

LaRevueDurable avec Jacques Grinevald\*

# Entropie et finitude de la Biosphère : pour une bioéconomie

Le tissu vivant à la surface de la Terre – la Biosphère – fonctionne et évolue grâce aux apports quotidiens en énergie solaire et aux échanges constants de matières et d'énergie avec le système géochimique de la Terre. Mais alors que l'utilisation massive des énergies fossiles perturbe les équilibres séculaires qui régissent ces apports et ces échanges, l'économie en vigueur n'en tient compte qu'à la marge.

Et pour cause ! Ses fondements s'enracinent dans l'économie politique créée au tournant des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, époque préindustrielle, en décalage total avec la modernité thermo-industrielle qui déferle sur le monde depuis la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle et, plus encore, depuis le XX<sup>e</sup> siècle.

Dans un système idéal parfait, l'énergie ne se dégrade pas. L'entropie est constante : elle ne varie pas. Or, les travaux du physicien Rudolf Clausius, puis, plus tard, ceux d'un autre physicien, Max Planck, montrent que dans la nature, dans les processus physico-chimiques réels, il y a toujours production d'entropie, c'est-à-dire dégradation irréversible.

Mais comment concilier cette loi de l'entropie croissante, qui prédit la dégradation des systèmes, avec l'extraordinaire vitalité des processus biologiques ? Comment les organismes vivants font-ils pour ne pas dépérir et mourir ? Où puisent-ils l'énergie et la matière nécessaires à leur développement et reproduction ? Durant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, le hiatus entre la loi de l'entropie et les manifestations de la vie – notamment l'évolution des espèces – paraît insurmontable.

## Eclaircissements

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger (1887–1961) identifie le premier le mécanisme qui résout cette énigme. Depuis son exil à Dublin, en Irlande, il suggère, dans un ouvrage intitulé *Qu'est-ce que la vie ?* publié en 1944, qu'un organisme vivant échappe – le temps d'une vie ! – à la dégénérescence

et à la mort parce qu'il passe son temps à se débarrasser dans son environnement (son milieu extérieur) de l'entropie qu'il produit et à y récupérer l'énergie et la matière – dans les termes de Schrödinger, l'« entropie négative » – dont il a besoin pour prospérer.

Par exemple, pour se régénérer, croître et essaimer, une plante puise de l'eau dans le sol, extrait des minéraux de la terre, absorbe (et rejette) du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, capte de l'énergie du rayonnement solaire (source chaude) qui tombe sur la Terre (source froide). La biologie semblait déroger à la loi de l'entropie notamment parce qu'il manquait une thermodynamique applicable aux systèmes *ouverts* que sont les systèmes vivants, qui échangent de l'énergie *et* de la matière avec le monde extérieur.

La thermodynamique classique, celle de Clausius et de Kelvin, ne porte que sur des systèmes *isolés*, qui n'échangent ni énergie ni matière avec leur environnement. Puis les physiciens sont parvenus à appliquer la loi de l'entropie à des systèmes *clos* (ou *fermés*), qui échangent de l'énergie avec leur environnement, mais pas de la matière.

Une machine à vapeur, par exemple, est un système fermé. Le foyer où le charbon brûle chauffe l'eau de la chaudière. L'eau bout et la force d'expansion de la vapeur entraîne le piston. Le condenseur récupère cette vapeur



et la refroidit pour fermer le cycle de ce moteur : la locomotive avance, mais sa structure matérielle ne se transforme pas. Elle s'use, mais sa constitution n'est pas constamment modifiée (régénérée) comme celle d'un organisme vivant en bonne santé.

Pour les physiciens, la tâche d'intégrer la matière à la loi de l'entropie s'est révélée très difficile. La thermodynamique des systèmes ouverts apparaît à Bruxelles, dans les années 1930. Mais ce n'est que dans les années 1970 que le physicien et chimiste belge d'origine russe Ilya Prigogine (1917-2003) l'a fait largement connaître, notamment grâce à son admirable synthèse, *La nouvelle alliance*, parue en 1979, coécrite avec la philosophe Isabelle Stengers.

\* Voir la note page 31.

A partir de là, les choses sont plus claires. Il y a trois catégories de systèmes thermodynamiques :

- les systèmes isolés (qui n'échangent ni énergie ni matière avec l'extérieur) ;
- les systèmes fermés ou clos (qui échangent de l'énergie, mais pas de matière), par exemple la machine à vapeur ;
- les systèmes ouverts (qui échangent énergie et matière), catégorie qui inclut tous les organismes vivants et les écosystèmes.

## La Biosphère entre en scène

Dès les années 1950-60, la biologie moléculaire prend son envol avec la découverte de la structure de l'ADN. Mais les mécanismes élémentaires, du gène à la cellule, ne suffisent pas à comprendre comment le tissu du vivant fonctionne et évolue, globalement, à l'échelle de la Terre. Sur ce plan, héritière de l'histoire naturelle, l'écologie a son mot à dire !

Le grand savant russe Vladimir Ivanovitch Vernadsky (1863-1945), passé de la minéralogie à la géochimie, appartient à la tradition des grands naturalistes du XIX<sup>e</sup> siècle. Dans les années 1920, il crée un nouveau champ d'études interdisciplinaires, la biogéochimie, qui révèle le rôle essentiel que les organismes vivants jouent dans le fonctionnement global de la Terre. Cependant, bien qu'au faite d'une carrière académique prestigieuse, il est intellectuellement très isolé.

En 1926, il doit retourner dans sa patrie, où le régime communiste critique puis censure sa théorie de la *Biosfera*, titre du petit livre génial qu'il publie à Leningrad après avoir écrit et publié deux ans plus tôt, à Paris, *La Géochimie*. Un siècle après le mémoire de Carnot et quarante ans avant l'hypothèse Gaïa de James Lovelock, Vernadsky explique dans *Biosfera* son approche thermodynamique et biogéochimique de la Terre en tant que « planète vivante ».

En 1929, il publie en français une version révisée et augmentée de ce livre sous le titre *La Biosphère*. Comme Goethe (1749-1832) et Alexandre de Humboldt (1769-1859), Ver-

nadsky regarde la Nature comme « un grand Tout animé d'un souffle de vie ». *La Biosphère* offre pour la première fois une vision interdisciplinaire et holistique de la circulation des éléments chimiques à la surface de la Terre.

Vernadsky cherche à étudier, de manière quantitative, l'activité et la prolifération des organismes – à commencer par les micro-organismes – qui transforment la géochimie des trois grandes « enveloppes géologiques » de la Terre que le géologue autrichien Eduard Suess (1831-1914) a définies en 1875 : la lithosphère (les roches), l'hydrosphère (l'eau) et l'atmosphère (l'air). Ensemble, ces trois enveloppes forment la géosphère.

Il est ainsi le premier scientifique, dans l'entre-deux-guerres, à comprendre que le vivant, collectivement et dans la durée immense de l'histoire de la Terre, est la plus puissante force géologique qui altère les grands équilibres géochimiques. Il y a donc coévolution entre la vie et la Terre : ce sont les interférences des processus biologiques avec les trois enveloppes géologiques de la surface de la Terre qui créent et régulent la Biosphère.

Le vivant joue ainsi un rôle central dans la circulation de la matière à la surface de la Terre. La biogéochimie met en évidence les

interrelations de tous les éléments – carbone, oxygène, azote, soufre, phosphore, etc. – avec l'activité de tous les êtres vivants. Or, la stabilité relative de ces interrelations à l'échelle planétaire détermine à son tour le caractère habitable de la Terre pour l'espèce humaine.

Sur ce point, Vernadsky est aussi l'un des premiers à comprendre que, doué de capacités d'invention et de fabrication de plus en plus puissantes,

*Homo sapiens faber* constitue une nouvelle force géologique de première grandeur.

Un grand Tout animé d'un souffle de vie

## Thermodynamique de la Biosphère

Réseau immense et très complexe, la Biosphère est « un mécanisme à la fois terrestre et cosmique » parce que l'énergie solaire est à l'origine des processus biogéologiques qui l'organisent et la transforment sans cesse. C'est pourquoi, trente ans avant le début des vols spatiaux, *La Biosphère* invite, dès ses premières lignes, à regarder « la Biosphère dans le cosmos ».

Au travers des grands cycles biogéochimiques, la Biosphère échange constamment de l'énergie et de la matière avec la géosphère. Cette matière est en général recyclée. Mais une partie finit par se sédimer sous forme de houilles et de pétroles issus de la biominéralisation de déchets organiques.

## Bienvenue dans l'anthropocène !

Pour Jacques Grinevald, l'environnement global, c'est la Biosphère telle que Vernadsky l'a envisagée et que l'activité humaine transforme, depuis la Révolution thermo-industrielle, à un point tel qu'un nouveau terme est désormais nécessaire pour désigner l'époque géologique actuelle.

Membre de la Société géologique de Londres et du réseau du Programme interna-

tional géosphère-Biosphère (IGBP), Jacques Grinevald a vite adopté le terme d'anthropocène (page 18) (Grinevald, 2007 ; Steffen et coll., 2011), comme son ami glaciologue Claude Lorius<sup>1</sup>. A la demande de son président, le géologue Jan Zalasiewicz, professeur à l'Université de Leicester, au Royaume-Uni, il a rejoint le Groupe de travail sur l'anthropocène de la sous-commission du Quaternaire de la

Commission internationale de stratigraphie.

S'il n'y a pas d'inondation, ce dossier sera discuté au prochain Congrès géologique international, à Brisbane, en Australie, en août 2012.

LRD avec JG

1) Lorius C, Carpentier L. *Voyage dans l'anthropocène*, Actes Sud, Arles, 2010.



Tilce Olson | Dreamstime

Ensemble, la géosphère et la Biosphère forment le système Terre. Ce système reçoit le rayonnement solaire et renvoie de l'énergie dans l'univers. Et certes, il reçoit aussi des météorites de l'espace mais, pour l'humanité, aucune matière économiquement utilisable. La Terre est donc bien un espace clos, un monde fini. Mais cet enfermement terrestre et biosphérique est, pour les vivants, d'abord une protection : l'espace extra-atmosphérique est inhospitalier. C'est le royaume du « froid et des ténèbres ».

### Economie décalée

Voilà donc planté le décor terrestre et biosphérique de l'humanité : « L'homme, en tant qu'être vivant, écrit Vernadsky, est indéfectiblement lié aux phénomènes matériels et énergétiques d'une des enveloppes géologiques de la Terre : la Biosphère. Et il ne peut en être indépendant un seul instant. » En d'autres termes, il est folie de penser que la

vie économique des êtres humains peut prétendre occulter ce contexte, comme cela est très largement le cas aujourd'hui.

Cependant, tout comme Sadi Carnot, Vernadsky est très en avance sur son temps : les années 1930 ne s'intéressent pas à la Biosphère. Elles ont d'autres chats à fouetter ! Mais Vernadsky est tout de même le père fondateur de l'écologie globale. Son œuvre inspire l'école d'écologie scientifique de George Evelyn Hutchinson (1903-1991), à l'Université Yale, aux Etats-Unis, qui étudie les grands cycles biogéochimiques – du carbone, de l'azote, du phosphore, etc. – et le paradigme thermodynamique de l'écologie écosystémique moderne.

Mais aujourd'hui, l'étude des propriétés et de l'évolution de la Biosphère et du système Terre a beau être en pleine expansion, les sciences économiques et sociales persistent à ignorer, voire à refouler tout ce savoir, de

même que, au nom d'impératifs technologiques, financiers et/ou géopolitiques, les décideurs politiques. La crise écologique planétaire inédite n'est pas encore une évidence pour tout le monde, encore moins une priorité sur l'agenda de la grande politique internationale.

L'humanité vit et travaille, depuis la « révolution carnotienne », dans la civilisation thermo-industrielle qui brûle des quantités de plus en plus massives de combustibles fossiles issues de la lithosphère, ce qui provoque un cortège d'effets qui perturbent l'intégrité et la stabilité des grands équilibres écologiques de la Biosphère et de la Terre. Mais comme son nom l'indique, l'économie « néo-classique » s'enracine dans la civilisation européenne classique, c'est-à-dire préindustrielle, qui se caractérise par le travail humain, les chevaux, les machines simples, la marine à voile, les horloges mécaniques et les moulins à vent et à eau !

Le décalage est donc désormais total entre, d'un côté, l'évolution des connaissances qu'orchestrent notamment le Centre de Stockholm pour la résilience (page 18), le Programme international géosphère-Biosphère (IGBP) ou le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), qui décrivent de façon de plus en plus précise le fonctionnement des équilibres terrestres – et leur mise à mal ! – dont l'humanité dépend pour sa survie et, de l'autre, une économie (théorique et appliquée) qui, bien que blindée dans une carapace mathématique propre au XX<sup>e</sup> siècle, n'en reste pas moins l'héritière directe de la mécanique analytique qui date des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles.

En accord avec ses présupposés d'un autre âge – l'âge néolithique ! – cette économie capitaliste, dite moderne, envisage la nature et ses ressources comme s'il s'agissait d'éléments isolés et hors du temps réel de l'évolution, à l'instar des systèmes isolés de la mécanique rationnelle. Cette vision idéale du rationalisme classique fait fi de l'état de la société thermo-industrielle qui contredit en tous lieux, en tous points et de façon de plus en plus flagrante et délétère ses fondements simplistes, erronés et fatalement inadéquats.

## Energie utilisable (libre), énergie inutilisable (liée)

Une autre perspective économique, plus en phase avec la réalité de l'écologie humaine, est évidemment possible. Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) en a esquissé les fondements scientifiques de 1960 au début des années 1990. Son point de vue : la science économique néoclassique est anachronique depuis la révolution thermo-industrielle parce qu'elle ignore la loi de l'entropie, « la plus économique des lois de la physique ».

Sa vision de l'économie part de sa découverte que la loi de l'entropie « est la base de l'économie de la vie à tous les niveaux ». Il prend donc l'exact contre-pied de l'économie néoclassique.

Il présente ainsi les choses en 1970 : « Ce qui entre dans le processus économique consiste en *ressources naturelles de valeur* et ce qui en est rejeté consiste en *déchets sans valeur*. » La thermodynamique confirme cette différence qualitative : « De son point de vue, le processus économique absorbe la matière-énergie dans un état de *basse entropie* et la rejette dans un état de *haute entropie* » (Georgescu-Roegen, 1995).

La différence entre les énergies de basse entropie (ou libre) et de haute entropie (ou liée) est très simple : la première est utilisable ; la seconde ne l'est pas. « L'énergie chimique contenue dans un morceau de charbon est de l'énergie libre parce que l'homme peut la transformer en chaleur ou, s'il le veut, en travail mécanique. Mais la fantastique énergie thermique contenue dans l'eau des mers, par exemple, est de l'énergie liée. Les bateaux naviguent à la surface de cette énergie mais, pour ce faire, ils ont besoin de l'énergie libre d'un quelconque carburant ou bien du vent. »

Ces quelques considérations de base ont plusieurs conséquences majeures que l'économie en place commet l'erreur fatale de ne pas tirer. Tout d'abord, on peut comprendre la lutte économique comme étant la recherche

de basse entropie, c'est-à-dire d'énergie utilisable, dans l'environnement. Or, dans le cas des combustibles fossiles, cette basse entropie n'est – à la grande différence de l'énergie solaire – utilisable qu'une fois : le morceau de charbon ne peut pas être transformé en chaleur ou en travail mécanique deux fois.

Et s'il est utilisé pour « produire des réfrigérateurs, des automobiles ou des avions meilleurs et plus grands » (*better and bigger*), écrit Georgescu-Roegen, il est inévitable qu'il en résultera des déchets « meilleurs et plus grands » qui accroîtront l'entropie globale de la Biosphère. Plus on retire des ressources minérales de basse entropie du sous-sol de la Terre et plus on rejette des polluants et des déchets de haute entropie, plus on déstabilise la Biosphère et les équilibres terrestres actuels. Georgescu-Roegen affirme qu'à chaque fois qu'on fait cela – et on le fait aujourd'hui sur une échelle colossale –, on réduit l'espérance de vie de l'humanité.

Bien entendu, partout où l'on promeut une production industrielle « meilleure et plus grande », « tout le monde, note Georgescu-Roegen, se rend à l'évidence aveuglante »

que cela engendre des pollutions. Mais « nul ne paraît voir que la cause réside dans le fait qu'on néglige de reconnaître la nature entropique de l'activité économique. »

La conclusion s'impose : il faut décroître les ponctions dans les stocks de combustibles fossiles et de matières premières minérales. L'énergie nucléaire n'est pas une alternative. L'économie écologiquement soutenable ne peut fonctionner à long terme que grâce aux flux de l'énergie solaire. En corollaire, il faut beaucoup mieux répartir les richesses. La distribution est un problème prioritaire, avant celui de la production ou de la croissance.

## Bioéconomie

Georgescu-Roegen publie son magnum opus, *The Entropy Law and the Economic Process*, en 1971. Cet ouvrage, d'une envergure exceptionnelle tant du point de vue économique que de la philosophie des sciences, expose une perspective biophysique et évolutive – qu'il nommera plus tard bioéconomique – d'une puissance heuristique incomparable.

Tout d'abord peu lu, et surtout ignoré, ce livre difficile, inaccessible au grand public, devient peu à peu une référence incontournable dans les cercles qui cherchent à réconcilier

**Le vivant  
est la plus  
puissante force  
géologique**

## Prigogine, le grand concurrent de Georgescu-Roegen

Ilya Prigogine (1917-2003), Prix Nobel de chimie en 1977, est le concurrent direct de Georgescu-Roegen sur le terrain de la philosophie de l'entropie. Leur dialogue, vers 1977-78, a vite tourné court (Grinevald, 2006).

L'intérêt prononcé de Georgescu-Roegen pour l'« environnement global » le rend attentif au fait que « la richesse des nations » est un processus de transformation physique entropique qui a lieu dans un système clos : la sur-

face de la Terre, qui reçoit de l'énergie solaire, mais pas de matière économiquement utilisable, de l'extérieur du système Terre.

Prigogine, lui, travaille surtout sur les systèmes ouverts, les « structures dissipatives », mais il ne s'occupe guère du système Terre. Ce qui l'intéresse, éventuellement, c'est l'univers de la cosmologie. Pas le monde de l'économie réelle. Fervent avocat de l'innovation technologique, il ne parle pas du caractère « fini » de la Terre,

qui impose des limites aux activités humaines et donc à la croissance économique mondiale. Il semble convaincu que la richesse et la créativité de l'Occident sont la fine fleur de l'évolution de l'humanité.

Au contraire, Georgescu-Roegen critique l'idéologie du progrès, la théorie économique de la croissance, l'opulence et l'arrogance de l'Occident, qui ne peut pas être la norme de l'humanité.

LRD avec JG

l'économie avec l'écologie théorique qui s'appuie sur les principes de la thermodynamique.

De même que les biologistes se sont réconciliés avec la physico-chimie et les principes de la thermodynamique, Georgescu-Roegen comprend que la théorie économique doit se rattacher à la biologie et donc appliquer les principes de la thermodynamique en incluant toutes les composantes matérielles de l'activité économique.

Darwiniste convaincu, il s'inscrit dans la tradition évolutionniste qui conçoit l'espèce humaine parmi toutes les autres formes de vie à la surface de la Terre. Il est très conscient qu'*Homo sapiens faber* invente des outils et des machines, des machines-outils et des machines qui fabriquent des machines et d'immenses systèmes macro-techniques : mégapoles et aéroports, systèmes d'armes modernes, missiles balistiques et satellites artificiels, sous-marins nucléaires et fusées pour aller sur la Lune, etc.

Tout cet arsenal de techniques, toute cette technologie industrielle impliquent une énorme dépense d'énergie et des moteurs d'une puissance inimaginable jusqu'à une époque très récente. Cette puissance énergétique vient de la lithosphère, d'où la tech-

nique moderne extrait l'énergie solaire fossilisée dans les déchets des anciennes époques biogéologiques de la Biosphère. Les lois de la thermodynamique s'appliquent à toutes ces machines, à toutes les « machines vivantes » que sont les organismes vivants et les écosystèmes à toutes les échelles.

Georgescu-Roegen ne connaissait pas l'œuvre de Vernadsky et n'utilisait pas le mot Biosphère dans son sens écologique<sup>1</sup>. Mais tout comme le fondateur de la biogéochimie, il comprend que l'industrialisation à l'échelle du monde fait de l'activité humaine l'un des plus puissants agents géologiques sur Terre. Et déplore que l'économie en vigueur commette l'erreur de reléguer à la marge un phénomène aussi déterminant pour l'avenir de l'humanité. ■

#### BIBLIOGRAPHIE

GEORGESCU-ROEGEN N. *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, 1971.

GEORGESCU-ROEGEN N. *La décroissance. Entropie, écologie, économie*, traduit et présenté par Grinevald J et Rens I, Sang de la Terre, Paris, 1995 (3<sup>e</sup> éd. Ellébore, 2006).

GRINEVALD J. NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN. *dissident de l'Occident et visionnaire de la décroissance*, LaRevueDurable n° 20, avril-mai-juin 2006, pp. 8-13.

GRINEVALD J. *La Biosphère de l'anthropocène : climat et pétrole, la double menace*, Repères transdisciplinaires (1824-2007), Georg, Genève, 2007.

PRIGOGINE I, STENGERS I. *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*, Gallimard, Paris, 1979 (2<sup>e</sup> éd., 1986).

STEFFEN W, GRINEVALD J, CRUTZEN P, MCNEILL J. *The Anthropocene: Conceptual and Historical Perspectives*, *Philosophical Transactions of the Royal Society, A*, 2011, 369, pp. 842-867.

VERNADSKY V. *La Biosphère (Paris, 1929)*, préface de Jean-Paul Deléage, Diderot, 1997 (rééd. Seuil, 2002).

VERNADSKY V. *La Biosphère (Leningrad, 1926)*, édition critique : *The Biosphere, Introduction de Jacques Grinevald*, préface de Jean-Paul Deléage, New York, Copernicus, Springer-Verlag, 1998.

