

De la décroissance à l'état stationnaire : l'évolution entropique des systèmes socio-économiques et de leur environnement naturel

Duplan Yves Jamont Junior

Université Montesquieu Bordeaux IV
GRES-CED-IFREDE

Adresse professionnelle :
Université Montesquieu-Bordeaux IV
Centre d'Economie du Développement
Avenue Léon Duguit
33608 Pessac

Adresse personnelle :
16 rue du Mont
25480 Pirey

Résumé : De la décroissance à l'état stationnaire : l'évolution entropique des systèmes socio-économique et de leur environnement naturel

Cet article met en évidence les controverses sur le principe d'entropie qui conditionne, dans une perspective éthique, les propositions de décroissance et de stationnarisation de la production économique. Les arguments puisés en écologie et en thermodynamique pour contester l'entropie de la matière nous semblent critiquables. En particulier, nous montrons que, dans sa conception originelle, l'entropie est constituée de deux composantes distinctes et inséparables : l'entropie matérielle et l'entropie énergétique.

Mots-clés : économie, entropie, thermodynamique, écologie, évolution.

Summary : From decrease to stationary state : the entropic evolution of socio-economic systems and their natural environment

This paper is a contribution to the controversies about the entropy law that conditions, in an ethical perspective, the propositions of decreasing and stationarizing the economic production. It seems to us that the arguments of ecological and thermodynamical order, used to contest the entropy of matter, are open to criticism. In particular, we show that, in its original conception, entropy is constituted by two distinct and unseparable components: material entropy and energetic entropy.

Keywords : economics, entropy, thermodynamics, ecology évolution.

Les pays développés n'ont cessé de promouvoir l'accroissement de la production pour contrecarrer la rareté, ce qui contribue à l'amélioration, du moins au maintien de leur niveau de vie. Les pays en développement, souvent épaulés par les institutions internationales (le Fonds Monétaire, la Banque Mondiale), adoptent la même attitude pour combattre la pauvreté de masse et sortir du sous-développement. Cependant, à partir d'un certain seuil, la production économique est porteuse de dégradation environnementale. Historiquement, on retrouve dans le sillage de la croissance économique la surexploitation des ressources naturelles et l'augmentation de la pollution. L'épuisement des ressources et la détérioration des conditions de vie sont autant de menaces que la croissance fait peser sur les sociétés.

Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, des scientifiques prennent conscience de l'importance de l'environnement naturel pour les sociétés humaines (Manou-Mani 1997). Au début des années 1970, le rapport du Club de Rome, intitulé *Halte à la croissance* (Meadows 1972) et vulgarisé sous le nom de « croissance zéro », met en évidence les limites de la croissance économique et les catastrophes qui pourraient résulter de sa poursuite. Par précaution, il appelle à l'arrêt de l'augmentation de la production et de la croissance démographique. Cela devrait, au profit des générations futures, amoindrir la pression exercée sur les réserves naturelles et les capacités de régénération des écosystèmes. Et, suivant la thèse de Hermann Daly, l'économie atteindrait un « état stationnaire » où le capital et la population demeureraient inchangés.

De manière plus radicale, Nicholas Georgescu-Roegen s'évertue à défendre l'idée de la « décroissance » de la production. Abstraction faite du circuit monétaire, il considère la dimension biophysique de l'économie. L'organisation économique lui apparaît comme un processus de transformation de la matière et de l'énergie. Les principes physiques qui régissent ces transformations s'appliquent *de facto* au processus économique. Georgescu-Roegen repose son argument sur le principe d'entropie de la thermodynamique, expliquant l'irrévocabilité des transformations physiques et l'évolution des systèmes biophysiques telle la biosphère à laquelle appartiennent les systèmes socio-économiques.

Les conceptions courantes de l'entropie ne renvoient à aucun qualificatif qui lui attribuerait des formes particulières. La proposition de Georgescu-Roegen de l'appréhender séparément, d'une part, sous l'angle des transformations matérielles, d'autre part, du point de vue des transformations énergétiques, est largement controversée. La plupart des critiques refusent cette distinction quand on ne nie pas la pertinence du concept d'entropie pour la science économique. Nous montrerons que les contestations sont souvent basées sur une compréhension erronée de l'hypothèse de Georgescu-Roegen. De plus, il nous semble que la distinction entre l'entropie matérielle et l'entropie énergétique est présente, dès l'origine, dans la conception de Clausius. Mais, à la différence de Georgescu-Roegen, l'entropie énergétique et l'entropie matérielle ne sont pas séparables.

1. Les formulations courantes du principe d'entropie

Les controverses sur l'évolution des systèmes socio-économiques et de leur environnement naturel reflètent le débat sur la compatibilité de deux approches de la thermodynamique : l'approche phénoménologique et l'approche mécaniste. La première caractérise la thermodynamique classique née des travaux de Carnot et de Clausius et la thermodynamique des processus irréversibles impulsée par Prigogine. La seconde est le fait de la thermodynamique statistique instiguée par Boltzmann et étendue à la théorie de l'information de Brillouin. Les formulations courantes du principe d'entropie diffèrent d'une approche à l'autre.

1.1. L'approche phénoménologique

D'après l'approche phénoménologique, l'évolution concerne les conversions énergétiques et les transformations de la matière. De ce point de vue sont formulées le principe de Carnot-Clausius et l'énoncé de Prigogine. L'un s'applique à des systèmes isolés proches de l'équilibre, l'autre à des systèmes clos ou ouverts évoluant hors équilibre ou en équilibre local¹.

a. Le principe de Carnot-Clausius

Dans son mémoire « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* », Carnot cherche à démontrer qu'une quantité de « puissance motrice »² due à un échange de chaleur est indépendante des systèmes utilisés pour effectuer l'échange thermique et que seules leurs températures interviennent. Dans ce cadre, il établit que « la production de la puissance motrice du feu est [...] due, dans les machines à vapeur, à son transport d'un corps chaud à un corps froid » (Carnot 1990, p.10). Sur cette base, Clausius (1991 Mémoire IV, p.138, note 1) pose l'axiome, qui lui permettra d'établir le principe d'entropie, à savoir que « *la chaleur ne peut pas passer d'elle-même d'un corps froid à un corps plus chaud* ».

Considérons un système physique qui reçoit de son environnement une quantité de chaleur infiniment petite égale à dQ ($dQ > 0$). L'échange calorifique modifie l'état du système et se traduit par des transferts de chaleur entre les parties du système. Une quantité de chaleur dH ($dH > 0$) passe d'une partie du système de température T_1 à une autre partie à la température T_2 .

Clausius fait remarquer que sans compensation énergétique, l'inégalité

$$\frac{dH}{T_2} \geq \frac{dH}{T_1} \quad (1)$$

est la seule possible. La situation inverse signifierait la possibilité que la chaleur passe d'elle-même d'un corps froid à un corps plus chaud ($T_1 < T_2$), résultat qui contredirait l'axiome de Carnot. Clausius en déduit « le principe d'équivalence des transformations » selon lequel la production de la quantité dH de chaleur à la température t au moyen du travail aura la « valeur d'équivalence » $\frac{dH}{T}$ et le passage de la quantité de chaleur dH de la température t_1 à

la température t_2 la valeur d'équivalence $dH \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$, où T est une fonction de la température, indépendante de la nature de l'opération par laquelle s'est effectuée la transformation. (Clausius 1991, Mémoire IV, p.148-149). Dans le cas d'un gaz qui ne reçoit de chaleur que du milieu extérieur et se dilate à température constante, Clausius montre que la température absolue de Kelvin T est fonction linéaire de la température empirique t : $T(K) = 273 + t(^{\circ}C)$. La valeur d'équivalence d'une variation de chaleur est d'autant plus faible que la température est élevée. C'est donc une grandeur exprimant ici la *qualité de la chaleur* : plus grande est la valeur d'équivalence, plus la chaleur est dégradée.

¹ On notera qu'un système ouvert est un système qui échange de l'énergie et de la matière. Un système clos échange de l'énergie mais pas de la matière. Un système isolé n'échange ni énergie ni matière.

² Par puissance motrice on entend énergie calorifique.

La valeur d'équivalence de la chaleur échangée par le système est égale à $\frac{dQ}{T}$. Clausius appelle « entropie », dS , la valeur d'équivalence du système, et « transformations non compensées », N , l'écart entre la variation de l'entropie et la valeur de la quantité de chaleur échangée pour des différences de température supposées négligeables :

$$N = dS - \int \frac{dQ}{T}. \quad (2)$$

Il en résulte une formulation équivalente du principe de Clausius qu'il énonce de la façon suivante : « *des transformations non compensées ne peuvent être que positives* » (Clausius 1991, Mémoire VI, p.291). La grandeur N et la variation d'entropie sont toujours positives $N \geq 0$ et $dS \geq 0$. En effet, la variation dS l'emporte sur la grandeur $-\int \frac{dQ}{T}$ lorsque que celle-ci est négative :

$$dS \geq \int \frac{dQ}{T}. \quad (3)$$

La grandeur N est, en fait, une production d'entropie non compensée. Quand elle est strictement positive, la transformation est irréversible ; quand elle tend à s'annuler, la transformation est dite réversible, ce qui se vérifie dans le cas des transformations infiniment lentes, proches de l'équilibre. L'irréversibilité est le propre des transformations physiques. La réversibilité est un cas limite « cas que l'on peut regarder comme possible en théorie, quoiqu'il soit impossible de le réaliser » (Clausius 1991, Mémoire IX, p.380). La réversibilité est irréalisable ! Certains auteurs qui reprennent les idées de Clausius mentionnent à peine cette impossibilité et posent l'égalité

$$dS = \int \frac{dQ}{T} \quad (4)$$

au point de faire passer la réversibilité pour une vulgaire possibilité.

En général, le principe d'entropie dit principe de Carnot-Clausius stipule que, lors d'une transformation physique, une partie de l'énergie est convertie spontanément en chaleur dégradée irrécupérable. L'évolution d'un système isolé est telle que sa qualité énergétique diminue sans compensation de manière irréversible, incapable de recouvrer ses états antécédents. Dans le cas d'un système isolé, hors équilibre, qui évolue spontanément, l'entropie s'accroît de façon irréversible jusqu'à son maximum : l'état ainsi atteint est l'état d'équilibre thermodynamique du système.

b. L'énoncé de Prigogine

Dans son *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Prigogine (1996) distingue deux composantes de la variation dS de l'entropie d'un système : la variation dS_e due aux échanges d'énergie et de matière avec l'extérieur et la variation dS_i , équivalente à la transformation non compensée produite par les processus physico-chimiques (échange d'énergie, réactions chimiques, réactions électrochimiques) internes du système. Il faut noter que l'entropie interne est l'équivalente de la grandeur N de Clausius. La variation globale d'entropie est :

$$dS = dS_e + dS_i \quad (5)$$

Sous l'effet de courants ou de flux résultant de forces thermodynamiques, les processus physico-chimiques produisent de l'entropie. La production d'entropie P interne du système par unité de volume, au cours d'un intervalle de temps, est égale au produit de la force

thermodynamique généralisée F (l'affinité, la chaleur) par le flux généralisé J correspondant (la vitesse, la différence des inverses des températures du système et du milieu extérieur échangeant de la chaleur)³ :

$$P = dS_i = FJ \quad (6)$$

L'écoulement du temps entraîne deux effets sur la production d'entropie : un effet-force $\frac{dP_F}{dt}$ et un effet-flux $\frac{dP_J}{dt}$. La production d'entropie par unité de temps s'écrit :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP_F}{dt} + \frac{dP_J}{dt} \text{ avec } \frac{dP_F}{dt} = J \frac{dF}{dt} \text{ et } \frac{dP_J}{dt} = F \frac{dJ}{dt} \quad (7)$$

Pour étudier un système hors équilibre, la thermodynamique des processus irréversibles suppose qu'il est en *équilibre local* (c'est souvent le cas des systèmes hydrodynamiques et chimiques). Sous cette hypothèse, Glansdorff et Prigogine (1971) établissent « le critère universel d'évolution » défini par l'inégalité $\frac{dP_F}{dt} \leq 0$: les forces thermodynamiques

diminuent de leur capacité à contrecarrer la hausse de l'entropie au fur et à mesure de l'écoulement du temps. Telle est l'explication du principe d'entropie dont l'énoncé dans la thermodynamique des processus irréversibles est d'ordre local, à savoir : « dans chaque région macroscopique du système la production d'entropie due aux processus irréversibles est positive » (Prigogine 1996, p.17). Ce qui revient à dire que l'entropie interne est toujours croissante : $dS_i > 0$. Cependant l'entropie d'échange peut varier dans les deux sens. Lorsqu'on a $dS_e > 0$, l'échange avec l'extérieur ne fait qu'aggraver la dégradation entropique du système : $dS > 0$. $dS_e = 0$ est le cas d'une neutralité entropique de l'échange ou celui de la thermodynamique classique d'un système fermé ; la production d'entropie globale est alors positive. Lorsque l'entropie d'échange décroît, $dS_e < 0$, trois cas sont envisageables (Binswanger 1993) :

- $|dS_e| = dS_i \Rightarrow dS = 0$, le système est à l'état stationnaire et son entropie reste constante dans le temps ;
- $|dS_e| < dS_i \Rightarrow dS > 0$, la variation de l'entropie du système est moins importante en étant ouvert que s'il était fermé ;
- $|dS_e| > dS_i \Rightarrow dS < 0$, l'entropie du système baisse : la diminution de l'entropie externe l'emporte sur l'accroissement inévitable de l'entropie interne.

Cette dernière situation est caractéristique des systèmes ouverts (vivants). La consolidation des forces thermodynamiques qui découle de l'utilisation de la matière-énergie de basse entropie prélevée sur le milieu extérieur leur permet d'évoluer vers des états loin de l'équilibre. En état de non-équilibre, ce sont des systèmes instables où siègent des processus dissipatifs. Ils se révèlent, en dépit et grâce à l'aléa, des « structures dissipatives », des organisations complexes marquées par un certain ordre spatio-temporel. L'accroissement de leur complexité est au prix d'une augmentation non compensée de l'entropie de l'environnement et de la dissipation de l'énergie-matière. L'entropie totale du système et de son environnement augmente.

1.2. L'approche mécaniste

³ Outre les échanges énergétiques, les transferts de matière sont pris en compte. Et le principe chimique de conservation de la masse est supposé.

L'approche mécaniste se limite à l'étude de l'évolution des systèmes (gazeux) dont les constituants se déplacent de façon aléatoire, plus précisément à la distribution des vitesses et à la position des particules. C'est dans ce contexte que sont énoncés le principe d'entropie de Boltzmann et le principe de Brillouin.

a. Le principe de Boltzmann

Dans ses *Leçons sur la théorie des gaz*, Boltzmann (1987) étudie l'évolution des systèmes gazeux sur la base du critère qu'il appelle « grandeur H ». Un gaz d'un très grand nombre de molécules est contenu dans un récipient de volume donné. Les parois du récipient sont lisses et les molécules du gaz sphériques ; elles sont supposées élastiques et peu déformables. On suppose que le récipient est divisé en un nombre fini d'éléments de volumes. Les molécules se déplacent en ligne droite en l'absence de tout mouvement et de toute « organisation d'ensemble moléculaire »⁴. Et aucune force extérieure n'agit sur le système ainsi constitué.

Chaque molécule i a une densité de probabilité p_i de se trouver dans un élément de volume. Cette densité est fonction de la vitesse de la molécule. Boltzmann montre qu'à l'état stationnaire, elle ne peut correspondre qu'à la loi de répartition des vitesses de Maxwell et que cette distribution est la plus probable au cours de l'évolution du système. Dans la littérature, cette loi est représentée par la fonction de densité de probabilité :

$$f(c) = 4\pi c^2 n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mc^2}{2kT}\right) \quad (8)$$

avec $k=1,380658 \cdot 10^{-23}$; n est le nombre total de molécules, m la masse d'une molécule, k la constante de Boltzmann-Planck, T la température du gaz.

Boltzmann définit la grandeur H pour caractériser l'état du système à un moment donné tel que :

$$H = \sum_i p_i \ln(p_i) \quad (9)$$

Il en déduit l'équivalence de la loi de répartition des vitesses de Maxwell et « le théorème H » appelé aussi « théorème du minimum » selon lequel l'espérance mathématique de la dérivée

de H par rapport au temps est négative $\frac{dH}{dt} \leq 0$: par suite des chocs des molécules du gaz, la

fonction H décroît dans le temps jusqu'à son minimum. Boltzmann attribue une double signification à la fonction H . La première est mathématique : H mesure la probabilité que dans un état du système, il y ait un certain nombre de molécules par élément de volume, sachant que chaque molécule a la même probabilité de se trouver dans un élément de volume ou dans un autre. Il démontre la relation :

$$H = -\ln W \quad (10)$$

où W est la probabilité de la disposition des molécules. La seconde est physique et correspond au fait qu'à l'équilibre « H est identique à l'entropie » de Clausius. Plus précisément, la grandeur H et l'entropie varient en raison inverse, quand l'une est maximum l'autre est minimum :

$$S = -kH = k \ln W \quad (11)$$

L'entropie revêt le caractère statistique de l'évolution de la grandeur H . Le principe d'entropie prend alors l'allure d'un « théorème de probabilité » : tout système, libre de toute

⁴ Cette hypothèse dite de « chaos moléculaire » signifie que lors de la distribution des vitesses il n'y a pas de mouvement d'ensemble perceptible dans la masse gazeuse, d'aucun gradient de température ou de densité.

influence extérieure, passe au bout d'un certain temps d'un état organisé probable à l'état inorganisé le plus probable, celui de la répartition des vitesses de Maxwell dans lequel il se maintiendra, certes avec une très forte probabilité.

b. Le principe de Brillouin

Dans la théorie des communications, l'information que délivre un message est évaluée par la rareté de l'occurrence des symboles de ce message. Sur ce, « l'information est une mesure de la liberté de choix dont on dispose lorsque l'on sélectionne un message » (Weaver 1975, p.38). Moins l'apparition du message est probable, plus faible est la liberté de le choisir et plus élevée est l'information correspondante.

Shannon (1975) considère une source d'information produisant n symboles distincts et indépendants avec une probabilité p_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Si N est la longueur d'un message ou d'une séquence de symboles, le nombre d'occurrences du symbole i est $p_i N$. La probabilité d'un message est donc :

$$p = p_1^{p_1 N} p_2^{p_2 N} \dots p_n^{p_n N} \text{ avec } \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (12)$$

La quantité H d'information est « le logarithme de l'inverse de la probabilité d'une longue séquence typique divisé par le nombre de symboles contenus dans la séquence » (Shannon, 1975, p.93) :

$$H = \frac{\log(1/p)}{M} = \sum_i p_i \log(p_i) \quad (13)$$

L'unité d'information est le « digit binaire » ou « bit » quand il n'y a que deux choix possibles.

Shannon ne se contente pas de l'interprétation contestée de H . Il va carrément déposer une boîte de Pandore entre la théorie des communications et la thermodynamique lorsqu'en raison de la correspondance mathématique de sa grandeur avec celle de Boltzmann, il propose d'appeler « $H = -\sum p_i \log p_i$ l'entropie de l'ensemble de probabilités p_1, \dots, p_n » (Shannon 1975, p.89). La boîte de Pandore était déjà ouverte par Szilard (1964) lorsque Brillouin (1959, p.148) admet que « l'information peut être transformée en négentropie et réciproquement » et qu'à sa suite, de Beauregard (1963, p.100) postule que « l'équivalence physique entre les grandeurs information et négentropie est manifeste ».

Si Shannon réfère à Boltzmann pour faire correspondre sa définition de l'information à l'entropie, Brillouin préfère utiliser la formulation de Plank pour exprimer l'équivalence formelle de ces deux grandeurs. Soit P_t le nombre de complexions (ou états microscopiques) possibles d'un système physique à un moment t . Définie par la formule de Plank, l'entropie du système est donnée par⁵ :

$$S_t = k \ln P_t \quad (14)$$

où k est la constante de Boltzmann. Brillouin nomme « négentropie » l'opposé de l'entropie :

$$N_t = -S_t \quad (15)$$

⁵ Les complexions sont les structures quantifiées que prend un système physique sous l'effet de variables microscopiques comme la position et la vitesse de chaque atome, les états quantiques des atomes, les structures moléculaires, etc. Or, l'entropie telle qu'elle est définie par Boltzmann est liée aux états microscopiques, alors que celle de Plank est déterminée par les complexions eux-mêmes. Étant donné que ces derniers sont définies par les variables microscopiques, l'entropie de Boltzmann et celle de Plank sont équivalentes.

L'information nécessaire pour réduire les possibilités de complexions de P_0 à P_1 est définie par :

$$I_1 = k \ln \frac{P_0}{P_1} \quad (16)$$

sachant que l'information disposée à la date 0 est nulle. Les équations (14), (15) et (16) impliquent :

$$I_1 = S_0 - S_1 = N_1 - N_0 \quad (17)$$

Brillouin en déduit ce qu'il appelle « le principe de néguentropie de l'information » : information (physique) = décroissance de l'entropie = croissance de la néguentropie. Et conclut à « la généralisation du principe de Carnot », à savoir que, si le système est isolé, à la suite de la baisse de l'entropie, on a pour toute évolution ultérieure :

$$dS_1 = d(S_0 - I_1) \geq 0 \quad (18)$$

Toute information supplémentaire équivaut à une baisse de l'entropie, mais l'information acquise génère une hausse globale d'entropie non compensée. Obtenue par observation, l'information devient, selon Brillouin, pouvoir d'action et capacité d'organisation, ou, d'après de Beauregard, de la néguentropie potentielle.

L'information shannonienne, originellement élaborée pour évaluer la transmission d'un message, est carrément une mesure physique dans la conception de Brillouin. Et on est passé d'une théorie de la communication en termes de transmission de message à une théorie thermodynamique de l'information en termes de l'observabilité des caractéristique physiques des systèmes considérés.

2. L'évolution entropique des systèmes socio-économiques et de leur environnement naturel : critiques et contre-critiques

Les tenants et les critiques de la décroissance et de l'état stationnaire empruntent leurs arguments à ces deux approches de la thermodynamique. En se basant sur la thermodynamique classique, Georgescu-Roegen considère que l'entropie de Clausius exprime la dégradation énergétique. Il propose de concevoir, de façon indépendante, une entropie d'ordre matériel. Les controverses autour de cette conception et sur l'évolution physique des systèmes socio-économiques et de leur environnement naturel laissent apparaître deux visions des organisations socio-économiques. La vision roegenienne de l'unidirectionnalité des processus socio-économiques et la vision écologique de leur semi-circularité.

2.1. L'unidirectionnalité du processus économique

L'hypothèse de dégradation irrévocable de la matière de Georgescu-Roegen soumet le système Terre, dans sa globalité, à une diminution irréversible de sa qualité matérielle. L'état stationnaire ne peut être que local et temporaire.

a. L'hypothèse de Georgescu-Roegen

Georgescu-Roegen insiste sur le fait que la dissipation ou la dégradation physique ne concerne pas seulement l'énergie, elle est aussi de l'ordre de la matière. Il ne donne pas une définition explicite de la dégradation de la matière. Cependant, les éléments que nous avons

recueillis à la lecture de son œuvre nous laissent penser qu'il identifie la dégradation matérielle au mélange des constituants de base – particules élémentaires, atomes ou molécules – des matières de types différents ou à la dislocation des constituants d'une même matière. Les « imperfections » omniprésentes du monde matériel sont les causes de la dégradation de la matière lors des transformations physiques. Aucun procédé industriel ne peut les éliminer dans leur totalité. « Dans la réalité, il n'y a pas de solides indéformables, il n'y a pas de matériaux qui soient ou parfaits conducteurs ou parfaits isolants, il n'y a pas de membranes vraiment semi-perméables. Il n'y a pas non plus de membranes qui ne s'obstruent avec le temps [...] Le système matériel est continuellement sujet au frottement (qui inclut toute érosion), écaillage, craquement, fendage, combustion spontanée, etc. » (Georgescu-Roegen 1978, p.362). Ces phénomènes ont pour conséquence l'éparpillement des atomes ou molécules du système matériel.

Ainsi l'utilisation d'une voiture entraîne-t-elle l'usure irrémédiable des pneus, des métaux et de ses constituants matériels, en général. « Les molécules de cuivre dispersées aux quatre vents par l'usage d'une pièce de monnaie ou d'un toit sont aussi " perdues " à jamais pour nous » (Georgescu-Roegen 1978, p.362). « Un morceau de charbon brûlé par nos arrière-grands-pères est perdu aujourd'hui pour toujours, de même que la part d'argent ou de fer, par exemple, qu'ils ont extraite. En revanche, les générations à venir pourront encore disposer de leur part inaliénable d'énergie solaire [...]. Aussi bien pourront-elles utiliser chaque année, au moins, une quantité de bois correspondant à la croissance végétale annuelle. Pour l'argent et le fer dissipés par les générations antérieures, il n'est point semblable compensation. [...] Toute Cadillac ou toute Zim – et bien sûr tout instrument de guerre – signifie moins de socs de charrue pour de futures générations et, implicitement, moins d'êtres humains aussi » (Georgescu-Roegen 1995, p.116). Jamais deux fois on ne roule la même voiture, n'échange la même pièce de monnaie, ne se rase avec le même rasoir. La matière se dissipe systématiquement avec l'usage. C'est dans ce sens que Georgescu-Roegen (1995, p.85) considère que « la Loi de l'Entropie est la racine de la rareté économique ». Il y a lieu de distinguer « la matière utilisable », de basse entropie, dont la structure est hautement ordonnée, de « la matière non-utilisable », de haute entropie, dont les constituants sont dispersés.

Pour Georgescu-Roegen, recycler de la matière dégradée revient à rassembler l'ensemble des éléments qui la constituaient avant sa dislocation. Or, selon lui, il faudrait un temps infini et une quantité d'énergie inimaginable pour collecter la totalité des particules de la matière dissipée⁶. Autant dire qu'en pratique « le recyclage complet est impossible » (Georgescu-Roegen 1978, p. 366). Sur ce, il stipule qu'indépendamment des échanges ou des transformations énergétiques, « dans un système clos, la matière utilisable se transforme irrévocablement en matière non-utilisable » (Georgescu-Roegen 1995, p.180). Cette hypothèse analogue au principe d'entropie de l'énergie est le principe d'entropie de la matière qu'il appelle « la quatrième loi de la thermodynamique » dont il donne une formulation équivalente⁷, à savoir : « dans un système clos, l'entropie de la matière tend continuellement vers un maximum ». Joint au principe de la dégradation de l'énergie, ce principe constitue la « Loi de l'Entropie » qui interdit la réversibilité à la fois énergétique et matérielle des processus physiques.

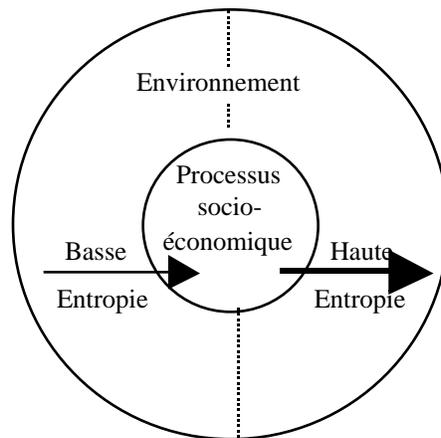
⁶ Voir aussi Daly [1992].

⁷ Les trois autres lois sont : le principe de conservation de l'énergie, le principe d'entropie de l'énergie et le principe de Nerst.

b. La décroissance globale irrévocable et la stationnarité locale temporaire

La quantité de matière reçue de l'espace sidéral étant négligeable, la Terre est à la limite un système clos, recevant continuellement un flux d'énergie solaire. Elle est donc soumise à la loi de l'entropie matérielle : la quantité de matière utilisable du système Terre se dégrade irrévocablement en matière non-utilisable. Pour contourner les limites imposées par la clôture matérielle et profiter de l'ouverture énergétique de la Terre, l'homme pourrait espérer transformer l'énergie disponible en matière utilisable. Malheureusement, cette conversion est pratiquement impossible sans recourir à un minimum de matière. Aux yeux de Georgescu-Roegen, indépendamment de l'énergie, la matière est un élément critique pour les espèces vivantes.

Figure 1. L'irrévocabilité des transformations matérielles et énergétiques



L'Environnement du système socio-économique apparaît d'une part comme une source de matière et d'énergie de basse entropie, d'autre part et en même temps, comme un puits de matière et d'énergie de haute entropie. L'impossibilité du recyclage de la matière dissipée implique que le processus socio-économique est dans son ensemble, d'un point de vue physique, unidirectionnel et linéaire (figure 1).

Certes, le flux d'énergie solaire que les plantes transforment en énergie utilisable est ininterrompu, mais il leur arrive en quantité finie. De même, la quantité de matière disponible pour l'espèce humaine est une « dot » en quantité limitée contenue au sein de la croûte terrestre. Sans intervention extérieure, sous le coup de la Loi de l'Entropie, le contenu énergétique et matériel de l'Environnement se dégrade à son rythme naturel, tout au plus se maintient à un état entropique stationnaire dans des conditions physico-chimiques inchangées. A l'échelle du système Terre, la décroissance – diminution de la quantité de matière utilisable – est un processus systématique et irréversible. La « dot entropique de l'humanité » diminue et se raréfie irrévocablement.

Soit $q(t)$ la disponibilité de la matière-énergie utilisable au temps t . Il existe un moment τ_n tel que $\lim_{t \rightarrow \tau_n} q(t) = 0$. L'intervention humaine par le processus socio-économique de transformation des matières premières, la vie en général, ne fait qu'accélérer la dissipation de la matière-énergie, l'épuisement des ressources disponibles et le comblement du puits de déchets. Autrement dit, si τ_n est le moment naturel de la dissipation totale des ressources, la

croissance économique avance l'épuisement à une date τ_e c'est-à-dire $\tau_e < \tau_n$. Dans la mesure où l'humanité dépend des ressources énergéto-matérielles utilisables de son environnement, sa durée de vie est limitée. En raison de la reconstitution incomplète de la matière utilisée, le rythme de l'accroissement de la production industrielle commande la réduction du nombre de générations à venir. Ainsi la croissance économique⁸ a-t-elle pour implication directe l'avancement de la date de la fin de l'espèce humaine. Si, auparavant, les hommes ne s'entre-tuent pas par une guerre nucléaire ou une pollution insoutenable ou si l'émigration planétaire est impossible, la fin de l'humanité devra correspondre au moment où son stock de ressources de basse entropie est épuisé (Georgescu-Roegen 1978 et 1995). Un comportement écologiquement soutenable, responsable vis-à-vis de nos contemporains et de la génération future, devrait nous obliger à refuser la croissance économique, ce qui déboucherait sur « un état de décroissance ».

Dans le sillage de Georgescu-Roegen, Daly (1992a, p.92) semble admettre la quatrième loi sans toutefois la défendre de façon explicite : « face à l'évidence du sens commun, écrit-il, je suis porté à croire que dans la pratique le recyclage complet est impossible ». La décroissance globale (à l'échelle du système Terre) et irrévocable affirmée par Georgescu-Roegen n'exclut pas un état stationnaire local (au niveau du sous-système économique) de l'Économie. Dans cet ordre d'idée, Daly (1974 et 1992b) opte pour « une économie stationnaire » (*a steady-state economy*), une économie caractérisée par un stock de richesse physique constant et une population constante. Il ne rejette pas la croissance et la décroissance économique pourvu que ce soient des phases intermédiaires vers un état stationnaire jugé soutenable : « par suite d'une évolution technique ou morale, la croissance ou la décroissance pourrait devenir possible ou souhaitable. Mais cela apparaîtrait comme une transition temporaire d'un état stationnaire à un autre, non pas comme la norme d'une économie saine » (Daly 1974, p.16). S'il est vrai que Georgescu-Roegen ne cesse de plaider en faveur de la décroissance économique, il semble qu'au bout du compte il ne refuse pas de manière catégorique l'état stationnaire de Daly. En effet, il soutient « que la grandeur souhaitable de la population est celle que pourrait nourrir une agriculture exclusivement organique » (Georgescu-Roegen 1995, p.165). La décroissance matérielle et énergétique nécessaire au ralentissement de la raréfaction des ressources minérales exige la décroissance démographique et la désindustrialisation au point où une agriculture non mécanisée suffit pour assurer les conditions biophysiques de la « joie de vivre » (Georgescu-Roegen 1971, 1978 et 1995).

2.2. La semi-circularité des processus socio-économiques

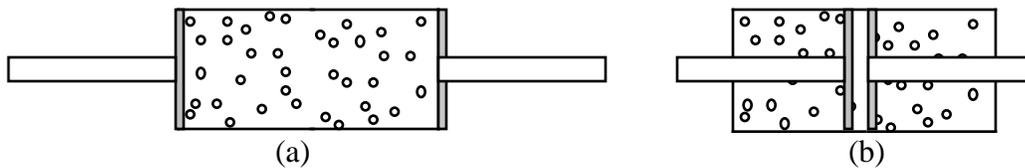
Les critiques formulées à l'encontre de l'hypothèse de l'irrévocabilité des transformations matérielles et l'acceptation de l'irréversibilité des conversions énergétiques sont le fondement de la conception semi-bouclée des processus socio-économiques. Cependant, les arguments théoriques des contestataires sont critiquables. Quand ce n'est pas une compréhension erronée du principe d'entropie traditionnel ou de l'hypothèse de Georgescu-Roegen qui fausse les débats, c'est le recours à la théorie de l'information qui paraît illégitime. En tout état de cause, l'idée que l'entropie matérielle est distinguable de l'entropie énergétique est présente chez Clausius. Elle est recelée par la notion de « disgrégation » que ce dernier conçoit, dès l'origine, comme une composante de l'entropie. L'entropie de Clausius se révèle un concept dialectique.

⁸ La croissance économique doit être prise ici dans le sens de l'augmentation de la quantité de matière et d'énergie contenue dans le système économique.

a. Les contestations de l'hypothèse de Georgescu-Roegen

Les arguments des critiques de Georgescu-Roegen et de Daly sont d'ordre physique et écologique. Ils concernent la possibilité de séparer deux gaz distincts mélangés et la réorganisation de la matière dans les cycles biogéochimiques.

Figure 2. La boîte de Van't Hoff



Considérons la boîte de Van't Hoff (figure 2), un cylindre isolé adiabatiquement contenant deux gaz 1 et 2. Il est constitué de deux pistons en opposition formés chacun d'une membrane semi-perméable. L'une est imperméable au gaz 1 et perméable au gaz 2 ; réciproquement, l'autre est perméable au gaz 1 et imperméable au gaz 2. Dans un premier temps, les pistons sont dans la position indiquée sur la figure 2a. Lorsqu'on pousse les pistons l'un vers l'autre, les deux gaz se séparent, chacun se mettant derrière la membrane qui lui est perméable (figure 2b). On montre que dans un tel système, la séparation des gaz s'accompagne de la diminution de son entropie. En vertu de l'hypothèse de Georgescu-Roegen, la séparation ne peut être complète, il existe toujours une quantité d'entropie incompressible. Pour Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati (1993), ce résultat est en contradiction avec le principe d'entropie traditionnel. Ils expliquent qu'il existerait suffisamment d'énergie externe et un contenu informationnel (dans le sens de la théorie de l'information) dû au mélange restant qui devraient permettre l'abaissement de l'entropie. D'une certaine manière, cet argument est équivalent à l'idée que l'impossibilité de rendre disponible la matière utile ou de recycler la matière dissipée est juste une question technique. D'après Young (1991), il suffirait d'avoir les « technologies appropriées » pour que le recyclage complet soit possible.

Le recours de Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati au concept d'information pour critiquer l'hypothèse de Georgescu-Roegen serait légitime si ce dernier n'était pas lui-même contesté. Mayumi, après Georgescu-Roegen, remet en cause sa validité physique, plus particulièrement son équivalence avec l'entropie.

Reprenant l'exemple de Shannon, Mayumi (1997) note que la quantité de séquences de symboles de longueur N qu'un canal peut transmettre est le nombre de combinaisons :

$$W = \frac{N!}{N_1 N_2 \dots N_n} \text{ avec } N_i = N p_i \text{ et } \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (19)$$

Le logarithme de W est une mesure de la « capacité de transmission du canal ». Mayumi montre que lorsque la longueur d'une séquence est très grande, la capacité de transmission du canal par signal est en fait la grandeur H :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\log W}{N} = H \quad (20)$$

Il conclut que le concept d'information de Shannon est une « appellation impropre » et que la capacité de transmission du canal par signal est la nomination adéquate de la grandeur H . Cette critique éloigne la possibilité de justifier *d'un point de vue physique* l'équivalence entre l'entropie et l'information de Shannon.

Dire que l'entropie et l'information sont équivalentes ou que l'acquisition d'information est égale à une baisse d'entropie, c'est admettre implicitement que l'information est une caractéristique physique au même titre que l'entropie. Comme l'activité du démon de Brillouin qui utilise une torche électrique pour voir les molécules d'un système, le processus d'acquisition d'information est l'observation. Observé ou pas, l'entropie du système est maintenue à l'état stationnaire ou varie s'il n'est pas en équilibre ou interagit en déséquilibre avec son environnement. Peut-être que l'état énergétique du système pourrait être modifié par les photons qui proviennent de la torche. Là encore, l'interaction de la torche allumée avec le système est indifférente à l'observation. Il serait tentant de rejeter cette remarque en admettant l'interprétation de l'information en termes de potentialité ou de capacité d'action. Ce faisant, on esquivait l'interprétation shannonienne de l'information qui s'applique à des transferts de message, indépendamment de toute signification. De fait, l'information telle qu'elle est conçue dans la théorie de l'information ne coïncide pas avec sa définition dans la théorie de la communication. De plus, entropie et information ne sont pas des grandeurs de même dimension. L'entropie est mesurée en Joule/Kelvin tandis que l'unité d'information, le bit, est un nombre purement mathématique.

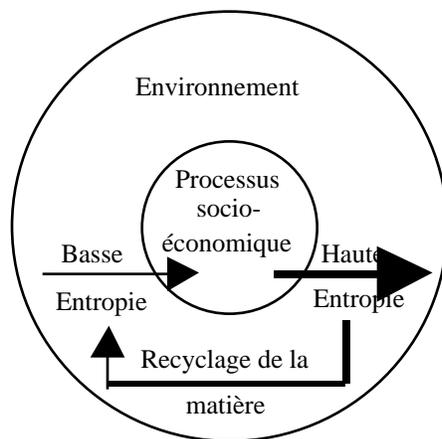
L'équivalence de l'entropie et de l'information n'a de valeur que formelle. La définition de l'information comme entropie négative est « véritablement superflue » (Mayumi 1997).

D'autre part, à l'inverse des dires de Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati, le principe d'entropie traditionnel est pertinent seulement dans le cadre d'un système fermé qui évolue de façon *spontanée*, « d'elle-même » comme le dit Clausius : l'entropie augmente sans aucune intervention externe. Ce n'est pas le cas de la séparation des gaz dans la boîte de Van't Hoff où l'entropie diminue sous l'effet d'un agent extérieur qui tire les pistons aux extrémités du cylindre.

Cette contre-argumentation, que le principe d'entropie traditionnel s'applique aux systèmes clos et aux transformations spontanées soutiendrait la thèse de Khalil (1990). Selon lui, le principe d'entropie n'est pas valable en économie, étant donné que le processus économique est intentionnel (*purposeful*). Certes, la production économique est délibérée, mais la perte irrévocable d'énergie en chaleur dégradée est incontournable. Due aux inévitables frictions des machines, elle échappe à la volonté du producteur et de leur constructeur. Dans le même ordre d'idées, l'incompressibilité de l'entropie ne tient pas à des facteurs exogènes, mais s'explique par les caractéristiques physiques du système comme l'incontournable imperfection de la perméabilité des membranes. Encore faut-il comprendre qu'à la suite de Max Plank, Georgescu-Roegen (1978 et 1995) interprète l'entropie de mélange en termes matériels, mais pas en termes énergétiques, distinction que Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati ne font pas dans leurs contestations du principe de Georgescu-Roegen. Le second principe qui concerne l'entropie énergétique n'est pas pertinent dans le cas de la boîte de Van't Hoff à moins que l'on retienne l'interprétation en termes énergétiques de l'entropie de mélange. Dans un cas comme dans l'autre, il n'y a pas lieu de parler de contradiction, du moins d'une contradiction insoutenable.

Dans une réponse à Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati, Converse (1996) fait appel à la théorie du transfert de masse pour corroborer l'hypothèse de Georgescu-Roegen. Il fait remarquer que la surface (l'interphase) de séparation entre les membranes devrait s'annuler pour qu'il n'y ait aucun mélange. Or, une surface de séparation nulle n'est concevable qu'à la limite, c'est-à-dire qu'aussi petite que l'on veut il y aura toujours une quantité de gaz mélangés et une quantité d'entropie correspondante.

Figure 3. L'irrévocabilité des transformations énergétiques et le recyclage complet de la matière



La critique la plus courante portée à l'encontre de la quatrième loi est d'ordre écologique. Ayres et Kneese (1989), Ayres (1998), Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati (1993) se réfèrent au fonctionnement des écosystèmes pour justifier la possibilité du recyclage complet. Conformément à la thermodynamique prigoginienne, les systèmes vivants, grâce à l'énergie solaire, acquièrent des forces thermodynamiques leur permettant de contrecarrer la dégradation de la matière. Ils accumulent, composent, décomposent et recomposent les éléments chimiques et de nombreuses substances organiques. Ces processus se reconnaissent dans les cycles biogéochimiques (cycles du carbone, du carbonate de calcium, de l'azote, de l'oxygène) qui concentrent des oligoéléments, des éléments minéraux, comme le phosphore, le soufre, le calcium, le manganèse, le cuivre, le cobalt, cheminant le long des chaînes trophiques. Bianciardi, Tiezzi et Ulgiati (1993, p.5) en déduisent que « le recyclage complet est physiquement possible s'il y a une quantité suffisante d'énergie disponible » et que l'hypothèse de Georgescu-Roegen est inacceptable dans le champ de la physique. Ayres (1998, p.2), sur la même lancée, martèle que « la "quatrième loi" n'a pas de statut en physique ». On retrouve ainsi la thèse de l'éco-thermo-énergétique que l'énergie disponible est le seul facteur limitant (Duplan 2004). A la différence de l'énergie, il n'y a pas de perte irrévocable de la matière dans les processus physiques. Le processus économique est un processus bouclé : la matière dégradée, de haute entropie est recyclable ou recyclée, grâce à l'énergie disponible, pour recouvrer sa qualité antérieure de basse entropie (figure 3) ; recomposés, réorganisés, purifiés en totalité par les cycles biogéochimiques, les déchets, les polluants, redeviennent des facteurs de production.

La contestation de l'hypothèse de l'irrévocabilité de la dégradation de la matière sur la base des cycles naturels serait pertinente s'il s'agissait de cycles clos. Car le principe de Georgescu-Roegen s'applique pour des systèmes clos ou isolés. Or le cycle du carbonate de calcium (CaCO_3) est relié au cycle du calcium (Ca) du carbone (C) et de l'oxygène. Les cycles biogéochimiques s'entremêlent, se supportent et interagissent les uns avec les autres par la photosynthèse, les processus de minéralisation, de dénitrification, d'oxydation, de réduction (Frontier et Pichod-Viale, 1998). L'hypothèse de Georgescu-Roegen ne peut être invalidée par l'argumentation écologique du fait que les cycles ne sont pas des cycles clos. Il faudrait remonter au niveau du système Terre et considérer les écosystèmes naturels dans leur globalité. Mais à cette échelle, la notion de cycle biogéochimique qui renvoie à un niveau d'abstraction inférieur, à un phénomène local du système terrestre, perd tout son sens.

b. La dialectique de l'entropie

Månsson (1994), Kåberger et Månsson (2001) reprochent à Georgescu-Roegen de distinguer l'entropie énergétique et l'entropie matérielle. Ils affirment que « la division est erronée. Il n'y a qu'un type d'entropie, que le système physique soit matériel ou immatériel » Kåberger et Månsson (2001, p.167). Contrairement à cette assertion, la distinction est au cœur du concept d'entropie inventé par Clausius. Il est paradoxal que Georgescu-Roegen méconnaisse l'œuvre de Clausius au point de postuler que « la fameuse proclamation de Rudolf Clausius – "l'entropie de l'univers tend continuellement vers un maximum" – ne représente qu'une vue tronquée de la réalité, étant donné qu'elle ne concerne que la dégradation de l'énergie » (Georgescu-Roegen 1995, p.173).

Dans *La théorie mécanique de la chaleur* qui rassemble ses dix-sept mémoires, Clausius (1991) considère un système (un corps) qui reçoit de son environnement une très faible quantité de chaleur égale à $dQ > 0$. L'absorption de chaleur ne modifie pas seulement le contenu calorifique H du système, elle génère aussi une quantité de travail dL . L'équivalent calorifique nécessaire pour effectuer ce travail est égale à AdL , A étant la quantité de chaleur par unité de travail. Le bilan énergétique de l'échange est donc :

$$dQ = dH + AdL . \quad (21)$$

Par la production de travail, l'échange de chaleur influe sur l'arrangement des constituants élémentaires et, par voie de conséquence, a un impact sur la structure du système. Sans aucune formulation mathématique, Clausius appelle « disgrégation » le degré Z de « cohésion », de « division » ou la « valeur de la transformation de l'arrangement des particules de base ». Cette grandeur n'exprime que la cohésion des constituants de la matière et ne concernent en rien ses propriétés. Complètement déterminée par l'état du système, elle est un indicateur de sa structure matérielle : « La disgrégation d'un corps est plus grande à l'état liquide qu'à l'état solide, et plus grande à l'état gazeux qu'à l'état liquide. Si une certaine quantité de matière se trouve en partie solide, en partie liquide, la disgrégation sera d'autant plus grande qu'une partie plus considérable de la masse sera liquide ; de même, si une partie est liquide et l'autre gazeuse, la disgrégation sera d'autant plus grande que celle-ci sera plus considérable » (Clausius 1991, Mémoire VI, p.265). Si nous nous référons à la division des états de la matière effectuée par Guinier (1980 et 1981) entre les « structures ordonnées » (solides cristallisés) et les « structures désordonnées » (liquides et gaz), *la disgrégation mesure le degré d'ordonnement de la structure matérielle du système.*

Clausius explique, par ailleurs, que l'échange de chaleur provoque un changement de disgrégation dZ , en valeur absolue, plus important que la valeur d'équivalence de la chaleur transformée en travail :

$$dZ \geq \frac{AdL}{T} \quad (22)$$

sous l'hypothèse que les différences de température sont à la limite négligeables. Tout comme la dégradation énergétique, la perte de cohésion du système est irréversible en l'absence de compensation externe. Par conséquent, dans un système isolé, la matière ne peut passer spontanément de l'état désordonné à l'état ordonné. Si nous appelons désagrégation le passage d'un état ordonné à un état désordonné ou moins ordonné, ou le passage d'un état désordonné à un état plus désordonné, la matière d'un système fermé ne peut que se désagréger, et ceci de manière irrévocable. De ce point de vue, la disgrégation exprime la qualité de l'organisation de la matière.

Clausius nomme « entropie » la valeur totale S des transformations du système. La variation d'entropie due à l'échange de chaleur est égale à la somme des valeurs de transformation du contenu calorifique et de la disgrégation totale du système :

$$dS = \int \frac{dH}{T} + \int dZ. \quad (23)$$

Comme la valeur d'équivalence, l'entropie est une fonction d'état. Il y a lieu de distinguer une entropie énergétique équivalant à la valeur des transformations énergétiques et une entropie matérielle correspondant à la disgrégation. Ce sont les deux composantes constitutives de l'entropie. Elles sont distinctes, inséparables et additives. *L'entropie est la grandeur de la qualité matérielle et énergétique d'un système physique ; l'ampleur de sa variation est la valeur du processus qui la provoque. Tout processus physique génère à la fois de l'entropie physique et de l'entropie matérielle. Plus élevée est l'entropie d'un système moins bonne est sa qualité énergétique et matérielle. L'entropie d'un système isolé tend vers un maximum.* L'entropie énergétique et l'entropie matérielle sont consubstantielles dans l'entropie de Clausius⁹. Ce sont les deux faces d'une même pièce.

L'erreur de Georgescu-Roegen est peut-être de disjoindre l'entropie énergétique de l'entropie matérielle. Cependant, leur distinction est recevable à la lumière de la conception de Clausius. Que dire alors de la thèse de l'irrévocabilité de la dégradation matérielle du système Terre ? S'il est tout à fait juste d'admettre que celui-ci s'auto-organise grâce aux énergies solaire et gravitationnelle, il convient de se demander à quel point ces énergies sont qualitativement et quantitativement suffisantes pour recycler la matière dégradée par les processus socio-économiques. Quel est le degré de dispersion des constituants élémentaires de cette matière ? Le pétrole utilisé aujourd'hui est-il systématiquement régénéré ? S'il l'est, en quelle quantité est-il reproduit ? Quelle est la durée de cette reproduction ? Ne l'est-il pas au détriment de la désagrégation d'autres formes matérielles ? Le système Terre est-il organisé de manière à revenir cycliquement à un état initial ? On ne peut réfuter la thèse de Georgescu-Roegen sans répondre à ces types de questions c'est-à-dire de savoir si du point de vue empirique les ressources se renouvellent en totalité ou en partie. L'invalidation de cette thèse ne ferait que diminuer l'acuité du problème de l'équité de la répartition intergénérationnelle des ressources. Tout de même, ce problème resterait posé au regard des rythmes et des possibilités de régénération. En attendant, la décroissance vers l'état stationnaire de la production économique mondiale, dans des conditions de reproduction justes et décentes de la vie humaine, est une mesure de précaution. Elle a la valeur d'un pari de Pascal assurant la pérennisation de l'espèce humaine et profitant des générations futures.

Références bibliographiques

Ayres R. U., 1998, « The second Law, the fourth law, recycling and limits to growth », *Working Paper Series*, n° 98/38/EPS, Centre for the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France.

Ayres R. U. et Kneese A. V., 1989, « Externalities: economic and thermodynamics », in Archibugi F. et Nijkamp P., *Economy and Ecology : Towards Sustainable Development*, Kluwer, Boston, p. 89-118.

Bianciardi C., Tiezzi E. et Ulgiati S., 1993, « On the relation between the economic process, the Carnot cycle and the entropy law », *Ecological Economics*, 8, p. 7-10.

⁹ A priori, la face matérielle de l'entropie a été principalement masquée par le dogme énergétiste que Georgescu-Roegen a combattu avec acharnement.

- Bianciardi C., Tiezzi E. et Ulgiati S., 1996, « The 'recycle of matter' debate : physical principles versus practical impossibility », *Ecological Economics*, 8, p. 195-196.
- Binswanger M. 1993, « From microscopic to macroscopic theories : entropic aspects of ecological and economic processes », *Ecological Economics*, 8, 3, p. 209-233.
- Boltzmann L., 1987, *Leçons sur la théorie des gaz*, Jacques Gabay, Les grands classiques Gauthier-Villars, Paris.
- Brillouin L., 1959, *La science et la théorie de l'information*, Masson, Paris.
- Carnot S., 1990, *Réflexions sur la puissance motrice et sur les machines propres à développer cette puissance*, Jacques Gabay, Paris.
- Clausius R., 1991, *Théorie mécanique de la chaleur*, Jacques Gabay, blong, Paris.
- Converse A. O., 1996, « On complete recycling », *Ecological Economics*, 19, p. 193-194.
- Daly H. E., 1974,, « The economics of the steady state », *American Economic Review*, 22, p. 15-21.
- Daly H. E., 1992a, *Steady-state economics* (2^e ed.), Earthscan, London.
- Daly H. E., 1992b, « Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity ? – Yes, of course it is », *Journal of Environmental Economics and Management*, 23, 1, p. 91-95.
- De Beauregard O. C., 1963, *Le second principe de la science du temps : entropie, information, irréversibilité*, Seuil, Paris.
- Duplan Y. J. J., 2004, *La soutenabilité complexe : les dimensions socio-économique, écologique et épistémologique. La question de la déforestation en Haïti*, Thèse de doctorat, Université Montesquieu-Bordeaux IV.
- Frontier S. et Pichod-Viale D., 1998, *Écosystèmes : structure, fonctionnement et évolution* (2^e éd.), Dunod, Paris.
- Georgescu-Roegen N., 1971, *The entropy law and the economic process*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Guinier A., 1980, *La structure de la matière : du ciel bleu à la matière plastique*, Hachette.
- Guinier A., 1981, « Les états de la matière : l'ordre et le désordre », in Collongues R. et al., *La matière aujourd'hui*, Seuil.
- Georgescu-Roegen N., 1978, « De la science économique à la bioéconomie », *Revue d'économie politique*, 88, 3 mai-juin.
- Georgescu-Roegen N., 1995, *La décroissance : Entropie, Écologie, Economie*, Sang de la terre, Paris.
- Kåberger T. Månsson B., 2001, « Entropy and economic processes – physics perspectives », *Ecological Economics*, 36, p. 165-179.
- Khalil E. L., 1990, « Entropy law and exhaustion of natural ressources : is Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm defensible ? », *Ecological Economics*, 2, p. 163-178.
- Khalil E. L., 1991, « Entropy law and Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm : a reply ? », *Ecological Economics*, 3, p. 161-163.
- Kümmel R., 1994, « Recycling of matter : energy, entropy – economy, ecology », *Ecological Economics*, 9, 3, p. 194-196.
- Lozada G. A., 1991, « A defense of Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm », *Ecological Economics*, 3, p. 157-160.
- Lozada G. A., 1995, « Georgescu-Roegen's defense of classical thermodynamics revisited », *Ecological Economics*, 14, p. 31-44.
- Mamou-Mani A., « Aspects quantitatifs du développement durable », in Centre de Munich, *Rapport sur les statistiques pour la politique environnementale*, K-50, 1997, p. 9-20.
- Månsson B., 1994, « Recycling of matter - a response », *Ecological Economics*, 9, 3, p. 191-192.
- Mayumi K., 1997, « Information, pseudo measures and entropy : an elaboration on Nicholas

- Georgescu-Roegen's critique », *Ecological Economics*, 22, 3, p. 249-259.
- Meadows D. L., 1972, *Halte à la croissance*, Fayard, Paris.
- Prigogine I., 1996, *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Jacques Gabay, Blong, Paris.
- Prigogine I. et Kondepudi D., 1999, *Thermodynamique : des moteurs thermiques aux structures dissipatives*, Odile Jacob, Paris.
- Shannon C., 1975, « La théorie mathématique de la communication », in Weaver W. et Shannon C., *Théorie mathématique de la communication*, Retz, Paris, p. 63-188.
- Szilard L., 1964, « On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings », *Behaviour Science*, 9, p. 301-310.
- Tribus M., 1961, *Thermostatistics and Thermodynamics*, Van Nostrand, New York.
- Weaver W., 1975, « Contributions récentes à la théorie de l'information », in Weaver W. et Shannon C., *Théorie mathématique de la communication*, Retz, Paris, p. 30-62.
- Young J. T., 1991, « Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity ? », *Journal of Environmental Economics and Management*, 21, p. 169-179.