



## **Fondements et enjeux bioéconomiques de la durabilité : un éclairage à partir des travaux de Nicholas Georgescu- Roegen**

Sylvie FERRARI

*Université Montesquieu-Bordeaux IV, GREThA - UMR CNRS 5113*

### *Abstract*

The aim of the paper is to discuss some major issues of Georgescu-Roegen's work for Economic science with a special emphasis on the connection between the economic process and the entropy law. The flow-found approach is presented and some possible implementations are proposed to measure the sustainability of the economic process.

### *Résumé*

L'objectif de ce travail est d'analyser les dimensions spatiales et temporelles du développement durable en s'appuyant sur les travaux de N. Georgescu-Roegen. En particulier, la place du temps et le rôle de la durée dans l'analyse des phénomènes économiques sont ici étudiés à partir des implications de la loi d'entropie. L'approche fond-flux est présentée et discutée notamment dans la perspective de formuler une mesure de la durabilité du processus économique.

L'œuvre de Georgescu-Roegen est très dense et les apports féconds pour la science économique sont nombreux. Seuls sont pris en compte ici les développements appartenant à une période de la vie de l'auteur où des interrogations épistémologiques le conduisent vers l'élaboration d'un nouveau paradigme. Dès la fin des années 60, se construit peu à peu la bioéconomie dont les fondations résident dans l'introduction de la loi d'entropie dans l'économie. De nombreux écrits rendent compte des fondations biophysiques de l'économie (1971, 1976, 1978). Dans une première partie, les implications de la loi d'entropie seront présentées. L'intérêt de la loi pour la compréhension du processus économique sera abordé dans une deuxième partie. L'approche fond-flux de Georgescu-Roegen permet d'éclairer l'acte de production en fournissant une grille d'analyse originale du processus économique. Enfin, dans une dernière partie, l'analyse entropique de Georgescu-Roegen est développée afin de proposer une mesure de la soutenabilité du processus économique.

## I. Georgescu-Roegen et la loi d'entropie

La loi d'entropie est une loi générale d'évolution en physique et constitue une véritable révolution dans cette discipline. En effet, elle traduit une rupture radicale avec la reconnaissance de changements qualitatifs dans l'univers et l'introduction de l'irréversibilité. « *The material universe ( ... ) continuously undergoes a qualitative change, actually a qualitative degradation of energy* » (1971, p.129). La loi d'entropie signifie que, dans un système isolé<sup>1</sup>, l'énergie évolue d'un état ordonné vers un état de désordre. Autrement dit, deux états qualitatifs distincts doivent être distingués : l'énergie libre ou disponible d'une part, et l'énergie dissipée ou liée d'autre part. L'énergie libre est l'énergie susceptible d'être transformée en travail mécanique. Cependant, elle ne peut être totalement transformée en travail : une partie sera irréversiblement dissipée. L'entropie apparaît alors comme une mesure ordinale de l'énergie dissipée dans un système isolé.

### A. Une loi d'évolution « à sens unique »

En introduisant la loi d'entropie dans le champ de l'économie, Georgescu-Roegen considère de manière explicite l'irréversibilité. Chez lui, la loi d'entropie est à la fois une loi d'évolution et une loi temporelle. C'est une loi d'évolution où l'attribut ordinal du système est l'entropie: l'évolution de l'entropie dans le temps permet de caractériser le système considéré. « *An evolutionary law is a proposition that describes an ordinal attribute E of a given system (or entity) and also states that if  $E_1 < E_2$  then the observation of  $E_2$  is later in Time than  $E_1$ , and conversely. That is, the attribute E is an evolutionary index of the system in point* » (1971, p.128). Et d'ajouter : « *Still more important is the fact that an ordinal measure of any such E can tell even an "objective" mind (...) the direction in which Time flows. Or to use the eloquent term introduced by Eddington, we can say that E constitutes a "time's arrow"* ».

C'est aussi une loi temporelle: elle est fonction du temps historique noté  $T^2$ , c'est à dire du temps qui contient la conscience de l'humanité; T est une succession continue de moments. Cela signifie que la loi d'entropie n'a de sens que si l'écoulement du temps est considéré dans la conscience de l'observateur. L'entropie de l'univers augmente parce que nous en avons conscience. « *Let  $E(T_1)$  and  $E(T_2)$  be the entropies of the universe at two different moments in time,  $T_1$  and  $T_2$  respectively; if  $E(T_1) < E(T_2)$  then  $T_2$  is later than  $T_1$  -and conversely. ( ... ) The full meaning of the law is that the entropy of the universe increases as Time flows through the observer's consciousness. Time derives from the stream of consciousness, not from the change in entropy* » (1971, p.133).

Ainsi, il apparaît une rupture totale avec les représentations traditionnelles s'appuyant sur le paradigme de la mécanique classique (Newton). Ce dernier se fonde sur deux piliers : l'absence de changement qualitatif et la réversibilité du temps. Dès lors, réversibilité et conservation coïncident. Cependant, le paradigme de Newton ne peut pas rendre compte du phénomène de la dissipation de la chaleur, phénomène irréversible par excellence

---

<sup>1</sup> Un système isolé en physique est un système qui n'échange ni matière ni énergie avec son environnement.

<sup>2</sup> N. Georgescu-Roegen distingue "T", variable ordinale, de "t" qui représente la mesure d'un intervalle de temps ( $T, T''$ ) à partir d'une horloge mécanique (variable cardinale). Cette distinction repose sur la rupture en physique entre le paradigme de la physique classique (réversibilité des trajectoires exprimées par des équations dynamiques invariantes par rapport à T ; elles ne dépendent que de "t") et celui de la thermodynamique (irréversibilité exprimée par des lois qui sont fonctions de T). On peut noter que cette distinction est également présente chez Schumpeter (1935) à travers les concepts de "temps dynamique" et de "temps historique".

## B. Le processus économique : un processus entropique.

Généralement, le processus économique est représenté par un mouvement circulaire entre la production et la consommation. Les agents, guidés par des préoccupations hédonistes, satisfont mutuellement leurs besoins grâce au libre fonctionnement du marché. Celui-ci fonctionne au gré des mouvements réversibles de l'offre et de la demande. Le processus économique est statique et se reproduit à l'identique.

Cette approche, relevant du paradigme de la mécanique classique, est reconsidérée par Georgescu-Roegen à la lumière des enseignements de la thermodynamique. Ainsi, l'enracinement matériel, physique, du processus économique dans l'environnement traduit l'existence d'une relation dialectique entre le processus économique et la nature, relation exprimée par la loi d'entropie. « *It is because of the entropy law that between the economic process and the environment there is a dialectical nexus. The economic process irrevocably changes the environment and is changed, in turn, by that very change also irrevocably* » (1977a, p.16). Le processus économique est unidirectionnel et non circulaire.

Du point de vue économique, il existe une différence entre les éléments qui entrent dans le processus économique et ceux qui en sortent : des éléments de valeur -ressources naturelles - entrent dans le processus économique tandis que des éléments sans valeur -les déchets - en sortent. “*From the viewpoint of thermodynamics, matter-energy enters the economic process in a state of low entropy and comes out of it in a state of high entropy*” (1976, p.54). Dans ces conditions, du point de vue physique, le processus économique est entropique : la matière et l'énergie y sont irrévocablement dissipées. Le processus ne crée ni ne détruit de la matière ou de l'énergie. L'entropie est une mesure de la différence qualitative qui existe entre des ressources utiles et des déchets inutiles. Le flux entropique est irréversible et inhérent à tout processus économique. Cependant, la raison d'être du processus économique n'est pas la production d'un flux de déchets mais celle d'un flux immatériel : "la joie de vivre". Considérer le processus économique dans son ensemble se traduit donc par un point majeur : l'existence de ce flux immatériel est liée au prélèvement de la basse entropie dans l'environnement par le processus.

La loi d'entropie oriente donc le processus économique. Tout prélèvement de basse entropie dans l'environnement par le processus économique implique un accroissement de l'entropie de l'environnement. Considérons par exemple le cuivre et le minerai dont il est extrait : l'entropie du cuivre est plus basse que celle du minerai. Mais, cette diminution de l'entropie du métal est obtenue au prix d'un accroissement de l'entropie de l'environnement qui contient le minerai. De plus, la loi d'entropie permet de distinguer l'énergie disponible de l'énergie accessible afin de rendre compte de l'efficacité technique de la technologie. Toute l'énergie disponible ne peut pas être utilisée par l'homme. Seule une fraction de celle-ci est accessible. L'accessibilité peut être mesurée à l'aide du rendement thermodynamique de Carnot<sup>3</sup>, lequel est d'ailleurs toujours strictement inférieur à un. L'efficacité du progrès technique est donc limitée par la loi d'entropie.

C'est la distinction économique entre les éléments dotés d'une valeur et ceux qui en sont dépourvus qui a suggéré la distinction thermodynamique de basse et haute entropie. Aussi, Georgescu-Roegen écrit : "*Thermodynamics is at bottom a physics of economic value and the entropy law is the most economic in nature of all natural laws*" (1976, p.8).

---

<sup>3</sup> Le rendement de Carnot s'écrit :  $R = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$  avec  $T_1$ , température de la source chaude et  $T_0$  température de la source froide.

De la même manière, le processus économique ne peut perdurer sans puiser dans l'environnement des objets ordonnés -de basse entropie- et dotés d'une valeur économique non nulle, et, simultanément, rejeter des éléments sans valeur et inorganisés. Cette interdépendance conduit à une relation particulière entre la valeur économique et l'entropie : la basse entropie est une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'un objet ait une valeur économique. *"An object can have a price only if it has economic value, and it can have economic value only if its entropy is low. But the converse is not true"* (1976, p.60).

Dans ces conditions, deux implications essentielles pour l'économie doivent être retenues :

1/ *"The first lesson is that man's economic struggle centers on environmental low entropy"* (1971, p.56). Comme toutes les espèces biologiques, l'homme a toujours utilisé ses organes biologiques afin de puiser la basse entropie de l'environnement. De tels organes propres à chaque espèce vivante sont, selon la terminologie d'Alfred Lotka, les instruments endosomatiques. Mais, progressivement, l'homme a fait appel à d'autres instruments qualifiés d'exosomatiques : outils, équipements techniques. Ainsi, le processus économique apparaît comme une extension de l'évolution endosomatique, comme la continuation de l'évolution biologique. Ce point est fondamental car il est à l'origine de l'approche bioéconomique du processus économique<sup>4</sup>. *"The term is intended to make us bear in mind continuously the biological origin of the economic process and thus spotlights the problem of mankind's existence with a limited store of accessible resources, unevenly located and unequally appropriated"* (1977b, p.361).

L'évolution exosomatique de l'humanité s'accompagne de la production croissante de technologies à partir de quantités d'énergie et de matière puisées dans les entrailles de la terre. Or, les quantités d'énergie accessible et de matière accessible sont nécessairement finies en vertu des principes de la thermodynamique. Dans ces conditions, les activités industrielles participent à la raréfaction absolue des dotations terrestres de basse entropie.

2/ *"Second, environmental low entropy is scarce in a different sense than Ricardian land"* (1971, p.56). Certes, à la fois la terre "ricardienne" et les réserves de charbon existent en quantités limitées. Mais il existe une différence entre les deux : le charbon extrait ne peut être utilisé qu'une seule fois. L'idée essentielle ici est donc que la quantité de basse entropie disponible dans l'environnement ne peut être utilisée qu'une seule fois par l'homme. Du fait de la loi d'entropie, tout outil va nécessairement s'user et devoir être remplacé, ce qui s'accompagne d'une augmentation du prélèvement de basse entropie dans l'environnement.

### **C. Généralisation de la loi d'entropie ou la "quatrième loi"**

N. Georgescu-Roegen n'a pas seulement introduit la loi d'entropie dans l'économie. Il a aussi procédé à une généralisation de cette loi en démontrant qu'elle s'appliquait aussi à la matière. Ce point est fondamental pour comprendre la portée de la bioéconomie chez cet auteur (1978, 1982, 1986). La célèbre équivalence d'Einstein  $E = mc^2$  renforce deux idées fausses : (1) la matière est une forme d'énergie et, (2), la conversion de l'énergie en matière<sup>5</sup> est possible. L'énergie et la matière ne peuvent pas être ramenées à un dénominateur commun. L'une et l'autre ne sont pas interchangeables et il y a complémentarité entre les deux.

*"The rub is that unlike mass and energy, matter is a highly heterogeneous category. Every chemical element has at least one property that characterizes it completely and hence renders it indispensable in some technical recipes. We must therefore expect that, in contrast with the*

---

<sup>4</sup> Le concept de bioéconomie apparaît pour la première fois chez Georgescu-Roegen en 1975.

<sup>5</sup> Il serait plus correct de dire "en masse".

*general theory of energy (thermodynamics), the study of transformations of matter in bulk should be hard going*" (cité in Mirowski, 1988, p.822).

L'origine de cette mystification réside dans la thermodynamique. En s'intéressant aux systèmes fermés, la thermodynamique a ignoré l'aspect matériel des systèmes : seuls les échanges d'énergie avec l'environnement sont importants. La conséquence majeure est d'avoir laissé de côté les phénomènes de dissipation par friction, phénomènes qui rendent compte de la participation de la matière<sup>6</sup> à tout processus réel. Or, "*Matter matters too*". Tout comme l'énergie se dissipe irrévocablement, la matière passe d'un état disponible à un état dissipé. L'une et l'autre ne peuvent être utilisées qu'une seule fois. Le processus économique est donc irrévocablement traversé par des flux d'énergie et des flux de matière. Georgescu-Roegen formule alors une nouvelle loi de la thermodynamique: "*In a closed system, available matter continuously and irrevocably dissipates, thus becoming unavailable*"<sup>7</sup> (1981, p.61). Cette loi implique qu'un système clos ne peut produire indéfiniment du travail mécanique à taux constant. Cela signifie que le processus économique ne peut pas se maintenir dans un état stationnaire indéfiniment, durablement. Georgescu-Roegen démontre que le stock de capital ne peut pas être maintenu constant du fait de la dissipation de la matière dans le processus économique (1976, 1979). Une implication directe de cette loi concerne le mythe du recyclage total de la matière. A l'échelle humaine, un tel recyclage de la matière supposerait un processus réversible : toutes les molécules dissipées pourraient être récupérées et assemblées de sorte que l'objet matériel retrouverait son état initial. Or, en physique, les processus réversibles s'opèrent à une vitesse très lente, ce qui permet d'éviter tout frottement. Or, un tel mouvement prend un temps presque infini. C'est pourquoi le recyclage ne peut être que partiel : il existe des molécules qui sont irréversiblement perdues, dissipées, et qui représentent la matière non disponible ou dissipée. Les implications de la loi d'entropie peuvent être transcrites au niveau du processus économique à l'aide d'une grille d'analyse particulière : l'approche fonds-flux.

## II. Processus économique et approche fonds-flux

Une approche analytique du processus économique est développée par Georgescu-Roegen dans un premier article en 1965 "*Process in farming versus process in manufacturing*". Elle est généralisée en 1969, puis en 1971, dans « *Process analysis and the neoclassical theory of production* ». Ce concept est important chez Georgescu-Roegen car il permet de rendre compte, d'une part, des changements qualitatifs qui s'opèrent dans la sphère de la production, et, d'autre part, des interdépendances qui existent entre l'environnement et la production.

### A. Représentation analytique du processus de production

La représentation analytique d'un processus quelconque suppose de séparer celui-ci de son environnement par une frontière analytique. Cette frontière est double : elle est spatiale et temporelle. La frontière spatiale isole physiquement le processus de son environnement. La frontière temporelle détermine une durée ou intervalle de temps en ponctuant le début et la fin du processus : c'est la période de production. La frontière est essentielle dans la représentation analytique de tout processus. Elle contribue à identifier le processus : "*No analytical boundary, no analytical process*" (1976, p.62).

---

<sup>6</sup> Selon l'expression de Georgescu-Roegen, il s'agit de la matière "in bulk". Il fait explicitement référence ici à l'approche macroscopique de la matière.

<sup>7</sup> Il ne faut pas confondre cette loi avec la loi d'entropie de Clausius laquelle fait référence à un système isolé.

Une fois établie la frontière, l'analyse du processus, c'est à dire ce que fait le processus et comment il le fait, conduit ainsi à l'étude des éléments qui traversent sa frontière pendant la durée du processus. Ainsi, le processus est représenté par une séquence d'opérations qui sont ordonnées dans le temps. Cette représentation permet de définir l'échelle de production à partir des deux caractéristiques suivantes : la période de production et l'organisation des opérations. L'échelle de production est déterminée par le nombre d'unités produites pendant un intervalle de temps donné. Prendre en compte l'échelle de production suppose donc d'analyser les différents éléments qui traversent la frontière analytique du processus de production. Définissant l'output comme tout élément traversant la frontière de l'intérieur vers l'extérieur du processus et l'input comme tout élément traversant la frontière de l'extérieur vers l'intérieur, la représentation analytique d'un processus quelconque est donnée par la relation :

$$\left[ I_n(t); O_k(t) \right]_0^T \quad (1)$$

avec  $0 \leq t \leq T$ , où  $T$  est la durée du processus qui, par hypothèse commence en  $t = 0$ . Les fonctions  $I_n(t)$  et  $O_k(t)$  sont définies sur l'intervalle  $[0, T]$ . Elles représentent respectivement les quantités cumulées importées et les quantités cumulées exportées d'éléments par rapport au processus. Les éléments qui traversent la frontière du processus relèvent de trois configurations particulières. On distingue des éléments qui entrent dans le processus et n'en sortent pas, des éléments qui sortent du processus dans le même état qu'ils y sont entrés, et des éléments qui sortent du processus et n'y sont jamais entrés.

Afin d'analyser ces éléments, Georgescu-Roegen propose de distinguer deux catégories distinctes et complémentaires d'éléments appelées : les flux et les fonds. Flux et fonds ne jouent pas le même rôle dans le processus et sont donc inséparables: "*No picture of a process -wether static or dynamic -is complete if it does not include both categories of elements*" (1976, p.61).

Les fonds (capital, travail et terre) sont les agents de la production ou facteurs de production selon la terminologie classique. Ils entrent et sortent du processus et, par conséquent, sont à la fois inputs et outputs. Ce sont des éléments durables parce que leur utilisation nécessite du temps, une durée<sup>8</sup>. Ils ne sont donc pas consommés (ou détruits) par le processus mais ont pour fonction de produire des services. Une quantité de services s'exprime par la relation: (quantité en unité physique) x (unité de temps). Ainsi, par exemple, dans une usine qui emploie 10 ouvriers sur une durée de 8 heures, le total des services employés est égal à (80 ) hommes-heure.

Les flux, eux, sont les autres éléments du processus. Ils sont soit des inputs soit des outputs mais jamais les deux à la fois. Ils sont transformés par les fonds "travail, capital et terre". Les inputs-flux ou "*inflows*" sont les éléments qui après être entrés dans le processus sont assimilés par le processus ; ce sont les ressources naturelles et les inputs provenant d'autres processus de production (biens intermédiaires). Les output-flux ou "*outflows*" sont les éléments libérés hors de la frontière par le processus : ce sont les produits fabriqués et les déchets. Une quantité de flux est exprimée en unités physiques de l'élément considéré (tonnes, litres ... ). Les flux témoignent ainsi d'une destruction et d'une création d'éléments qui participent au processus de production et traduisent l'existence de changements qualitatifs au

---

<sup>8</sup> Les fonds ne sont pas des stocks dans le sens courant du terme. Un stock diminue ou augmente de manière instantanée en fonction des ajouts et des prélèvements effectués. Les fonds sont considérés comme des éléments constants dans le processus tant que point de vue de la qualité que de la quantité. Georgescu-Roegen suppose que l'efficacité des fonds est invariante pendant la durée du processus.

sein de ce dernier. Compte tenu de la distinction fonds/flux, l'expression du processus de production s'écrit à présent à l'aide de la relation suivante :

$$\left[ Q(t); R(t); I(t); M(t); W(t); L(t); K(t); H(t) \right]_0^T \quad (2)$$

avec, pour les fonds,  $L$  : la terre;  $K$  : le capital;  $H$ : les hommes et, pour les flux,  $Q$ : la quantité de produit;  $R$ : ressources naturelles;  $I$ : inputs intermédiaires;  $M$  : maintenance du capital;  $W$  : les déchets.

La relation (2) décrit le processus de production à partir d'un vecteur de fonctions combinant fonds et flux sur une durée ou période de production  $T$ . Elle implique une utilisation particulière des inputs-flux et des services procurés par les fonds dans le temps. Georgescu-Roegen applique cette représentation du processus à un processus particulier: le processus élémentaire. Comme toute production peut être réalisée par plusieurs processus élémentaires distincts et différents, tout processus de production peut être décomposé en plusieurs processus partiels ou élémentaires.

Georgescu-Roegen définit le processus élémentaire comme *"the process defined by a boundary such that only one unit or only one normal batch is produced"* (1984, p.25). Le processus élémentaire est une séquence d'inputs-flux, pour un niveau de fonds donné, qui sont nécessaires pour obtenir une unité de produit à la fin de la période. Les processus de production se différencient entre eux par la manière dont les processus élémentaires sont organisés durant la période de production. Ici, sont considérés les processus élémentaires organisés en ligne et répartis de manière uniforme dans le temps afin de permettre une utilisation en continu des fonds dans le processus de production (processus d'usine).

Pour un processus élémentaire donné, la fonction de production s'écrit :

$$[Q(t)]_0^T = \varepsilon [R(t), I(t), M(t), W(t); L(t), K(t), H(t)]_0^T$$

Cette fonction (fonctionnelle), qui relie des qualités de fonds et de flux, caractérise un processus de production particulier et unique.

## B. Etude d'un processus de production à l'état stationnaire

A présent, considérons un processus de production qui se reproduit à l'identique (processus stationnaire). Tous les facteurs sont donc utilisés à un taux constant dans le temps. Ces différents taux sont présentés dans la colonne A du tableau (1) et sont exprimés par unité de temps. Ils traduisent donc des vitesses de circulation des flux dans le processus de production. Pour l'output "produit", le taux indique le nombre d'unités produites pendant un intervalle de temps  $t$  (journée de travail par exemple). Le processus de production est reproductible. Un processus reproductible est défini comme suit: *"In a reproductible process, the fund elements are the immutable agents that transform some input flows into output flows"* (1976, p.61).

Dans ces conditions, les fonds apparaissent comme des "stocks" particuliers dont les quantités et les qualités sont maintenues constantes. A l'état stationnaire, les fonds sont maintenus intacts par le processus de sorte qu'à la fin de la période de production, le processus peut recommencer à l'identique, à supposer que les flux d'inputs soient disponibles aux mêmes taux.

TABLEAU 1 -Fonds et flux dans le processus de production

| Facteurs | A | B |
|----------|---|---|
|----------|---|---|

|                              |     |              |
|------------------------------|-----|--------------|
| <i>Flux</i>                  |     |              |
| Provenant de la nature       | - r | -R(t) = -r.t |
| Provenant d'autres processus | -i  | -I(t) = -i.t |
| Produits                     | +q  | +Q(t) = q.t  |
| Déchets                      | +w  | +W(t) = w.t  |
| <i>Fonds</i>                 |     |              |
| Travail                      | H   | H(t) = H.t   |
| Capital                      | K   | K(t) = K.t   |
| Terre                        | L   | L(t) = L.t   |

Source : d'après Georgescu-Roegen (1984)

La colonne A du tableau (1) fournit une description de ce que le processus de production peut faire. Les vitesses d'écoulement des flux (ou "rate of flow") entrants dans le processus ainsi que des flux sortants sont indiquées et définies par le ratio : quantité en unité physique/unité de temps ou durée. Les fonds sont exprimés par leur taille en unités physiques. Cette colonne indique ce que peut faire le processus si les fonds sont disponibles et si les flux entrent dans le processus aux taux appropriés. On peut remarquer que les variables H, K et L mesurent des taux de service procurés par les fonds et ne dépendent pas du facteur temps. En effet, un taux de service est défini par le ratio:

$$\frac{(\text{quantité en unités physiques}) \cdot (\text{unités de temps})}{(\text{unités de temps})} \quad (3)$$

Le processus de production est décrit par la relation suivante :

$$q = \varphi(r, i, w; H, K, L) \quad (4)$$

La relation (4) indique une possibilité de production. En effet, elle indique les quantités de fonds nécessaires pour mettre en œuvre un processus de production particulier. Cependant, un ensemble d'inputs-flux est nécessaire pour produire l'output « produit ». La nature de ces flux détermine aussi le taux du flux de déchets. Tout processus de production nécessite une combinaison particulière de flux et de fonds dont les dimensions sont d'ailleurs distinctes : les flux sont des vitesses alors que les fonds sont des quantités physiques. Les fonds et les flux ne peuvent donc pas être substitués entre eux.

Dans la colonne B, l'activité du processus sur l'intervalle de temps t est décrite. Les flux sont exprimés par des quantités en unités physiques tandis que les fonds sont exprimés par des quantités de services. Une quantité de services est exprimée par : (quantité en unité physique)x(unité de temps). Le temps intervient ici comme un facteur dans la fonction de production. Le processus de production est alors décrit par la relation suivante:

$$Q = \Theta(R, I, W; H, K, L; t) \quad (5)$$

C'est cette relation fonctionnelle (5) qui permet de décrire correctement le processus de production à l'état stationnaire. Ainsi, à l'état stationnaire, la relation (4) devient (5). La représentation analytique d'un processus sur un intervalle de temps t fait intervenir le temps comme une variable explicite dans la fonction de production. La fonction  $\Theta$  est, par hypothèse, une fonction homogène de degré un par rapport à toutes les variables, y compris la variable t. L'homogénéité de la fonction  $\Theta$  traduit le fait que, par exemple, les flux et les services émanant des fonds sur un intervalle de temps t = 7 heures sont 7 fois plus grands que s'ils s'écoulaient sur un intervalle de temps t = 1. Dans ces conditions, le niveau de l'output Q

est multiplié par 7. Il s'agit là d'une traduction des lois de conservation de l'énergie et de la matière au niveau macroscopique. La relation (5) est vérifiée quelque soit t.

D'après les relations (4) et (5), il vient l'identité:

$$\Theta \equiv t \cdot \varphi \quad (6)$$

Si on pose  $t = 1$ , alors les deux fonctions sont identiques :  $q$  et  $Q$  deviennent équivalents. Dans ce cas, il vient:

$$\varphi(r, iw; H, K, L) = \Theta(R, I, W; H, K, L; 1)$$

Cette relation n'est vraie que pour  $t = 1$ .

Cependant, la signification de l'équivalence est trompeuse car elle implique de considérer que le processus de production est indifférent à l'échelle de production. L'hypothèse d'équivalence entre  $\varphi$  et  $\Theta$  implique que les rendements d'échelle sont constants. Or, le doublement de l'output quand les facteurs de production doublent suppose de modifier la taille de l'unité de production. Autrement dit, une autre combinaison de fonds-flux est nécessaire. Et, dans ce cas, il n'est pas sûr que les fonds varient dans la même proportion que l'output "produit".

Cela revient à considérer que les seules variables dépendantes sont les « inputs » et les « outputs » et que la variable  $t$  est *in fine* un paramètre indépendant de la fonction de production (puisque  $t = 1$ ).

Si la relation (4) indique une possibilité de production - l'échelle de la production-, la relation (5) fournit une description du fonctionnement du processus de production sur une période de temps considérée. Ainsi, ce n'est pas parce que la fonction  $\Theta$  est homogène de degré 1 que la fonction  $\varphi$  est aussi homogène de degré 1.

N. Georgescu-Roegen a ainsi proposé une analyse originale du processus de production à partir d'une nouvelle formulation de la fonction de production. Les deux apports essentiels pour l'analyse économique sont :

- L'analyse en termes de fonds-flux autorise une différenciation qualitative des éléments participant à la production. La production est appréhendée comme une transformation de flux par des fonds. La fonction décrite par la relation  $q = \varphi(r, i, w; H, K, L)$  indique ce que peut faire le processus de production à partir des fonds mis en oeuvre et des taux de flux qui leur sont associés en régime stationnaire. Cette relation est propre au processus considéré et repose sur la complémentarité des facteurs de production utilisés.

La complémentarité entre les deux éléments est fondamentale. La relation qui existe entre ces deux composantes du processus de production caractérise un processus thermodynamique. Ce sont les transformations opérées à l'intérieur du système qui fournissent une lecture entropique du processus : plus le flux de rejets est grand et plus l'entropie du processus est élevée.

- La propriété d'homogénéité de degré 1 par rapport au temps de la fonction de production en terme d'input-output évacue le temps de l'analyse et constitue un cas particulier ( $t = 1$ ). Or, la durée du processus de production est essentielle. Sans la frontière temporelle, le processus n'existe pas.

## C. Le modèle fonds-flux : Une représentation analytique des relations entre le processus économique et l'environnement

La représentation analytique du processus économique s'appuie sur la construction d'un modèle fonds-flux. Son enseignement majeur est le suivant : le processus économique n'est plus circulaire mais unidirectionnel. En effet, le processus prélève dans l'environnement les dotations de basse entropie et libère un flux de déchets de manière irréversible. Plus précisément, la production de déchets est irrévocable<sup>9</sup>. Il apparaît donc un changement qualitatif au sein du processus économique observé, changement gouverné par la loi d'entropie.

Soit un processus économique composé des six sous-processus suivants:

- $P_0$  : transforme la matière *in situ*  $MS$  en matière contrôlée  $MC$ .
- $P_1$  : transforme l'énergie *in situ*  $ES$  en énergie contrôlée  $EC$ . Les processus  $P_0$  et  $P_1$  relèvent du secteur primaire.
- $P_2$  : produit le capital de remplacement  $MK$ .
- $P_3$  : produit les biens de consommation  $C$ .
- $P_4$  : recycle les déchets ou « garbojunks » notés  $GJ^{10}$ . Seule la matière  $RM$  est recyclée.
- $P_5$  : maintient la population  $H$ . C'est l'économie domestique.

Tableau 2 : Processus économique et environnement naturel

| Eléments     | $P_0$     | $P_1$     | $P_2$     | $P_3$     | $P_4$     | $P_5$     |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Flux</i>  |           |           |           |           |           |           |
| ES           |           | $-e_1$    |           |           |           |           |
| MS           | $-M_0$    |           |           |           |           |           |
| MC           | $+x_{00}$ |           | $-x_{02}$ | $-x_{03}$ | $-x_{04}$ |           |
| EC           | $-x_{10}$ | $+x_{11}$ | $-x_{12}$ | $-x_{13}$ | $-x_{14}$ | $-x_{15}$ |
| MK           | $-x_{20}$ | $-x_{21}$ | $+x_{22}$ | $-x_{23}$ | $-x_{24}$ | $-x_{25}$ |
| C            |           |           |           | $+x_{33}$ |           | $-x_{35}$ |
| RM           |           |           | $-x_{42}$ | $-x_{43}$ | $+x_{44}$ |           |
| GJ           | $+w_0$    | $+w_1$    | $+w_2$    | $+w_3$    | $-w_4$    | $+w_5$    |
| DE           | $+d_0$    | $+d_1$    | $+d_2$    | $+d_3$    | $+d_4$    | $+d_5$    |
| DM           | $+s_0$    | $+s_1$    | $+s_2$    | $+s_3$    | $+s_4$    | $+s_5$    |
| R            | $+r_0$    | $+r_1$    | $+r_2$    | $+r_3$    | $+r_4$    | $+r_5$    |
| <i>Fonds</i> |           |           |           |           |           |           |
| Capital      | $K_0$     | $K_1$     | $K_2$     | $K_3$     | $K_4$     | $K_5$     |
| Population   | $H_0$     | $H_1$     | $H_2$     | $H_3$     | $H_4$     | $H_5$     |
| Terre        | $L_0$     | $L_1$     | $L_2$     | $L_3$     | $L_4$     | $L_5$     |

<sup>9</sup> L'irrévocabilité est une caractéristique plus forte que l'irréversibilité. En effet, l'irrévocabilité traduit l'idée qu'un processus ne peut pas passer plus d'une fois par un état donné.

<sup>10</sup> Georgescu-Roegen invente ce concept en assemblant "garbage" et "junk yard". Il s'agit d'éléments tels que les matériaux usagés, papiers et verres mis au rebut.

Le processus économique est à l'état stationnaire. Les vitesses d'écoulement des flux sont supposées constantes dans le temps. La durée durant laquelle le processus économique fonctionne est égale à une année. Les fonds fournissent des services mesurés en unités physiques sur la période considérée (nombre de travailleurs H sur une année). Les relations entre le processus et l'environnement sont présentées sous forme matricielle dans le tableau (2) suivant (Georgescu-Roegen, 1984) :

Avec:  $DM$  : la matière dissipée ;  $DE$  : l'énergie dissipée ;  $R$ , les rebuts. Le symbole  $-x_{ij}$ , représente la quantité de substance  $i$  consommée par le processus  $j$  rapportée à la durée  $t$  (pour  $i \neq j$ ). Ici, il s'agit de la quantité annuelle d'input  $i$  consommée par le processus  $j$ .

L'élément  $H_5$  représente la population totale. Cependant, une partie de cette population n'est pas encore employée dans les processus de production, ou bien n'y est plus employée. Par conséquent, la population active employée dans les processus de production est strictement inférieure à la population totale de l'économie. Par hypothèse, on a :  $\sum H_i < H_5$  avec  $i < 5$ .

A l'état stationnaire, les conditions physiques de viabilité du processus économique se traduisent par le respect des lois de conservation de l'énergie et de la matière. Les flux sont caractérisés par les relations physiques suivantes :

$$\begin{aligned} \sum_{i \neq 0} x_{0i} &= x_{00} \\ \sum_{i \neq 1} x_{1i} &= x_{11} \\ \sum_{i \neq 2} x_{2i} &= x_{22} \\ x_{35} &= x_{33} \\ \sum_{i \neq 4} x_{4i} &= x_{44} \\ \sum_{i \neq 4} w_i &= w_4 \end{aligned}$$

Ainsi, ce qui sort d'un processus entre nécessairement dans un autre processus : les flux internes au processus (intra-consommations) ne sont pas considérés ici.

Le processus économique est un processus entropique. En effet, la loi d'entropie est explicitement considérée à travers la présence de trois éléments : l'énergie dissipée, la matière dissipée et l'existence d'un rebut. Plus précisément, le processus économique prélève dans l'environnement respectivement de l'énergie  $e_1$  et de la matière  $M_0$ . La transformation par les processus de production de ces deux inputs en produits finis ainsi que leur consommation libre dans l'environnement à la fois de l'énergie et de la matière dissipée notées respectivement  $DE$  et  $DM$ , des déchets  $GJ$  et des rebuts  $R$ . L'énergie  $e_1$  et la matière  $M_0$  sont donc irréversiblement transformées par le processus économique. L'élément  $R$  contient de l'énergie et de la matière sous une forme non utilisable compte tenu de l'état de la technologie. C'est le cas par exemple des déchets nucléaires. La matière dissipée étant irréversiblement perdue, le processus  $P_4$  ne recycle que la matière encore disponible sous une forme inutilisable, c'est à dire les « garbojunks ». Les éléments  $DM$ ,  $DE$  et  $R$  ne peuvent donc pas être recyclés.

Dans ces conditions, la loi d'entropie indique non seulement qu'il n'est pas possible d'utiliser plusieurs fois l'énergie et la matière disponibles, mais encore que l'énergie et la matière sont irréversiblement dégradées par le processus économique. C'est ce qui explique l'existence d'éléments «  $+d_i$  » et «  $+s_i$  » dans le tableau (2). Par ailleurs, le maintien du fonds  $K_i$  suppose l'existence d'un flux  $x_{22}$  produit par  $P_2$ . Cela signifie que, même à l'état stationnaire, des inputs « énergie » et « matière » sont nécessaires. Ainsi, les services émanant du fond capital ne

peuvent être maintenus constants que si l'output  $x_{22}$  est lui-même maintenu constant, ce qui suppose que le processus  $P_2$  continue à prélever  $-x_{02}$  et  $-x_{12}$ . Or, ces deux éléments sont maintenus si et seulement si la production des processus primaires  $P_0$  et  $P_1$  est, elle aussi, maintenue. C'est à dire si on continue à produire aux mêmes taux " $x_{00}$ " et " $x_{11}$ ", ce qui n'est possible qu'en prélevant  $-M_0$  et  $-e_1$  dans l'environnement.

Autrement dit, le maintien du processus économique dans des conditions inchangées ne peut pas être assuré si les prélèvements d'énergie et de matière ne sont pas réalisés aux taux figurant dans la matrice. Mais de tels prélèvements impliquent une dissipation irréversible de la matière et de l'énergie exprimée par les termes DE, DM et R.

Enfin, le même raisonnement peut être fait pour la population. La population totale,  $H_5$  est maintenue grâce aux flux  $x_{i5}$ . Ce flux se décompose en trois éléments:

- " $-x_{15}$ ", consommation d'énergie,
- " $-x_{25}$ ", consommation de biens d'équipement,
- " $-x_{35}$ ", consommation de biens de consommation.

La population ne peut être maintenue à un niveau constant que si les taux de prélèvement sur les dotations de basse entropie sont eux aussi maintenus inchangés dans le temps.

Par ailleurs, le modèle fonds-flux ainsi présenté ne considère que les coordonnées matérielles et énergétiques du processus de production. Or, le bien qui est réellement produit par le processus  $P_5$  est un bien immatériel appelé par Georgescu-Roegen « la joie de vivre » ! C'est la raison pour laquelle  $x_{55}$  n'apparaît pas dans la représentation du processus économique (cf. tableau (2)).

Les principaux enseignements de cette approche du processus économique sont les suivants.

- premièrement, le fonctionnement entropique du processus économique s'accompagne irréversiblement de deux mouvements inséparables qui participent à l'accroissement de l'entropie de la biosphère : des prélèvements et des rejets.

- deuxièmement, l'état stationnaire constitue, selon les propres termes de Georgescu-Roegen, un mirage et ne peut en aucune manière apporter une solution satisfaisante au problème entropique. Considérant les enseignements de la thermodynamique, le développement chez Georgescu-Roegen ne peut être assuré que dans un contexte de décroissance et de maîtrise de l'évolution démographique. « *Undoubtedly, the current growth must cease, may be reversed. But anyone who believes that he can draw a blueprint for the ecological salvation of the human species does not understand the nature of evolution, or even of history, which is that of a permanent struggle in continuously novel forms, not that of a predictable, controllable physico-chemical process, such as boiling an egg or launching a rocket to the moon* » (1976, p.25).

- troisièmement, seule une partie de la matière disponible sous une forme inutilisable peut faire l'objet d'un recyclage : il s'agit des « garbojunks ». Ce point est fondamental, surtout si l'on note que la loi d'entropie relative à la matière fait référence à un système fermé : les dotations matérielles de basse entropie sont finies. Il est donc essentiel de considérer la finitude de la matière disponible et de veiller à l'économiser, d'autant plus qu'il n'est pas possible, à l'échelle humaine, de transformer de l'énergie en matière. Le problème entropique de l'humanité s'exprime en termes de rareté de la basse entropie matérielle. "Accessible material low entropy is by far the most critical element from the bioeconomic viewpoint" (1976, p.25).

- quatrième, le progrès technique est borné par la loi d'entropie. D'une part, l'accès à des gisements de ressources de plus en plus difficiles d'accès nécessite des technologies très performantes et dévoreuses de matière et d'énergie (d'où élévation du coût d'extraction en termes énergétiques) et d'autre part, les prélèvements s'accompagnent d'une diminution de la concentration des ressources (cas des minerais par exemple). On ne peut extraire, même avec la technologie la plus performante, plus d'énergie libre d'une ressource qu'elle n'en contient ! Compte tenu de la finitude des dotations terrestres de basse entropie (énergies fossiles, ressources minérales) et de l'évolution exosomatique de l'humanité, Georgescu-Roegen propose d'orienter le progrès technique dans deux directions majeures : innovations d'économie de basse entropie et innovations de substitution (stock/flux).

L'analyse de Georgescu-Roegen nous amène ainsi à la question de la viabilité économique, de la soutenabilité du processus économique. Dès lors que sont prises en compte à la fois la dissipation de l'énergie et la dissipation de la matière, le fonctionnement d'ensemble du processus économique ne peut plus être isolé de son environnement. A partir du modèle fonds-flux, une caractérisation entropique du processus économique peut participer à l'élaboration d'indicateurs de soutenabilité particuliers.

### III. Approche fonds-flux et soutenabilité du processus économique

L'approche présentée est une approche qualitative des éléments participant au processus de production. Il est possible de considérer la relation entropique qui lie tout processus à son environnement afin de caractériser la soutenabilité d'un processus économique en général, et d'un processus de production en particulier. Les conditions de reproductibilité du processus dépendent nécessairement des échanges avec le milieu extérieur. Voyons tout d'abord comment à partir du modèle fonds-flux une mesure de la soutenabilité peut être envisagée.

#### A. Définition de la soutenabilité du processus de production

La soutenabilité doit traduire les interdépendances qui existent entre l'acte de production et les prélèvements et/ou rejets au sein de l'environnement. Chaque processus de production nécessite à la fois des fonds et des flux pour fonctionner. Cette nécessité a pour fondement la qualité qui caractérise chaque élément participant à la production. Si on suppose que les fonds sont constants, il est possible de décrire les relations physiques qui lient les flux entre eux. La relation de complémentarité qui s'établit entre les fonds et les flux permet de décrire la technologie utilisée dans le processus de production considéré. Georgescu-Roegen emploie le vocable de *feasible technology* pour décrire une technologie capable de produire, sur une période de production donnée, un bien particulier. Les fonds sont maintenus à un niveau constant grâce au maintien des niveaux des différents flux mobilisés dans le processus.

Pour un processus de production quelconque P, l'application des principes de la thermodynamique conduit aux relations suivantes. Selon le principe de conservation, le processus de production doit vérifier que la somme des masses des flux in est égale à la somme des masses des flux out. D'où la relation:

$$\sum_{h=1}^{h=n} (m_h)^- = \sum_{k=1}^{k=m} (m_k)^+ \quad (8)$$

avec:  $(m_h)^-$ , la masse du flux h qui entre dans le processus de production,

et  $(m_k)^+$ , la masse du flux k qui sort du processus de production.

Ainsi, par exemple, pour le processus  $P_2$ , on peut écrire:

$$\sum_{h=1}^{h=n} (m_h)^- = x_{02} + x_{12} + x_{42} \quad (9)$$

et

$$\sum_{k=1}^{k=m} (m_k)^+ = x_{22} + w_2 + d_2 + s_2 + r_2 \quad (10)$$

L'application de la loi d'entropie implique de vérifier la relation suivante au niveau d'un processus quelconque :

$$\Delta S = S^+ - S^- > 0 \quad (11)$$

Avec  $S^+ \equiv \sum_{i=1}^{i=l} S_i^+$ , l'entropie des flux "out", et,  $S^- \equiv \sum_{j=1}^{j=p} S_j^-$  l'entropie des flux "in".

Afin de caractériser l'entropie résultant du fonctionnement du processus économique, on peut faire appel à l'entropie massique. On fait donc l'hypothèse que la variation d'entropie a pour origine le transfert d'une masse entre le processus et son environnement. Les différents éléments polluants accompagnant la production d'énergie par exemple, sont identifiables par leurs masses respectives. En thermodynamique, l'entropie massique d'une substance quelconque notée « v » est définie par la relation suivante:

$$\tau_v = \frac{S_v}{m_v}$$

On peut réécrire la relation (11)  $\Delta S = S^+ - S^-$  en posant :

$$S^+ \equiv \sum_{i=1}^{i=l} S_i^+ = \sum_{i=1}^{i=l} \tau_i \cdot (m_i)^+$$

et

$$S^- \equiv \sum_{j=1}^{j=p} S_j^- = \sum_{j=1}^{j=p} \tau_j \cdot (m_j)^-$$

Ainsi, par exemple, pour le processus  $P_2$ , les relations ci-dessus sont construites pour chaque flux "in" et "out". Comme l'entropie vérifie la propriété d'additivité pour les différents éléments participant à la production, il est possible d'agréger les différentes catégories d'éléments. Les éléments sont mesurés dans la même unité (en J/K).

Nous pouvons écrire (11) pour le processus  $P_2$ , sous l'hypothèse  $i=j$ :

$$\Delta S_{P_2} = \left( \tau_1 \cdot (m_1)^+ - \tau_1 (m_1)^- \right) + \left( \tau_2 \cdot (m_2)^+ - \tau_2 (m_2)^- \right) + \dots$$

Soit :

$$\Delta S_{P_2} = \sum_i \tau_i \cdot \left[ (m_i)^+ - (m_i)^- \right]$$

La relation ci-dessus, si  $i \neq j$ , devient alors :

$$\Delta S_{P_2} = \sum_{i=1}^{i=l} \tau_i \cdot (m_i)^+ - \sum_{j=1}^{j=p} \tau_j \cdot (m_j)^- \quad (12)$$

La relation (12) permet de caractériser les flux qui entrent et sortent du processus de production à l'aide d'une évaluation entropique.

Au niveau d'une économie, il est possible de hiérarchiser les différents processus de production en fonction de leur aptitude à créer de l'entropie. Cela permet de comprendre que, même si les fonds sont constants et nécessaires à la production d'un bien, la quantité d'output peut varier indépendamment de ces fonds : il suffit, par exemple, que l'efficacité du processus de production augmente du fait d'une réduction des rejets dans l'environnement, à technologie inchangée. A l'échelle d'une économie, l'agrégation des  $\Delta S$  évalués pour chaque processus permet, pour une capacité de production donnée, de mesurer l'impact entropique des rejets issus des activités économiques. Cet indicateur pourrait constituer une mesure du degré de soutenabilité du développement économique.

Pour une économie composée de  $K$  processus de production, l'évaluation de  $\Delta S_{ECO}$  permettrait de mesurer l'effort à réaliser pour réduire les pertes entropiques jusqu'à un niveau de référence déterminé  $\Delta S_{ECO}^*$ , niveau compatible avec des contraintes écologiques définies par ailleurs. L'indicateur de soutenabilité s'écrit :

$$\Delta S_{ECO} \equiv \sum_{y=1}^{y=K} \Delta S_{P_y} < \Delta S_{ECO}^*$$

L'avantage d'un tel indicateur est qu'il prend en compte à la fois les rejets et les prélèvements, et qu'il autorise une compensation globale entre les flux-in et les flux-out. Précisément, la soutenabilité du développement vise à lutter contre les gaspillages de ressources naturelles et à limiter les rejets exerçant une menace à l'échelle de la biosphère. Ce souci de préservation qui est inséparable de l'approche bioéconomique de Georgescu-Roegen s'exprime ici à partir des flux d'énergie et de matière accessibles : ce sont *in fine* les dotations d'énergie et de matière accessibles qui doivent être préservées.

## B. Conditions bioéconomiques de soutenabilité

Un certain nombre d'enseignements peuvent être tirés de l'approche fonds-flux de Georgescu-Roegen pour élaborer quelques conditions de soutenabilité. Généralement, les règles de soutenabilité retenues sont les suivantes : une règle faible qui implique le maintien d'un stock global de capital dans le temps et une règle forte qui s'applique au seul stock de capital naturel de l'économie. Un premier enseignement découle de l'approche que nous avons présentée : ce n'est pas le capital qui doit être maintenu constant dans l'économie mais les services que celui-ci peut fournir sous certaines conditions. Ces dernières impliquent notamment que les taux des flux soient maintenus à des niveaux inchangés, pour une combinaison particulière des fonds et des flux donnée. Or la loi d'entropie implique l'impossibilité de maintenir indéfiniment un état stationnaire de l'économie.

Il découle de cela qu'une première condition bioéconomique consiste à augmenter la durée sur laquelle les services des fonds sont délivrés et à réduire la vitesse de transformation des flux par les fonds, pour un niveau d'output donné. Le ralentissement de la vitesse de circulation des flux autorise une réduction de la dissipation *via* une modification de la combinaison des fonds et des flux dans l'économie. C'est là une condition nécessaire pour limiter le flux de

déchets et exercer de la sorte une maîtrise sur les effets de la loi d'entropie tant au niveau de l'énergie que de la matière.

Parallèlement, comme les dotations de basse entropie accessible sont limitées, le maintien d'une quantité minimale des flux de matière (MC) et d'énergie (ME) nécessaires au fonctionnement du processus économique implique d'élever l'efficacité des transformations au sein du processus. Cela se traduit par l'élévation du rendement énergétique des processus de production : les substitutions au sein des flux peuvent ici jouer un rôle important dans l'accroissement de l'efficacité productive des processus. Sur ce point, les choix technologiques et en particulier le recours à des technologies viables. Selon Georgescu-Roegen (1984, p.29), "a technology is viable if and only if it can maintain the corresponding material structure and necessarily the human species". Le développement de technologies s'appuyant sur des ressources renouvelables telles que l'énergie solaire peut constituer un exemple de technologie viable.

Dans un contexte où le processus économique est unidirectionnel et ouvert sur l'environnement, il est primordial de reconsidérer les frontières du processus et les modalités d'échange avec l'extérieur. La soutenabilité du processus implique ainsi de définir une durée et une vitesse de transformation des flux par les fonds qui autorise une diminution de la dissipation.

Cette perspective conduit à reconsidérer la dynamique de la production avec l'intégration du changement qualitatif au sein des processus productifs (Gaffard, 1997). Le processus économique n'est plus appréhendé comme un système clos et dont les conditions de reproductibilité sont définies de l'intérieur par des mécanismes endogènes. Les fondations biophysiques de l'acte économique impliquent de reconsidérer les frontières spatiales et temporelles du processus, ce qui conduit à analyser plus particulièrement les interdépendances entre la sphère économique et la sphère naturelle.

## Références bibliographiques

- Gaffard, J-L. (1997), *Croissance et fluctuations économiques*, Montchrestien, seconde édition.
- Georgescu-Roegen N. (1966), *Analytical Economics. Issues and problems*, Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen N. (1970), *La science économique. Ses problèmes et ses difficultés*, trad. Française, Dunod.
- Georgescu-Roegen N. (1971), *The entropy Law and the economic process*, Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen N. (1974), "Dynamic Models and Economic Growth", *Economie Appliquée*, p.235-253.
- Georgescu-Roegen N. (1976), *Energy and economic myths*, Pergamon Press.
- Georgescu-Roegen N. (1977a), "What thermodynamics and biology can teach economists", *Atlantic Economic Journal*, 5, (1), March, p.13-21.
- Georgescu-Roegen N. (1977b), "Inequality, limits and growth from a bioeconomic viewpoint", *Review of Social Economy*, XXXV, december, p.361~75.
- Georgescu-Roegen N. (1978), « De la science économique à la bioéconomie », *Revue d'Economie Politique*, numéro 3, Mai-Juin, p.337-382.
- Georgescu-Roegen N. (1979), "Energy analysis and economic valuation", *Southern Economic Journal*, XLIV, april, p.1023-1058.
- Georgescu-Roegen N. (1982), « La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine », *Economie Appliquée*, volume 35, numéros 1-2, p.1-26.
- Georgescu-Roegen N. (1984), "Feasibles recipes versus viable technologies", *Atlantic Economic Journal*, volume XII, (1), match, p.21-31.
- Georgescu-Roegen N. (1986), "The entropy law and the economic process in retrospect", *Eastern Economic Journal*, volume XII, numéro 1, January-March. p.3-25.
- Georgescu-Roegen N. (1995), *La décroissance, Entropie-Ecologie-Economie*, Traduction de J. Grinevald et I. Rens, Editions Sang de la Terre.
- Mirowski P. (1988), "Nicholas Georgescu-Roegen", *Journal of Economic Issues*, XXII, september, p.820-828.