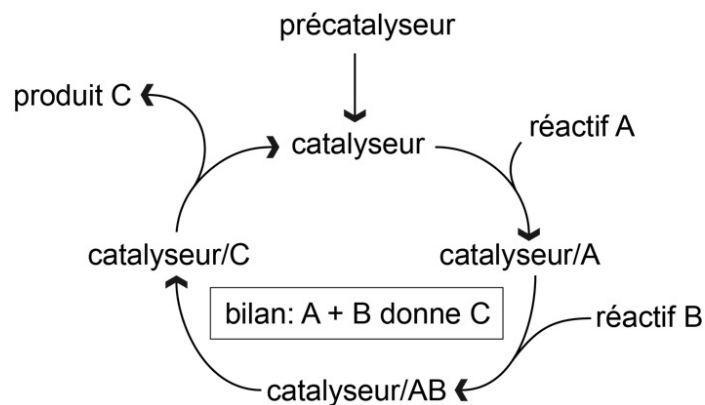


Figure 2: cycle de réactions chimiques

On retrouve les mêmes cycles en économie. Dans ce cas, la monnaie joue le rôle du catalyseur. L'entreprise investit une certaine somme pour fabriquer le produit C. Cet investissement sert en particulier à acheter la matière première A, puis la matière première B avec l'ensemble desquels elle fabrique le produit C. La vente du produit C, permet de récupérer l'investissement et de recommencer l'opération autant de fois que nécessaire.

Les cycles économiques sont instables comme les cycles de Carnot. Si le produit C se vend bien, l'entreprise fera des bénéfices qu'elle pourra réinvestir en lançant une entreprise similaire. Les bénéfices des deux entreprises permettront alors de doubler à nouveau le nombre des entreprises similaires, etc... En biologie, on parle de cycle autocatalytique. On observe une avalanche d'entreprises similaires. Si, par contre, le bénéfice est inférieur à l'investissement, l'entreprise fait faillite. De même qu'une machine thermique s'emballe ou cale, de même une entreprise croit exponentiellement ou fait faillite. Nous verrons que, thermodynamiquement, le passage d'un cas à l'autre correspond à un état critique.

8. Les états condensés

Cela nous conduit à la thermodynamique des états condensés. Suivant sa pression P et sa température T un corps pur peut être dans un état solide, liquide, ou gazeux. Si on représente son état par un point de coordonnées P et T (figure 3), une ligne, dite de transition de phase, sépare la région où celui-ci est liquide de celle où il est gazeux. Cette

ligne a la particularité de s'arrêter en un point dit critique C au delà duquel il n'y a plus de différence entre l'état liquide et l'état gazeux. Il est possible de passer continuellement de l'état liquide à l'état gazeux en contournant le point critique.

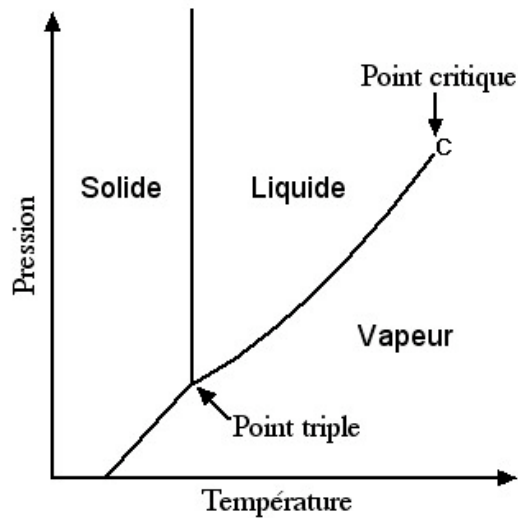


Figure 3: diagramme montrant les divers états de la matière

Le passage direct de l'état liquide à l'état gazeux comme l'ébullition, où son inverse la condensation de l'eau, s'appelle une transition de phase abrupte. Les transitions abruptes comme l'ébullition nécessitent un apport de chaleur sans qu'il y ait augmentation de température, tandis que la condensation de l'eau produit un dégagement de chaleur. La chaleur ainsi échangée porte le nom de chaleur latente. Lorsque le corps est très pur, la transition ne s'effectue pas spontanément. Un « germe » est nécessaire pour la déclencher. On met souvent un peu de sel dans l'eau pour faciliter l'ébullition.

Au point critique la chaleur latente s'annule. On parle alors de transition continue. Le point critique est un point où le fluide est extrêmement instable. Il se condense de lui-même pour former un brouillard appelé opalescence critique. Ce brouillard a la propriété d'avoir le même aspect à l'œil nu, à la loupe ou au microscope. On dit qu'il est invariant par changement d'échelle. La taille des gouttelettes varie en raison inverse de leur nombre suivant une loi de puissance dite loi en $1/f$. En conséquence, les fluctuations de densité du fluide ont une variance qui tend vers l'infini.

Suite aux travaux de Denis Papin, les premières machines thermiques ont fonctionné avec de l'eau portée à l'ébullition. L'avantage est d'obtenir ainsi facilement de grandes variations de volume. L'inconvénient est un rendement de Carnot faible, la différence de température entre la source chaude et la source froide étant voisine de 100°K . À la suite du travail de Carnot, on a développé les moteurs à combustion interne pour lesquels la différence de température est un ordre de grandeur plus élevé. Leur rendement est bien meilleur, mais elles nécessitent des pièces mécaniques capables de résister à haute température.

L'autre option est de faire marcher une machine thermique au voisinage du point critique. La moindre différence de pression y provoque des variations de volume énormes. Malheureusement, le rendement de Carnot y est très faible. Nous allons voir que c'est une instabilité du même type qui permet aux machines thermiques naturelles de s'auto-organiser en présence d'une différence de température.

9. La criticalité auto-organisée

Ce concept a été introduit en 1987 par le physicien danois Per Bak⁴. Spécialiste des transitions de phase, il s'est intéressé au bruit en $1/f$ émis par les solides sous tension. Il a montré que l'origine physique de ce bruit est une instabilité semblable à celle des fluides au point au point critique et a appelé ce phénomène « criticalité auto-organisée ». Peu à peu, les physiciens sont arrivés à la conclusion que toutes les structures dissipatives s'auto-organisent à partir d'une instabilité de ce type.

Posons une casserole d'eau sur le feu. Tant que le gradient de température est faible, la chaleur se propage par conduction. Il existe un gradient critique à partir duquel des avalanches de molécules d'eau se déclenchent (à la manière des avalanches dans les tas de sable, lorsque la pente du tas dépasse une certaine valeur critique). Lorsque le gradient de température dépasse la valeur critique, la convection s'installe formant ce qu'on appelle des cellules de Bénard. Elles sont un bel exemple de structure auto-organisée au voisinage d'un point critique.

On retrouve ici le fait que lorsque deux processus physiques sont en compétition (conduction ou convection) celui qui dissipe l'énergie le plus vite l'emporte. En dessous du gradient critique la conduction l'emporte. Au dessus, la convection l'emporte. Le passage de la conduction à la convection peut être considéré comme une transition de phase. Pour les physiciens étudiant les écosystèmes, le processus est de même nature que la sélection naturelle en biologie. C'est de cette manière que les écosystèmes évoluent de façon à maximiser la vitesse à laquelle ils dissipent l'énergie.

Reprenons notre description de la cellule de Bénard. Au centre de la cellule, le fluide est immobile. C'est un point critique. Le fluide décrit des cycles de Carnot autour de ce point. Les avalanches de molécules se déclenchent au voisinage de la source chaude. Le fluide monte alors vers la surface qui joue le rôle de source froide. Devenu plus dense, il redescend vers la source chaude. Plus on s'éloigne du point critique central, plus le temps de parcours du cycle est long, mais plus l'amplitude des avalanches est grande. On retrouve bien la loi en $1/f$: l'amplitude des avalanches est inversement proportionnelle leur fréquence⁵.

10. Éléments de thermo-économie

Nous considérons ici l'économie comme l'étude du métabolisme des sociétés humaines, c'est-à-dire l'étude des processus thermodynamiques suivant lesquels une société humaine s'auto-organise et dissipe l'énergie.

Cette étude s'applique aussi bien à une société industrielle ou commerciale qu'à un pays comme la France, ou un ensemble de pays comme l'Europe. Ce sont des systèmes thermodynamiques que l'on identifiera par leurs frontières. Les frontières permettent de spécifier les échanges avec l'extérieur, que ce soit des produits matériels, de l'énergie ou des informations comme la monnaie.

Il semble naturel d'aborder cette étude en utilisant le même formalisme que pour le métabolisme: celui des potentiels de Gibbs. Dans ce cas, ceux-ci représentent la valeur économique (ou "potentiel" économique) des objets considérés. En économie, on

(4) Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld, *Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise*, *Phys. Rev. Letters*, 59-4, 1987.

(5) On suppose ici que la vitesse de rotation du fluide ne dépend pas de la distance au centre de rotation. En réalité, elle en dépend légèrement, c'est pourquoi la loi en $1/f$ est approximative. Elle est de la forme $f^{-\alpha}$ où α est de l'ordre de l'unité. L'expérience montre que α est généralement compris entre 0,8 et 1,3, quel que soit le système physique considéré.

distingue la valeur d'usage de la valeur d'échange. On mettra donc dG sous la forme:

$$dG = \sum \mu_i \cdot dn_i + \sum v_j \cdot dn_j$$

où μ_i est la valeur d'usage de l'objet i et v_j sa valeur d'échange. Les accroissements dn représentent le nombre d'objets correspondants importés. Si l'on néglige le troc, tous les échanges se font avec de la monnaie (quelque soit sa forme). Dans ce cas, les v_j représentent la valeur des billets de banque ou leurs équivalents et les dn_j leur nombre.

Pour l'ensemble de la production d'une société, nous poserons:

$$P = -\sum \mu_i \cdot dn_i / \sum dn_i \quad \text{et} \quad dV = \sum dn_i$$

où P est le potentiel économique global de la production (c'est-à-dire son utilité ou pouvoir de vente) et dV est l'accroissement de la production.

De même, nous poserons:

$$T = \sum v_j \cdot dn_j / \sum dn_j \quad \text{et} \quad dM = \sum dn_j$$

où T est le potentiel économique de la monnaie ou pouvoir d'achat. Nous verrons qu'il joue le rôle d'une température. dM est l'accroissement de la monnaie ou gain associé à la production.

La signification de P et T s'obtient en écrivant:

$$dG = (\partial G / \partial V) \cdot dV + (\partial G / \partial M) \cdot dM = -P \cdot dV + T \cdot dM$$

Le pouvoir de vente P apparaît comme une énergie dissipable par unité de volume de la production, tandis que le pouvoir d'achat T apparaît comme une énergie dissipable par unité monétaire. *T est l'inverse du coût de l'énergie.* Comme les potentiels de Gibbs en biochimie, pouvoir de vente (utilité) et pouvoir d'achat (richesse) mesurent une capacité à dissiper l'énergie. Cette interprétation pourra surprendre un économiste. Elle est cependant conforme à notre connaissance générale des êtres vivants.

L'idée n'est pas nouvelle. Boltzmann lui-même écrivait en 1905 que la lutte pour la vie est une lutte pour dissiper l'énergie⁶. En 1922, Alfred Lotka montrait que la sélection naturelle favorise l'organisme vivant qui dissipe l'énergie le plus vite^{7, 8}. Enfin, en 1926, Frederick Soddy énonçait clairement que le bien être d'un individu se mesure en termes du flux d'énergie qu'il dissipe. En cherchant à maximiser son bien-être, l'humanité maximise le flux d'énergie qu'elle dissipe⁹.

À l'équilibre (état stationnaire) $dG = 0$, d'où:

$$P \cdot dV = T \cdot dM$$

expression qui généralise la relation de Gibbs-Duhem à l'économie. Le membre de gauche représente l'offre, tandis que le membre de droite représente la demande. Cette relation exprime simplement l'équilibre économique entre l'offre et la demande. On remarquera que l'énergie n'y intervient pas. Cela explique pourquoi les économistes s'en sont rarement préoccupés et ont éprouvé des difficultés à expliciter son rôle.

Remarquons que, de même que les gradients de température créent les mouvements de convection, de même la demande crée l'offre et non pas le contraire, comme l'a prétendu l'économiste français Jean-Baptiste Say (1767-1832). Cela montre à quel point

(6) Boltzmann, L., *Populare Schriften (Popular Writings)*. Leipzig: J. A. Barth, 1905.

(7) Lotka, A., *Contribution to the energetics of evolution*. PNAS 8, 147-151, 1922.

(8) Lotka, A., *Natural Selection as a Physical principle*. PNAS 8, 151-154, 1922.

(9) Soddy, F., *Wealth, Virtual Wealth, and Debt*, G. Allen & Unwin, 1926.

l'homme a du mal à raisonner objectivement lorsqu'il s'agit de son propre comportement. C'est en cela, que l'étude des lois de la biologie s'avère indispensable.

11. Les cycles économiques

Les économistes constatent depuis longtemps l'existence de cycles économiques sans en comprendre l'origine¹⁰. L'analogie avec le comportement des fluides incite à penser qu'en présence d'un flux d'énergie, des inégalités ou gradients de richesse apparaissent. Lorsque le gradient de richesse atteint une valeur critique, des cycles économiques s'auto-organisent.

Nous avons décrit les principales phases de ces cycles à la section 3 (développement, production, obsolescence et transition). On peut représenter ces cycles dans un diagramme (P,V) ou (T,M) comme on le fait pour un cycle de Carnot (fig.3). Prenons l'exemple d'une entreprise industrielle. Durant la phase développement, le potentiel économique P de la production croît, mais pas le volume V de la production. Durant la phase de production, P reste constant, tandis que V augmente. Durant la phase d'obsolescence, P décroît, tandis que V n'augmente plus.

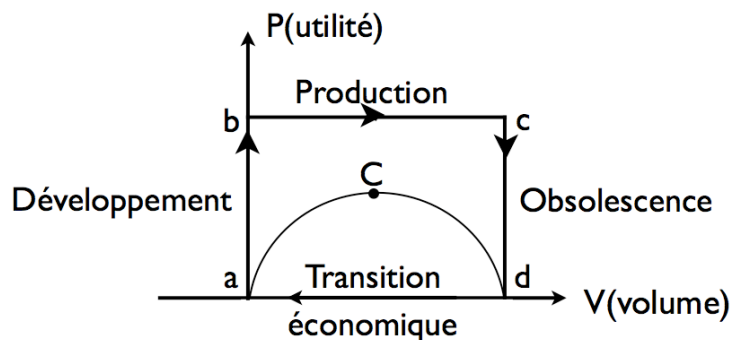


Figure 3a: Diagramme (P,T) d'un cycle économique

Supposons l'entreprise cotée en bourse¹¹. Durant le développement le potentiel T des actions (cote en bourse) augmente mais le capital diminue. Durant la phase de production T reste plus ou moins constant pendant que l'entreprise engendre des bénéfices (M augmente). Durant la phase d'obsolescence M augmente beaucoup moins, tandis que T décroît.

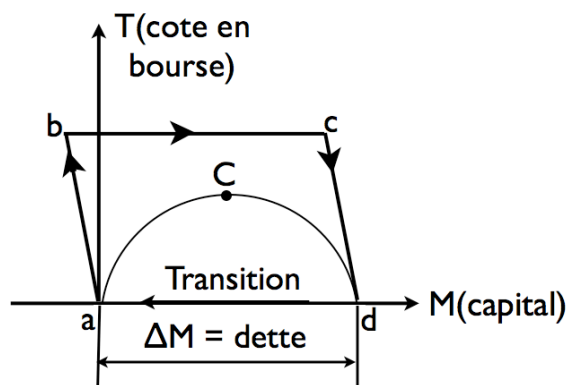


Figure 3b: Diagramme (T,M) d'un cycle économique

(10) Voir le travaux de Clément Juglar (1852) puis ceux de Nicolas Kondratiev (1920).

(11) On considère ici les actions comme une monnaie.

Les problèmes surgissent lorsqu'il faut refermer le cycle. On arrive dans la zone de transition de phase. Il s'agit d'une transition abrupte. ΔM représente la dette. Il faut rembourser les actionnaires. Rappelons que le produit $T \cdot \Delta M$ est l'analogie de la chaleur latente de transition. Elle croît extrêmement vite dès qu'on s'écarte du point critique (la pente est verticale).

De deux choses l'une. Ou bien les actionnaires ont fait du profit auquel cas il vont réinvestir et un nouveau cycle peut recommencer. Ou bien ils ont eu des pertes, auquel cas on récupère ce qu'on peut en vendant l'entreprise.

Tout ceci suppose qu'on revient effectivement à l'état initial (point a de la fig. 3). Mais est-ce réellement cas? Les bilans financiers tiennent généralement compte du vieillissement du matériel et des locaux de l'entreprise. Mais a-t-on tenu correctement compte du vieillissement du personnel (charges dites sociales)? Sécurité sociale, assurance maladie, retraite, éducation des enfants sont généralement laissés en grande partie à la charge de la nation.

Sont aussi laissés à la charge de la nation les modifications de l'environnement: épuisement des ressources naturelles, pollution. Par définition, une structure dissipative, diminue son entropie interne pour l'exporter vers son environnement ¹². Les entreprises n'échappent pas à la règle. L'environnement d'une entreprise nationale est la nation. C'est elle qui paye la plupart des impayés. Dans le cas d'une entreprise internationale, c'est l'humanité toute entière qui en fait les frais.

En période de croissance économique, les bénéfices sont suffisants pour qu'une nation puisse équilibrer son budget à travers les impôts. Mais dès que la croissance diminue, les dettes s'accumulent. Tôt ou tard, la nation est acculée à la faillite.

12. Les transitions économiques

Comme les animaux, l'homme a tendance à épuiser ses ressources naturelles. Malthus l'avait bien vu. Historiquement, cela a commencé par l'épuisement des terres cultivables. Ce fut ensuite le cas des matières premières. On situe la fin de l'âge de bronze à 1177 av. J.C.¹³. Cette date précise peut surprendre. Les physiciens parlent de transition abrupte. Ce fut effectivement le cas.

Tout le monde sait qu'aujourd'hui que nos ressources pétrolières ont atteint leur pic de production. Or le pétrole est devenu une de nos ressources principales en énergie. Cela signifie que le prix de l'énergie va inexorablement augmenter. En conséquence son inverse, la température T de l'économie (section 10) va diminuer et descendre en dessous du point critique. Ce qui nous conduit à une transition économique.

Cette situation se traduit par une dette croissante de la société. Le cas d'une société isolée ou largement dominante, ne pose pas trop de problèmes. Cette société réémet de la monnaie car elle peut supporter une dévaluation. Le problème se pose lorsque plusieurs états effectuent des échanges commerciaux avec la même monnaie. Ce fut le cas en 1177 av. J.C. où des civilisations méditerranéennes différentes s'étaient engagées dans des échanges commerciaux intenses avec une monnaie unique, l'or. C'est le cas aujourd'hui de l'Europe où des pays différents sont engagés dans des échanges commerciaux avec une monnaie unique l'Euro.

On observe alors ce que les physiciens appellent une instabilité au point critique. Nous avons vu (section 7) que le système autocatalytique des investissements monétaires

(12) Voir: Bibliographie 3.

(13) Voir: Bibliographie 11.

gène des avalanches de profits dont l'amplitude est en $1/f$ ¹⁴. Cela entraîne une distribution des richesses du même type, comme l'a très bien constaté l'économiste Vilfredo Pareto (1848-1923). Au fur et à mesure qu'on se rapproche du point critique, les inégalités sociales augmentent non seulement entre les individus, mais aussi entre les nations qui partagent la même monnaie.

Lorsque l'instabilité au point critique se manifeste, un fluide se divise en deux phases, une phase vapeur et une phase liquide caractéristique de l'opalescence critique. Le même processus s'applique à l'économie. La distribution des richesses se sépare en deux "phases", une phase "vapeur" constituée d'un petit nombre de gens très riches, jouissant d'énergie et de liberté, et une phase "liquide" dans laquelle se trouvent emprisonnés un nombre croissant de gens pauvres privés d'énergie et de liberté. La classe moyenne s'effondre.

Simultanément la dette de la société ne cesse de croître jusqu'au point de devenir intolérable, d'autant plus qu'elle n'est pas également partagée entre tous les pays qui utilisent la même monnaie. Un nombre croissant d'entreprises sont en difficultés. Elles ne peuvent s'en sortir qu'en reportant le plus de charges possibles sur la société, notamment les charges sociales, et en précarisant l'emploi. Le taux de chômage augmente.

Si une nation ne s'arrête pas de fonctionner du jour au lendemain, une entreprise en faillite le fait. Lorsqu'un grand nombre d'entreprises tombent en faillites au même moment, on parle d'effondrement économique. Comme beaucoup dépendent les unes des autres, elles s'arrêtent de produire toutes ensemble. Le volume V de la production passe brutalement du point d au point a de la figure 3a. L'effondrement économique a bien les caractères d'une transition abrupte.

13. De l'utilité de deux monnaies

Les principes fondamentaux de la thermodynamique s'appliquent clairement à l'économie. On peut les énoncer sous une forme très voisine. Je propose les énoncés suivants:

Premier principe: Une économie ne peut pas fonctionner sans un flux permanent d'énergie qui la traverse.

Deuxième principe: Une économie ne peut pas fonctionner durablement avec une seule monnaie.

Nous avons vu qu'en économie la monnaie M joue, au signe près, le rôle de l'entropie. Toute production d'entropie se traduit par une perte de valeur monétaire et inversement. Ce que les physiciens appellent une probabilité de transition devient en économie une probabilité de transaction. On peut facilement montrer que dans une suite de transactions de probabilité p_i , l'espérance de gain ΔM est donnée par:

$$\Delta M = \sum p_i \cdot \log p_i$$

ce qui est l'expression donnée par Gibbs pour l'entropie ou celle donnée par Shannon pour l'information. Pour une justification théorique de cette expression, voir la référence 1 (p. 177). À titre d'exemple, je propose d'appliquer ce formalisme à une suite de transactions économiques équivalente au fonctionnement d'un catalyseur.

La figure 4 est analogue à la figure 1, mais appliquée à l'économie. Un négociant achète un produit dans un pays à faible valeur monétaire (T_1 faible) pour le revendre dans un pays à haute valeur monétaire (T_2 élevé). Il va effectuer trois transactions successives que l'on doit considérer dans l'ordre inverse. Ayant une haute valeur monétaire, la

(14) Le mathématicien Benoît Mandelbrot a montré que les fluctuations du marché suivent effectivement une loi en $1/f$.

monnaie reçue lors de la vente des produits est changée avantageusement contre une monnaie à plus faible valeur monétaire, qui lui permet d'acheter aisément le produit ensuite revendu.

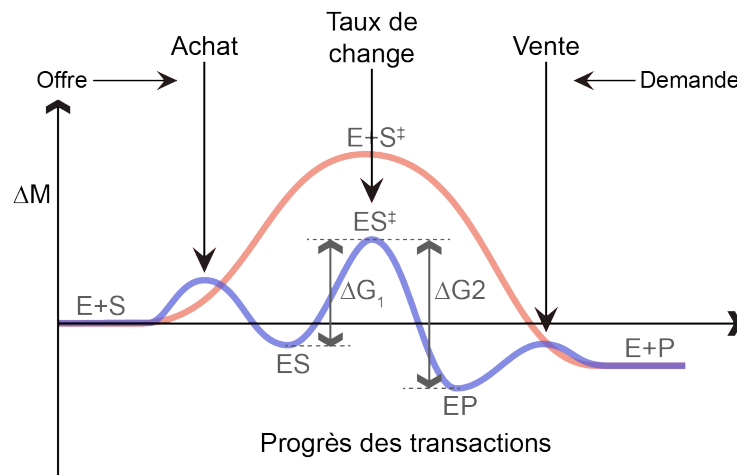


Figure 4: Potentiels économiques

La probabilité de transaction directe entre l'acheteur et le vendeur aurait été clairement beaucoup plus faible sans intermédiaire. Celui-ci a donc bien joué le rôle de catalyseur en accélérant la vitesse des transactions. Celles-ci donnent du travail à la population du pays à faible valeur monétaire, contribuant à diminuer le chômage et à réduire les inégalités entre les deux pays.

L'usage de deux monnaies différentes dont on peut faire varier le taux de change, permet d'ajuster la barrière de potentiel économique qui sépare les deux économies, donc d'ajuster la vitesse avec laquelle se font les échanges. On dispose enfin de l'équivalent du régulateur à boules pour l'économie. Celui-ci permet d'ajuster la pression économique en réglant la différence de température entre les deux économies, donc d'ajuster la vitesse des échanges en fonction du flux d'énergie disponible.

14. Deux monnaies, un seul pays

Pourquoi utiliser deux monnaies pour un seul et même pays? Nous avons vu que les échanges économiques entre deux pays permettent de réduire leurs inégalités en donnant du travail aux habitants du pays le moins développé. De même, l'usage de deux monnaies différentes à l'intérieur d'un même pays est un moyen de réduire les inégalités sociales en donnant du travail aux plus démunis. Il permet de diminuer le chômage et de faire repartir l'économie.

L'idée n'est pas nouvelle. Elle est due à Keynes (1883-1946). Celui-ci a montré qu'une politique d'investissement gouvernemental pouvait en effet relancer l'économie, mais il n'a pas explicité qu'il s'agissait de deux monnaies différentes, ni leur rôle respectif. De toute évidence, une seconde monnaie est inutile, si elle fait double emploi avec la première.

Pour aller plus loin, il faut se rappeler que nous cherchons à résoudre un problème de transition économique, notamment de passer d'une économie liée à des ressources non-renouvelables comme le pétrole, à une économie liée à des ressources renouvelables. Cela nous incite tout naturellement à réserver la monnaie actuelle, disons l'euro, pour l'économie d'aujourd'hui et à réserver la nouvelle monnaie pour ce qui deviendra l'économie future.

Par analogie avec la biochimie, je propose d'appeler la nouvelle monnaie « l'enzyme ». À mesure que les énergies fossiles vont s'épuiser, la température de l'économie en euros va baisser, tandis que celle en enzymes va augmenter. En laissant le taux de change

évoluer progressivement, on aura remplacé une transition abrupte par une transition continue.

Que nous apprend la biochimie à ce sujet? Nous avons vu que les catalyseurs y jouent le rôle de la monnaie. Loin d'utiliser un seul et unique catalyseur, les organismes vivants en utilisent toute une panoplie, chacun étant lié à une application particulière appelée « voie métabolique ». Ce que nous proposons ici est tout simplement de créer deux voies métaboliques, l'une liée aux énergies fossiles, l'autre liée aux énergies renouvelables.

Il est clair que, comparée à l'organisation des êtres vivants, l'humanité en est encore à un stade d'organisation très élémentaire. Il est intéressant de la comparer à ce qu'on sait des premiers stades d'évolution de la vie. Celle-ci a commencé avec l'assemblage de longues chaînes moléculaires appelées polymères. Une variété particulière de polymères a donné naissance aux enzymes actuels. Ce sont les polypeptides.

Mais ces assemblages moléculaires très élaborés sont fragiles. Il suffit qu'un élément de la chaîne soit défectueux pour que tout s'arrête. Plus ces éléments sont nombreux, plus la probabilité de défaillance est élevée. On reconnaît ici le problème de nos sociétés complexes. Comment ce problème a-t-il été résolu? Par l'apparition de nouvelles chaînes moléculaires capables de seconder les premières: les polynucléotides. Ils ont assuré les « transitions métaboliques ». Inspirons-nous d'eux.

Comment procéder pratiquement? En conservant la monnaie en euros pour l'achat de biens matériels et en utilisant la monnaie en enzyme pour la nourriture, les salaires, et les services. On en voit immédiatement tout l'intérêt pour un développement écologique. En passant à une monnaie en enzymes, l'économie dite de « fonctionnalité » se distingue immédiatement de l'autre. De même, un regroupement d'industriels capables de créer une économie circulaire, passe à l'enzyme. On peut facilement distinguer les deux régimes par des taxes ou des impositions différentes.

Peu à peu, l'humanité réalisera que son économie ne peut durer que si elle repose sur l'énergie solaire. Elle réalisera aussi qu'elle est indiscociable de la machine thermique « Terre », baptisée par James Lovelock « Gaïa ». Elle ne peut évoluer que de concert avec elle.

Bibliographie

Sur la thermodynamique:

- 1) Sadi Carnot. *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Bachelard, 1824.
- 2) Eric D. Schneider, Dorion Sagan. *Into the cool. Energy flows, thermodynamics and life*. Chicago, 2005.
- 3) François Roddier. *Thermodynamique de l'évolution*. Parole, 2012.
- 4) Per Bak. *How Nature Works, the Science of Self-organized Criticality. Copernicus*, 1996. Traduit en français sous le titre: *Quand la nature s'organise*. Flammarion, 1999.
- 5) Ricard D. Solé. *Phase Transitions*. Princeton, 2011.

Sur l'évolution de l'humanité:

- 6) Roger-Maurice Bonnet, L. Woltjer. *Surviving 1000 centuries. Can we do it?* Springer, 2008.
- 7) Joseph A. Tainter. *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge, 1988.
- 8) Jared Diamond. *Collapse. How Societies Choose to Fail or Succeed*. Viking, 2005. Traduit en français sous le titre: *Effondrement: Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, 2006.
- 9) Bryan Ward-Perkins, *The fall of Rome and the end of civilization*. Oxford, 2005.
- 10) Jean-Paul Demoule, *On a retrouvé l'histoire de France. Comment l'archéologie raconte notre passé*. Laffont, 2012.
- 11) Eric H. Cline, *1177 B.C.. The Year Civilization Collapsed*. Princeton, 2014.