

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 16, printemps 2017

La représentation face à l'explosion des données

Res-Systemica, volume 16, article 02

L'équation de van der Waals appliquée à l'économie

François Roddier

contribution reçue le 19 février 2017

13 pages



Creative Commons

L'équation de van der Waals appliquée à l'économie

François Roddier
francois.roddier@wanadoo.fr

Résumé: *Comme tout organisme vivant, une société humaine ne peut subsister que grâce à un flux permanent d'énergie qu'elle dissipe. L'économie est l'étude de son métabolisme. Celui-ci est décrit à l'aide de deux potentiels de Gibbs que nous identifions à l'offre et à la demande. On montre que l'état d'une économie peut être représenté par une équation de type van der Waals. Les cycles économiques apparaissent comme des oscillations autour du point critique conformément au processus de criticalité auto-organisée de Per Bak.*

Summary: *Like any living organism, a human society cannot survive without an everlasting flow of energy which it dissipates. Economy is the study of its metabolism. It is described here by means of two Gibbs potentials we identify as demand and supply. It is shown that the state of an economy can be described by means of a van der Waals type equation. Economic cycles appear to be oscillations around the critical point as expected from Per Bak's process of self-organized criticality.*

1. Introduction

Dans un premier article (1), j'ai montré que le modèle de cerveau de Bak et Stassinopoulos (2) peut s'appliquer à l'économie, considérée comme un ensemble d'agents (neurones) effectuant des échanges de biens ou de services. Les signaux d'entrée expriment les besoins (demande) tandis que les signaux de sortie expriment les offres commerciales. J'assimile l'excitation des neurones à la richesse monétaire des agents.

Le modèle ajuste automatiquement deux paramètres, l'intensité des connections entre les neurones et leur seuil d'excitation. En économie, le premier paramètre correspond à l'intensité des échanges (flux des valeurs commerciales), le second aux seuils de richesse à partir duquel la transaction a lieu. Le modèle suppose que les agents peuvent tous bénéficier démocratiquement d'une même offre. Si celle-ci améliore le bien-être général, les échanges commerciaux sont intensifiés qu'ils soient liés ou non à l'offre. Dans le cas contraire les échanges sont diminués.

Le modèle 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, voire au monde entier. Il décrit une société en quête d'énergie comme il décrit le cerveau d'un animal en quête de nourriture. Lorsque l'énergie/nourriture vient à manquer, la société ou le cerveau traverse une phase de crise au cours de laquelle l'état de ses échanges ou connections est modifié de façon à maximiser à nouveau l'apport d'énergie/nourriture (voir la figure 2 de l'article 1). Dans les deux cas, il y a réorganisation du système.

Dans un second article (3), je compare l'économie d'une société humaine au métabolisme d'un organisme vivant. Le second principe de la thermodynamique nous apprend que l'un comme l'autre ne peuvent produire de l'énergie mécanique qu'en échangeant des calories avec deux sources de chaleur de températures différentes. Un être vivant reçoit ses calories de sa nourriture, essentiellement les sucres et les graisses. Nos sociétés actuelles les reçoivent majoritairement de sources fossiles (charbon, pétrole ou gaz). L'un comme l'autre doivent rendre des calories à une source froide, c'est-à-dire évacuer de l'entropie. On sait aujourd'hui qu'une exportation d'entropie correspond à une importation d'information. L'un comme l'autre reçoivent cette information de leur environnement (voir la figure 2 de l'article 1). Elle permet à la société, comme au cerveau, de se réorganiser.

Ces échanges s'effectuent au cours de cycles comparables à un cycle de Carnot. Du point de vue thermodynamique, la réorganisation d'une société, comme celle du cerveau, correspond à une transition de phase. La chaleur évacuée est ce qu'on appelle une chaleur latente de changement d'état. En biologie les cycles de transformation sont des cycles de réactions chimiques. Elles nécessitent des catalyseurs appelés enzymes. Elles sont décrites par des potentiels thermodynamiques appelés potentiels chimiques de Gibbs-Duhem.

Dans le second article (3), j'ai proposé de décrire de même les échanges économiques en affectant à chaque production deux potentiels semblables aux potentiels de Gibbs-Duhem. L'un correspond à la valeur d'usage des objets produits, l'autre à leur valeur d'échange. J'ai toutefois considéré à tort la valeur d'usage comme un potentiel de vente, alors qu'il s'agit d'un potentiel d'achat. C'est la valeur d'échange qui est un potentiel de vente. Cela donne raison à Jean-Baptiste Say: l'offre crée bien la demande de la même manière que la température d'une chaudière y crée la pression.

Ici, je note P le potentiel d'achat d'une production (lié à la valeur d'usage des objets produits) car il joue le rôle d'une pression «sociale». P

correspond à ce que les économistes appellent *demande*. De même, je note T le potentiel de vente d'une production (liée à sa valeur d'échange). Nous verrons qu'il joue le rôle d'une température «économique». T correspond à ce que les économistes appellent *offre*.

La variation de la fonction de Gibbs du système est donnée par:

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

où dV est le volume de la production et dS l'apport monétaire qui lui est associé. Comme en biologie, la quantité dG représente une variation d'énergie interne du système. En régime stationnaire: $dG = 0$.

Le potentiel d'achat d'une production (par unité de volume):

$$P = -\partial G/\partial V$$

représente l'énergie libre que celle-ci permet de dissiper. Il joue le rôle des calories pour la nourriture. Comme pour elle, P mesure le bien-être que cet objet nous procure, ce que le physicien Frederick Soddy (8) avait compris dès 1926.

Son potentiel de vente est:

$$T = \partial G/\partial S$$

T représente la quantité d'énergie libre dissipable par unité monétaire investie dans la production. T mesure le rendement monétaire de la production et joue le rôle d'une «température économique». S représente le capital investi, noté M dans l'article précédent (3). Je préfère garder ici la notation S pour rappeler qu'il s'agit d'entropie. On sait qu'entropie et information sont deux grandeurs de même nature mais de signe opposé. Le capital apparait ici comme une information négative. C'est en effet le cas puisqu'il s'agit d'une dette due au propriétaire du capital. C'est aussi une information manquante en ce sens que le propriétaire d'un capital est constamment à la recherche d'informations en provenance de l'environnement pour savoir comment l'investir.

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 même société, T sera considéré comme étant le même pour tous les produits. T mesure ce que j'appelle la «température économique» de la société. Dans l'article précédent, je compare T à une «valeur en bourse».

Par contre les potentiels de vente P dépendent du produit considéré. Pour un ensemble de produits indépendants, le potentiel 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.

On sait que pour un gaz dit «parfait», les variables P , V et T sont liées par la relation $PV = RT$, appelée équation d'état. R est la constante des gaz parfaits. 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 produits de luxe. Une robe d'un grand couturier a d'autant plus de valeur que peu de gens en ont une.

En physique, l'équation des gaz parfaits s'applique d'autant mieux que la pression du gaz est plus faible. En économie, on va donc s'attendre à ce qu'elle s'applique aux objets pour lesquels la pression d'achat, c'est-à-dire la valeur d'usage, est faible. Ce qui compte, c'est leur valeur d'échange, et celle-ci est d'autant plus grande que l'objet est plus rare ou que son volume V de production est plus faible. C'est le cas des métaux précieux comme l'or ou l'argent, mais aussi des produits de luxe comme les bijoux, les œuvres d'art ou les objets de collection. 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 sait 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. Dans ces conditions, les molécules suffisamment proches peuvent s'attirer, créant des liaisons temporaires. Diverses expressions analytiques ont été proposées pour tenir compte de ces liaisons. La plus utilisée est l'équation de van der Waals dont l'équation d'état s'écrit:

$$(P + a/V^2)(V-b) = RT$$

Comparée à l'équation des gaz parfaits, l'équation de van der Waals contient deux termes correctifs. Le premier a/V^2 est le terme correctif sur la pression. Le second b est le terme correctif sur le volume.

Dans ce modèle, l'attraction entre les molécules crée une pression interne supplémentaire inversement proportionnelle au carré du volume. Quant au volume du gaz, il ne saurait être inférieur au volume b de ses molécules. L'importance de ce modèle est que, dans le plan (P,V) , ses isothermes rendent bien compte de l'existence d'un point critique en dessous duquel le gaz peut devenir instable et se condenser en une phase liquide et une phase vapeur.

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 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.

3. Représentation graphique.

Dans ce qui suit, j'appellerai désormais P «la demande» et T «l'offre». Comme dans le cas des fluides, on peut représenter l'état d'une économie par un point dans l'espace des trois variables P, V, T . Ces trois variables étant liées par une relation d'état, le point représentatif de l'économie se trouve sur une surface. Dans le cas de l'équation de van der Waals, cette surface est représentée sur la figure 1. Elle montre le volume V de la production annuelle en fonction de la demande P et de l'offre T .

La zone pour laquelle la demande P est élevée, mais le volume V de la production est faible, correspond à une économie de pénurie. Celle pour laquelle la demande P est faible, mais le volume V est élevé, correspond à une économie d'abondance, voire de surproduction. Enfin, celle pour laquelle l'offre est la plus forte est une zone de forte croissance économique. On notera que ce que les économistes appellent «élasticités» correspond à ce que les physiciens appellent compressibilités ou coefficients de dilatation.

À chaque produit ou service correspond un point sur la surface. Cependant, une même société peut produire plusieurs produits différents. Sa production correspond alors à un nuage de points. Dans ce cas, on considère le barycentre du nuage, en pondérant chaque bien par sa valeur

marchande. Dans l'industrie on parle du *chiffre d'affaire* d'une société. Pour un pays, on parle de son *produit intérieur brut* (PIB).

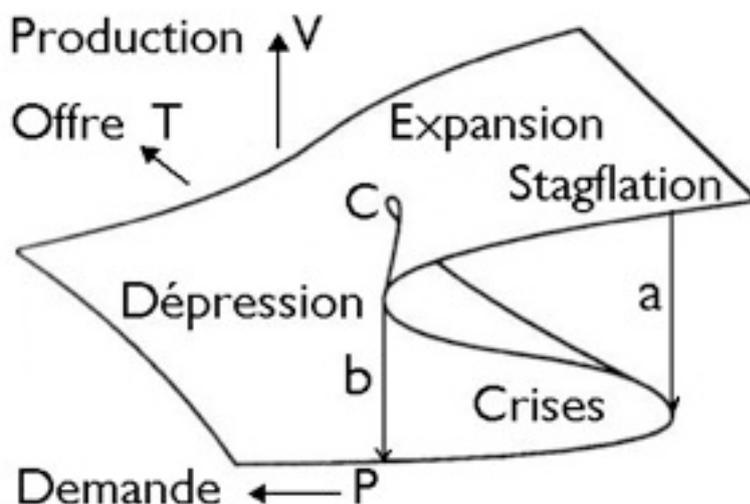


Figure 1 : Production économique en fonction de l'offre et de la demande.

On voit sur la figure que la surface de van der Waals forme un pli appelé «fronce». L'origine du pli est le point critique C. Tout point à l'intérieur du pli représente un état du système qui est nécessairement instable. Pour un fluide, il représente un état pour lequel son volume diminue lorsqu'il se détend, c'est-à-dire un phénomène de condensation. L'état du fluide passe brutalement de la partie supérieure du pli où, vapeur, il occupe un grand volume à sa partie inférieure où, devenu liquide, il occupe un volume beaucoup plus petit. Les thermodynamiciens appellent ce phénomène de condensation ou d'effondrement une transition de phase abrupte.

Les états situés sur la partie supérieure du pli, entre les flèches marquées a et b, sont dits métastables. Une propriété des transitions abruptes est qu'elles ne sont pas spontanées: elles nécessitent un germe. Elles peuvent se produire n'importe où entre les flèches a et b. Lorsque les germes sont abondants, elles se produisent statistiquement à mi-chemin. En économie on parle de récession (les historiens parlent de crises): la production s'effondre et les capitaux doivent être réinvestis ailleurs. C'est une époque de restructuration rapide de l'économie.

4. Identification au cycle de Carnot

Nous avons vu que le métabolisme des êtres vivants décrit des cycles de même nature qu'un cycle de Carnot. On doit donc s'attendre à ce que toute économie décrive aussi des cycles (3). De tels cycles ont été mis en évidence dans l'industrie dès 1862 par Clément Juglar, avec des périodes allant de 7 à 11 ans. Vers 1920 Joseph Kitchin mettait en évidence des

cycles courts de 3 à 5 ans, tandis qu'à l'échelle des nations Nikolai Kondratiev mettait en évidence des cycles longs de l'ordre de 45 à 60 ans.

Vers 1930, Simon Kuznets montrait l'existence de cycles de périodes intermédiaires (15 à 25 ans) liés aux inégalités de revenus. Les travaux de Kuznets ont été récemment repris et approfondis par Thomas Piketty (4), tandis que Turchin et Nefedov (5) mettaient en évidence des cycles séculaires. Ces derniers identifient quatre phases qu'ils intitulent: expansion, stagflation, crises et dépression. Nous avons repris ici leur terminologie.

Il est tentant d'identifier ces quatre phases aux quatre phases d'un cycle de Carnot. Cette même identification doit s'appliquer au cerveau, comme au cerveau global que représente une société décrit ici en termes économiques. Le tableau 1 montre dans chaque cas l'identification proposée pour les paramètres P et T et pour les phases des cycles.

Cycle de Carnot	Détente isotherme	Détente adiabatique	Compression isotherme	Compression adiabatique
Pression P	Diminue lentement	Diminue rapidement	Augmente lentement	Augmente rapidement
Température T	Constante élevée	Diminue	Constante basse	Augmente
Réseau neuronal	Activité intense	Relaxation, satiété	Sommeil profond	Sommeil paradoxal
Intensité P des connections	Diminue	Faible	Augmente	Élevée
Seuil 1/T des connections	Bas	Augmente	Élevé	Diminue
Économie	Expansion	Stagflation	Crises	Dépression
Demande P	Diminue	Faible	Augmente	Élevée
Offre T	Élevée	Diminue	Faible	Augmente

Tableau 1: Identification des différentes phases

Il apparaît que, comme tout ensemble statistique auto-organisé, l'économie oscille autour d'un point critique, selon un processus de «criticalité auto-organisée» (6). Il est à noter que ce processus n'a pas de période propre. Il

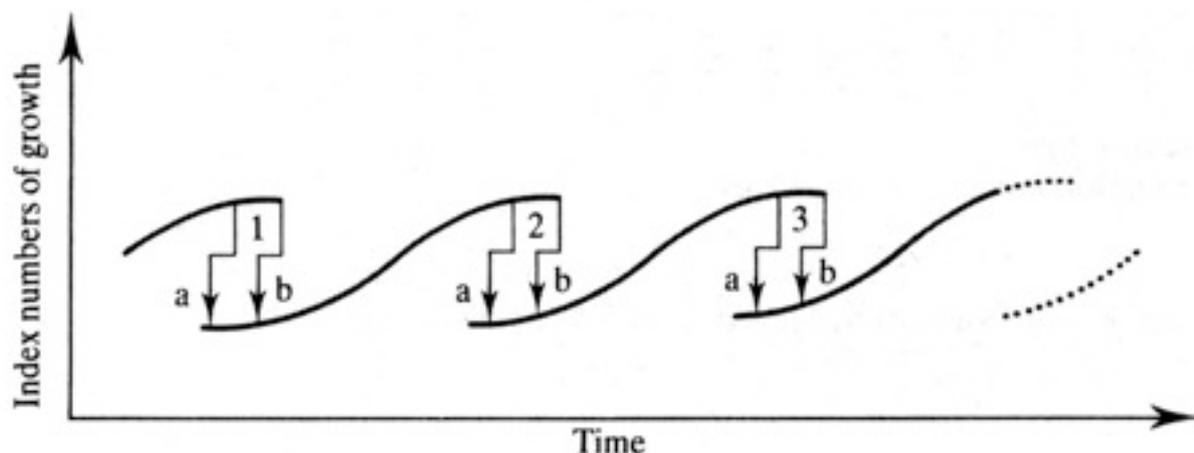
s'agit d'un processus aléatoire de dissipation de l'énergie dit en $1/f$ dont l'amplitude des oscillations est inversement proportionnelle à la fréquence, à la manière des tremblements de terre. Ces derniers correspondent à des restructurations de la croûte terrestre, comme les crises économiques correspondent à des restructurations de société.

5. Comparaison avec les modèles économiques

Les premiers économistes dits classiques tels qu'Adam Smith au 18ème siècle ont essentiellement décrit une société en phase d'expansion. Il a fallu attendre Karl Marx au 19ème siècle pour observer et décrire une société en phase de crise. On doit à John Maynard Keynes au 20ème siècle d'avoir analysé une société en phase de dépression. Aujourd'hui, les économistes s'interrogent encore sur le phénomène de stagflation.

Né en 1883, la même année que Keynes, l'économiste autrichien Joseph Schumpeter s'est voulu au dessus de la mêlée. Il considère que l'économie évolue comme une tornade et parle de «destruction créatrice». Il s'intéresse aux cycles de Kondratiev dont il attribue l'origine aux fluctuations de l'innovation. On doit à l'un de ses disciples, Gerhard Mensch une étude statistique détaillée du processus d'innovation (6). Il confirme que l'innovation technique n'est pas régulière, mais tend à être périodique.

Pour Mensch les cycles économiques ne doivent pas être représentés par une sinusoïde mais par une suite de sigmoïdes se recouvrant partiellement comme l'indique la figure 2. Ce modèle empirique de croissance économique est remarquablement consistant avec le modèle de van der Waals de la figure 1. Les flèches a et b marquent le début et la fin des zones de recouvrement à l'endroit du pli.



Source: Mensch (1979: 73).

Figure 2: Le modèle de Gerhard Mensch

Bien qu'ignorant le rôle de l'énergie et l'influence de l'environnement, Mensch parle de générations économiques successives, semblables à celles des êtres vivants. Les innovations y apparaissent comme les germes de la génération suivante. Mensch compare ce phénomène à des «métamorphoses».

On sait aujourd'hui que l'innovation technique est un processus d'évolution culturelle en tout point comparable à l'évolution génétique en biologie. Cette dernière n'est pas régulière non plus: ce sont les équilibres ponctués de Stephen Jay Gould. En 1993, Bak et Sneppen identifieront les équilibres ponctués à un processus de criticalité auto-organisée (7). Le modèle de van der Waals montre qu'il en est bien de même pour l'économie.

6. La distribution des richesses

Jusqu'ici j'ai défini, pour chaque production, un état P et T de l'économie comme étant une moyenne pondérée sur tous les consommateurs. Il est intéressant de comparer l'état de l'économie pour les gens riches et pour les gens pauvres.

Je commencerai d'abord par les gens les plus riches. Rentiers, souvent apatrides, ils ne prennent jamais les transports en commun: ils ont leur voiture avec chauffeur ou leur avion personnel. Ils habitent dans leur yacht ou dans un paradis fiscal et vivent du revenu de leurs actions en bourse: ils payent relativement peu d'impôts. Pour eux, un produit n'a guère d'autre valeur que sa valeur d'échange. Contrairement à ce que l'on pense, ils sont souvent endettés car ils adorent jouer avec l'argent. Ils empruntent sans cesse du capital à faible taux d'intérêt pour le placer en bourse à plus haut risque. Ils cachent leur stratégie et communiquent très peu avec les autres. Ils cherchent avant tout leur indépendance et vénèrent la liberté.

Leur situation est comparable à celle des molécules d'un gaz parfait. Ces dernières n'interagissent les unes avec les autres qu'au cours de brèves rencontres au cours desquelles elles échangent de l'énergie et de la quantité de mouvement. On sait que, dans un gaz parfait la distribution des vitesses suit une loi normale dite loi de Gauss. Il en est de même pour les fluctuations du marché des actions, du moins en très bonne approximation. Malgré eux, les investisseurs ne sont jamais complètement indépendants. Inconsciemment, ils s'imitent entre eux. Cette corrélation se traduit par des ailes en loi de puissance autour de la distribution de Gauss.

Considérons maintenant une économie en phase de stagflation. Ce que nous avons appelé la «température» de l'économie tend à diminuer. Le rendement des actions baisse, déclenchant des avalanches d'événements dont je donne ici quelques exemples. Trouvant les charges sociales trop

élevées, notre rentier va licencier son chauffeur et conduire lui-même sa voiture. Comme ce chauffeur, beaucoup d'autres employés vont se retrouver au chômage. Dans un premier temps, la plupart d'entre eux vont retrouver un emploi, quoique moins bien payé. La population s'appauvrit.

Quand est pauvre, la valeur d'un produit est avant tout sa valeur d'usage et quand on s'appauvrit, on partage l'usage d'un même produit. On ne peut plus se payer le luxe d'avoir une voiture particulière: le marché de l'automobile en pâtit. On prend davantage les transports en communs et, pour limiter les distances, on s'entasse dans les villes, voire les bidonvilles. La seule issue est de s'organiser afin de mettre en commun le peu qu'on a.

Ainsi les habitants d'une même commune partagent des biens communs appelés biens communaux. Il en est de même des communautés de communes, puis des départements et des régions. Il y a ce qu'on appelle invariance par changement d'échelle. Dans ce cas, la distribution des richesses n'est plus gaussienne. Elle devient, elle aussi, invariante par changement d'échelle, c'est-à-dire suit une loi de puissance. C'est bien ce qu'a observé l'économiste Vilfredo Pareto. La distribution s'appelle la loi de Pareto. C'est aussi le cas des fluctuations de densité d'un fluide au voisinage du point critique.

On sait qu'en dessous du point critique un fluide se divise en deux phases. La figure 1 montre qu'il en est de même pour l'économie. On dit que la classe moyenne s'effondre. Une partie croissante de la production devient inaccessible aux pauvres parce que trop chère. Les ventes diminuant, les actions en bourse chutent d'où davantage de licenciements, accroissant la pauvreté, ce qui fait chuter les ventes encore plus. En langage scientifique, on parle de processus autocatalytique. En langage courant, on parle d'effondrement économique.

7. Rôle de la monnaie

J'ai défini plus haut la température T d'une économie comme mesurant le rendement monétaire de sa production. On considère en général que les échanges à l'intérieur d'une même société se font tous à l'aide d'une même monnaie. Cela implique pour la société une température unique T d'autant plus grande qu'elle est en contact avec une source d'énergie à bon marché (c'est-à-dire à faible entropie).

Dans mon second article (3), j'ai montré qu'on était confronté au même problème que celui de la machine à vapeur au temps de Savary et Newcomen. Comme pour un cycle de Carnot, on ne peut pas fermer un cycle économique sans diminuer la température économique du système.

D'où certains mouvements politiques en faveur d'une décroissance économique, mais celle-ci entraîne des faillites financières.

La solution de James Watt a été de mettre en contact sa machine avec une source froide appelée condenseur. L'équivalent économique est de mettre en contact une société riche (T élevé) avec une société une pauvre (T faible). C'est ce qui s'est passé historiquement entre les pays développés et leurs colonies. Ces dernières ont joué le rôle de source froide jusqu'à ce que leur économie se développe à son tour et que celles-ci soient émancipées.

Le processus de réinvestissement d'un capital dS d'un pays riche (T élevé) vers un pays plus pauvre (T faible) est particulièrement bien décrit par l'historien Giovanni Arrighi dont je reproduis ici la figure 3.4.

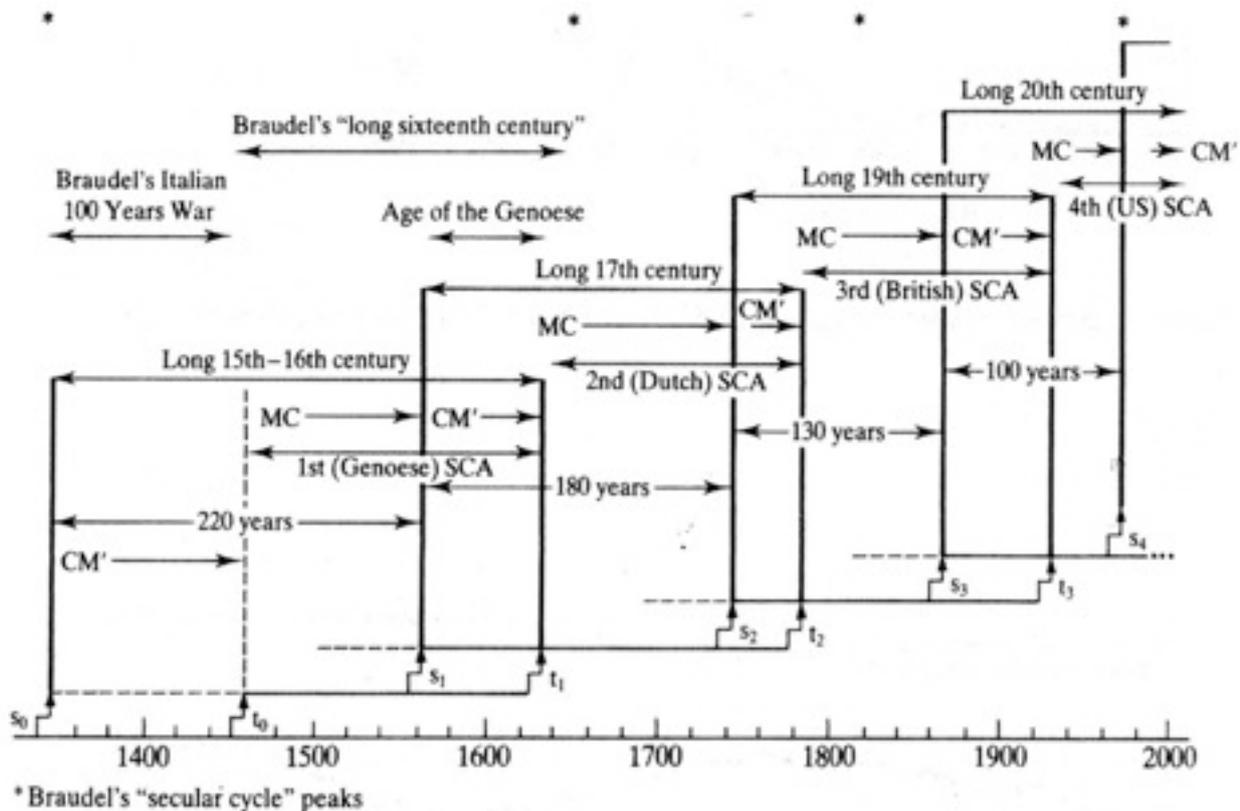


Figure 3: Les cycles historiques de Braudel (d'après Arrighi).

Les flèches dénotées ici s et t correspondent aux flèches a et b des figures précédentes. Elles marquent respectivement le début et la fin des zones de recouvrement des économies successives. On voit que, en fin de cycle, les génois ont réinvesti leurs capitaux en Hollande. Plus tard, les hollandais ont réinvesti leurs capitaux en Angleterre. Finalement, les anglais ont réinvesti leurs capitaux aux États-Unis. Dans son dernier livre (11) Arrighi montre comment les américains ont ensuite réinvesti leurs capitaux en Chine.

On sait que, aujourd'hui, l'économie mondiale repose essentiellement sur les énergies fossiles. De ce point de vue, il s'agit d'un système thermodynamique fermé. Cela implique que les températures des diverses économies vont nécessairement s'égaliser. Au fur et à mesure que nos ressources en énergie fossiles s'épuisent, ces températures vont de plus en plus diminuer. Pour maintenir l'économie mondiale, on tendra vers l'instauration d'un marché commun mondial, comme cela s'est déjà passé à l'échelle de l'Europe. Cela implique une monnaie mondiale unique. Pratiquement à égalité, le dollar et l'euro semblent déjà jouer ce rôle. Pour éviter l'inflation, il faudra un jour indexer cette monnaie unique sur les ressources d'énergies fossiles encore disponibles.

Comme nous l'avons vu, une telle situation est instable. Elle conduit à un phénomène de condensation dans lequel l'économie se décompose en deux phases: une économie pour les riches et une économie pour les pauvres. Ce qui se passe à l'intérieur d'un pays, se passe aussi à l'intérieur d'un ensemble de pays partageant la même monnaie. On le constate aujourd'hui en Europe: les différences entre les pays riches et les pays pauvres augmentent. On le voit tout particulièrement si on compare l'Allemagne et la Grèce.

La solution est encore celle de James Watt. En termes économiques cela veut dire créer deux économies différentes: une économie pour les riches et une économie pour les pauvres, chacune à des températures différentes. Comme à chaque monnaie correspond une seule température, cela implique l'utilisation d'au moins deux monnaies dans un même pays.

C'était la conclusion de mon deuxième article (3). Un certain nombre d'économistes semblent aujourd'hui l'avoir réalisé. Ils proposent de rétablir les monnaies nationales tout en gardant une monnaie européenne pour les échanges internationaux. Les taux de change relèvent alors d'une décision politique, ce qui rétablit la souveraineté nationale.

Une solution élégante serait d'indexer les monnaies nationales sur le développement des énergies renouvelables. Liées à la fois au vent et à l'ensoleillement, celles-ci semblent assez équitablement réparties d'un pays à un autre. Cela induirait une forte incitation à les développer. Lier des monnaies différentes à des sources d'énergie différentes est l'équivalent biologique d'enzymes différents pour des voies métaboliques différentes, ce que la vie fait tout naturellement. Cela nous rappelle que l'origine du déclin actuel de l'économie est d'ordre énergétique. En essayant de résoudre un problème économique, on résoudrait du même coup un problème de transition énergétique.

- (1) François Roddier, «Thermodynamique et économie. Des sciences exactes aux sciences humaines», Res-Systemica, N°12, article 03, Septembre 2014
- (2) Dimitris Stassinopoulos and Per Bak, «Democratic reinforcement: A principle for brain function», Phys. Rev. E, Vol. 51, N°5, 5033-5042, May 1995
- (3) François Roddier, «La thermodynamique des transitions économiques», Res-Systemica, N°14, article 01, Septembre 2015
- (4) Thomas Piketty, Le capital au XXIème siècle, 2013
- (5) Peter Turchin and Sergey A. Nefedov, «Secular Cycles», Princeton, 2009.
- (6) Per Bak, Chao Tang, and Kurt Wiesenfeld, «Self-organized Criticality: An explanation of 1/f Noise», Phys. Rev. Let., Vol. 59, No. 4, 381- 384, July 1987.
- (7) Gerhard Mensch, «Stalemate in Technology», Ballinger, (German 1975), (English 1979).
- (8) Per Bak, Kim Sneppen, «Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model of Evolution», Phys. Rev. Let., Vol. 71, No. 24, 4083-4086, December 1993.
- (9) Frederick Soddy, «Wealth, virtual wealth and debt», 1926.
- (10) Giovanni Arrighi, «The Long Twentieth Century», 1994, 2010.
- (11) Giovanni Arrighi, «Adam Smith in Beijing», 2007.