

Cahiers Marxistes 235 - mai-juin 2007 - L'économie et la thermodynamique

Analyse critique des thèses de Georgescu-Roegen

par Grégoire Wallenborn, physicien et philosophe chercheur au CEDD (Conseil économique pour le développement durable) et Pierre Gillis, professeur de physique à l'université de Mons (Belgique)

Etant donné que le « mouvement de la décroissance » fait régulièrement référence aux travaux de Nicholas Georgescu-Roegen —réputés très techniques puisqu'ils mêlent physique et économie—, il nous a semblé utile d'analyser les arguments développés par cet auteur afin d'en comprendre les hypothèses et la portée¹. Quelle est la cible des critiques de Georgescu-Roegen ?

Georgescu-Roegen s'en prend aux économistes, (presque) toutes obédiences confondues, à qui il reproche de s'appuyer sur des modèles mécanistes, c'est-à-dire sur une partie seulement de la physique.² En effet, la critique de Georgescu-Roegen a pour fondement la thermodynamique et ses deux premiers principes. Il reproche aux économistes de ne s'inspirer que du premier principe (la conservation de l'énergie) et d'oublier le second (l'irréversibilité des phénomènes pour lesquels il y a échange de chaleur). Dans cette perspective, il poursuit une double démonstration :

- 1) l'oubli de l'irréversibilité est la traduction directe de l'absence de prise en compte par les économistes du coût des matières premières, extérieures à la loi de la valeur, tant chez les économistes classiques que chez les marxistes. Georgescu-Roegen a en effet pour souci principal l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables.
- 2) L'économie n'est pas une science théorique, et ne saurait l'être car elle n'est pas universelle. L'économie dépend la société et de ses institutions dont elle est censée donner une description. La discipline économique est avant tout un opportunisme pratique

Nous avons étudié attentivement l'ouvrage *La décroissance. Entropie-écologie-économie* qui est un recueil de textes destinés à un public non versé dans l'économie. Remarquons que ce recueil n'est pas exempt de contradictions, et qu'il n'est pas toujours facile de se faire une idée précise des thèses avancées. La numérotation des citations reprise dans cet article suit cette édition.

Afin de vérifier l'une ou l'autre hypothèse, nous avons également consulté *La science économique, ses problèmes et ses difficultés* (Dunod, 1970) et *The Entropy Law and the Economic Process* (Harvard University Press, 1971).

Une critique a été développée par P. Mirowski, *More Heat than Light Economics as Social Physics: Physics as Nature's Economics*, Cambridge University Press, 1989.

C'est en étudiant le capitalisme que les analystes ont été amenés à constater que le marché a toujours fonctionné en associant à un produit la quantité de travail nécessaire à sa fabrication, toutes étapes confondues, quantité qui fixe sa valeur, au-delà des fluctuations du marché et de l'offre et de la demande momentanées. Certes, ces fluctuations autorisent régulièrement des pratiques spéculatives qui jouent sur des effets de rareté temporaires, ou plus ou moins durables – à ne pas confondre, à nos yeux, avec une authentique prise en compte d'une « valeur » intrinsèque des matières premières que le marché ignore. En d'autres termes, la critique de Georgescu-Roegen prend tout son sens comme critique radicale du capitalisme, sous un angle qu'on peut qualifier d'écologiste :

A suivre Georgescu-Roegen, on pourrait croire que le capitalisme est un mode de production dont quelques théoriciens ont dessiné et imposé les règles, plutôt que le résultat d'une domination sociale.

Les critiques de Georgescu-Roegen sont relativement « académiques » puisque ce sont les analystes qui sont visés, plutôt que les industriels par exemple. La critique de Georgescu-Roegen

adopte un point de vue normatif – « il faudrait » que les choses se passent autrement, et l'économie « devrait » tenir compte du caractère fini des ressources matérielles à la disposition de l'humanité, sans quoi nous allons à la catastrophe. Bien sûr, et surtout au XXe siècle, les « théories » (on les qualifierait peut-être plus justement de légitimations du capitalisme réel) élaborées par les économistes orthodoxes, souvent sanctifiées par l'octroi du pseudo prix Nobel en économie, ont eu un indéniable effet en retour sur le développement de ce capitalisme, puisqu'elles ont inspiré les pratiques d'instances mondiales extrêmement puissantes, comme le FMI ou la Banque Mondiale.

Mais il nous semble que Georgescu-Roegen oublie les rapports de force sociopolitiques qui ont permis l'instauration du capitalisme et son maintien.

C'est évidemment le nom de Marx auquel on pense d'abord quand on évoque les analystes critiques. L'oeuvre de Marx a en effet permis de révéler un rapport social de domination comme fondant les règles qui président aux échanges économiques, y compris (et surtout !) ceux qui concernent la force de travail, alors que ces règles sont plus souvent présentées comme un fait de nature. Mais soyons de bon compte, la critique marxienne est essentiellement extrinsèque au point de vue écologique. On conteste parfois cette extranéité en invoquant le passage suivant, extrait du livre III du Capital, et en l'interprétant comme le témoignage de préoccupations écologiques :

« La production capitaliste a pour conséquence de donner plus d'importance à l'utilisation des résidus de la production et de la consommation. [...] Comme résidus de la consommation, nous avons la gadoue, les chiffons, etc., dont certains sont de la plus haute importance pour l'agriculture, bien que leur utilisation donne lieu, dans la société capitaliste, à un gaspillage considérable. C'est ainsi qu'à Londres, les déjections de 4 ½ millions d'hommes ne sont employées qu'à empester la Tamise et cela moyennant une dépense énorme. »

Nous faisons une autre lecture de ce texte, moins anachronique : c'est d'abord le fait que les déjections des Londoniens ne sont pas valorisées pour augmenter les rendements agricoles qui chagrinent Marx, avant les retombées urbaines désagréables que ce gaspillage entraîne.

Disons-le d'emblée : la mise en garde de Georgescu-Roegen emporte notre adhésion, en tant qu'elle vise les impasses écologiques du capitalisme et du productivisme. Les impacts du développement industriel sur l'environnement sont nombreux et exigent des efforts considérables pour répondre aux urgences croissantes et aux cris d'alarme de plus en plus perçants. Le problème le plus immédiat concerne les combustibles fossiles, en raison de leur impact sur le réchauffement du climat, et pour lesquels les données les plus récentes rapprochent brutalement l'échéance de la crise (voir données sur le « pic de Hubbert » ou pic de production du pétrole qui est imminent). Nous pouvons même souscrire à l'importance de la « joie de vivre », qui selon Georgescu-Roegen devrait être la raison de tout système économique.

Pour autant, la tentative de Georgescu-Roegen d'extrapoler le second principe de la thermodynamique nous semble discutable. En outre, Georgescu-Roegen propose une interprétation assez personnelle de la physique, interprétation qui nourrit son analyse thermodynamique mais qui place en fin de compte la physique en position paradoxale. Peut-être sera-t-on d'avis que la discussion de cette interprétation de la physique est inutile, dans la mesure où nous nous déclarons d'accord avec la conclusion finale de l'exposé de Georgescu-Roegen, celle qui affirme le caractère irréversible de l'épuisement des ressources minérales. Nous ne le croyons pas : la démarche de Georgescu-Roegen flirte malheureusement avec un scientisme mode XIXe siècle, lorsque Georgescu-Roegen tente d'appuyer sa démonstration sur des lois physiques, ni justifiées, ni nécessaires à l'établissement de ses conclusions. Pour la clarté du débat, nous nous livrerons donc à la critique de la version « Georgescu-Roegen » de la thermodynamique.

Pourquoi Georgescu-Roegen ajoute-t-il un « quatrième principe » à la thermodynamique ?

Georgescu-Roegen part du constat que, pour les économistes, ce qui a de la valeur possède une basse entropie. « La matière-énergie absorbée par le processus économique l'est dans un état de basse entropie et elle en sort dans un état de haute entropie. » (42) Les minéraux ou les combustibles fossiles sont de basse entropie, c'est à-dire qu'ils contiennent à la fois une grande organisation moléculaire et une grande valeur économique ; tandis que les déchets et rejets sont de haute entropie, désordonnés et sans grande valeur. La somme de l'entropie « produite » lors de la fabrication d'un artefact doit comprendre aussi bien l'entropie (basse) de l'artefact que l'entropie (élevée) des rejets tout au long de la chaîne de production.

Dès lors, d'après Georgescu-Roegen, la quantité d'entropie faible incluse dans notre environnement décroît continuellement et inévitablement : « nous ne pouvons utiliser qu'une fois une quantité donnée d'entropie faible ». En fait, la hantise de Georgescu-Roegen est l'épuisement des ressources minières, c'est-à-dire les stocks de matière de « basse entropie ».

« Il faut continuellement puiser à certaines sources pour renouveler les artefacts qui sont à présent une partie essentielle de notre mode de vie. »

Afin d'asseoir cette idée sur un socle théorique plus ferme, il énonce une « 4^e loi de la thermodynamique » : « Une formulation intuitive de la quatrième loi est la suivante: Dans tout système clos, la matière utilisable se dégrade irrévocablement en matière non-utilisable. » Ou encore : « Dans un système clos, l'entropie de la matière doit tendre vers un maximum. » Cette formulation est selon Georgescu-Roegen une extension du second principe de la thermodynamique.

Ce second principe théorise une réalité physique bien connue depuis longtemps, bien avant qu'il ne soit formalisé : spontanément, les flux de chaleur se dirigent toujours des corps chauds vers les corps froids. Remarquons que le premier principe de la thermodynamique, celui qui énonce la conservation de l'énergie sous toutes ses formes, n'implique pas le second : on pourrait imaginer que lorsqu'on place un poêlon d'eau froide sur un bec de gaz allumé, l'eau devienne encore plus froide, alors que la flamme se réchaufferait. Le principe de conservation de l'énergie serait satisfait pourvu que les calories cédées par l'eau froide se retrouvent dans la flamme. Mais personne n'a jamais réussi à surgeler des pommes de terre en les mettant dans une casserole d'eau exposée à une flamme.

Au début du XIX^e siècle, Carnot a produit la théorie de cette irréversibilité (les systèmes isolés évoluent spontanément vers l'équilibre thermique, et une fois qu'ils l'ont atteint, ils ne s'en écartent jamais d'eux-mêmes) ; les seules transformations réversibles sont celles qui résultent d'un transfert de chaleur entre deux systèmes ou parties de système qui ne sont pas rigoureusement à la même température, mais la différence qui sépare leurs températures doit tendre vers zéro – ce qui fait des transformations réversibles une vue de l'esprit.

Clausius a ensuite développé les premiers résultats de Carnot en introduisant la notion d'entropie d'un système, dont la variation est définie comme l'entrée de chaleur dans ce système par degré (il s'agit donc du rapport entre l'entrée de chaleur et la température absolue). On comprend donc immédiatement que l'entropie d'un système augmente quand on le réchauffe, c'est-à-dire lorsqu'il reçoit de la chaleur, et qu'elle diminue quand on le refroidit, c'est-à-dire lorsqu'il cède de la chaleur. Le second principe peut se formuler en termes d'entropie : spontanément, l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter, elle ne diminue jamais, et elle se stabilise à une valeur maximale une fois l'équilibre thermique atteint. Sur cette base, et pour les états d'équilibre, les physiciens ont été capables de quantifier la valeur de l'entropie de différents systèmes (pas parmi les plus complexes !), et ces valeurs ont été identifiées par après comme une mesure de l'état d'ordre du système, dans le sens suivant : les paramètres typiques de l'état d'un système sont macroscopiques – pour un gaz, on évoquera le volume qu'il occupe, sa pression, sa température, et cet état macroscopique peut éventuellement correspondre à de nombreux ordonnancements

On cite souvent les deux premiers principes de la thermodynamique, mais nettement moins le 3^e qui est d'ailleurs d'une moindre importance : il concerne la définition de l'entropie au zéro absolu de température. microscopiques différents. L'entropie est alors d'autant plus élevée qu'est grand le nombre de manières différentes d'agencer microscopiquement le système. Ainsi, un état totalement ordonné se caractérise par le fait que les molécules qui le constituent ne peuvent s'agencer que d'une seule manière, et son entropie est nulle.

On retiendra de ce qui précède que les variations d'entropie, vers le haut ou vers le bas, sont associées à des flux d'énergie.

Le 4^e principe de Georgescu-Roegen dit tout autre chose : il parle de l'augmentation spontanée de l'entropie de la matière. Quand Georgescu-Roegen invoque la matière et parle de son entropie, il est toujours question des états d'équilibre de cette matière (Georgescu-Roegen compare ainsi de l'entropie du cuivre pur et celle du minerai dont il est extrait). Georgescu-Roegen se montre d'ailleurs explicitement sceptique face aux travaux impliquant des situations de déséquilibre dynamique (les structures dissipatives) : « Une hypothèse, soutenue par la thermodynamique statistique consiste à dire que l'entropie peut décroître en certains lieux de l'univers, de telle sorte que l'univers vieillisse et rajeunisse à la fois. Mais il n'existe aucune preuve observationnelle d'une telle possibilité. »

On peut facilement imaginer un contre-exemple à la généralisation de Georgescu-Roegen, à condition de s'en tenir aux états d'équilibre, comme il le fait. Soit un verre d'eau, thermiquement isolé de son environnement, contenant un glaçon, l'eau comme la glace étant à la température de 0°C. Du point de vue de l'entropie, les deux composants du système diffèrent évidemment : la glace est plus ordonnée que l'eau, et son entropie d'équilibre est plus basse. Mais notre système est à l'équilibre thermique, puisque sa température est uniforme (0°C), il n'est donc le siège d'aucun flux de chaleur, et les entropies spécifiques de la glace et de l'eau n'ont aucune raison de s'égaliser : l'eau, dont l'entropie est plus élevée, ne cédera aucune entropie à la glace. Si l'on considère la glace comme « matière utilisable », l'idée de Georgescu-Roegen apparaît donc comme hors du domaine de validité de la thermodynamique, et, contrairement au second principe, elle peut être mise en défaut.

La proposition selon laquelle, « dans un système clos, l'entropie de la matière doit tendre vers un maximum », n'est vraie que si la matière est mise en mouvement, qu'il existe du frottement et que par conséquent la matière est « dissipée ». Mais si l'on prend le cas d'un bloc de minerai quelconque auquel on ne touche pas, celui-ci peut demeurer dans son état d'entropie relativement élevée pendant des millions d'années. Si en revanche ce bloc est utilisé à des fins humaines pour en extraire une matière utilisable, le principe de Georgescu-Roegen est alors intuitivement évident, sous réserve de définir l'« entropie de la matière » - ce que Georgescu-Roegen se garde bien de faire.

La thermodynamique combine subtilement flux d'énergie et variation d'entropie, en les pensant comme des phénomènes en compétition. La construction théorique de Georgescu-Roegen isole l'entropie. L'activité industrielle transforme activement la matière, elle en modifie en effet l'entropie, au prix d'une consommation élevée d'énergie – c'est précisément là que se trouve le problème discuté. Dans bien des cas, on pourrait cependant imaginer une transformation industrielle inversée, réalisant un retour vers le composé initial, souvent de plus basse entropie d'équilibre. Mais il ne faut surtout pas se tromper sur un point : loin de récupérer l'énergie investie dans la première transformation, on serait contraint d'en injecter davantage.

Georgescu-Roegen ajoute implicitement que son 4^e principe n'est pas vraiment nécessaire puisque « la Loi de l'Entropie, sous sa forme actuelle, stipule que la matière aussi est soumise à une dissipation irrévocable. » Autrement dit, ce « 4^e principe » ne sert pas à modéliser les phénomènes, mais plutôt à garder à l'esprit une évidence. Il n'a donc pas le même statut que les trois autres

principes. L'évidence que Georgescu-Roegen désire inculquer aux économistes est la nécessité de prendre en compte les ressources naturelles de valeur. Il insiste notamment sur les limites du recyclage, et il a formellement raison de dire que la valorisation des déchets ne peut compenser la dégradation générale. « Pour les économistes, il est très important de reconnaître que la Loi de l'Entropie est la racine de la rareté économique. »

Pourquoi Georgescu-Roegen veut-il formuler l'évidence décrite ci-dessus (l'épuisement des ressources naturelles) comme un pseudoprincipe de physique ? D'un côté, il affirme à plusieurs reprises l'intérêt de la thermodynamique comme une « science de l'ingénieur », qui ne peut se réduire simplement à la formalisation de la physique théorique et qui a des parentés avec l'économie. Il revendique l'anthropomorphisme des définitions qu'il donne (entropie, et énergie libre, par exemple) et le fait qu'elles sont basées sur des intuitions. Mais si l'économie n'est pas une science théorique (comme le pense Georgescu-Roegen), quel est l'intérêt de puiser dans l'arsenal de la physique pour ajouter un principe théorique à l'économie ? En outre, cette intervention se retourne contre son auteur car, contrairement à sa construction théorique, la physique passe les concepts aux filtres des mathématiques et des dispositifs expérimentaux, et les éloigne ainsi des intuitions anthropomorphes a priori.

Un autre point appelle une discussion : NGR affirme que « la loi de l'entropie [le second principe de la thermodynamique] est la seule loi naturelle dont la prédiction n'est pas quantitative » (65). L'entropie relève bien d'une définition quantitative : nous avons rappelé plus haut la définition de la variation d'entropie par Clausius, et si on complète cette définition à l'aide du 3^e principe, dû à Nernst (l'entropie d'un système physique à température nulle est nulle, de sorte que le zéro de l'échelle des variations est fixé), on dispose d'une définition parfaitement quantitative, ce qui permet de ranger « la loi de l'entropie » parmi les lois physiques – ce principe parle d'une grandeur mathématiquement définie. Stricto sensu, le second principe ne définit pas l'entropie – il affirme que l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter, seules les transformations réversibles assurant l'invariance de l'entropie, et il précise comment l'entropie varie.

Georgescu-Roegen repère donc bien une particularité du deuxième principe de la thermodynamique en physique : il s'exprime sous la forme d'une inéquation. Bien que fondamental quant à sa portée, ce second principe sert finalement surtout à poser une limite au rendement d'une transformation – celui qu'on pourrait atteindre en considérant une transformation réversible virtuelle dans le même système physique, mais il est pratiquement beaucoup moins utilisé que le premier, celui qui exprime la conservation de l'énergie. Cet argument est parfois utilisé pour montrer la limite de la mathématisation en physique.

Incursions non maîtrisées en physique

L'ambiguïté de la cible de Georgescu-Roegen est particulièrement perceptible quand il s'attache à donner ses interprétations de la physique. Nous allons successivement analyser sa critique virulente de la mécanique statistique et son interprétation réductrice de la formule d'Einstein $E = mc^2$.

Georgescu-Roegen s'en prend à l'interprétation statistique de la thermodynamique. Voici ce qu'il en dit : « ... le dogme mécaniste a maintenu son emprise (et la maintient encore) sur l'activité scientifique après même que la physique l'a renié. Il en est résulté que la mécanique a bientôt été réintroduite dans la thermodynamique en compagnie de la probabilité. Or, c'est la plus étrange compagnie qui se puisse trouver, car le hasard est l'antithèse même de la nature déterministe des lois de la mécanique. Bien sûr, le nouvel édifice, connu sous le nom de mécanique statistique, ne pouvait à la fois abriter la mécanique et exclure la réversibilité. Aussi la mécanique statistique doit-elle enseigner qu'une casserole d'eau pourrait se mettre à bouillir d'elle-même, idée qu'elle escamote toutefois en arguant qu'un tel miracle n'a jamais été observé en raison de sa probabilité extrêmement faible. Cette attitude a facilité la croyance en la possibilité de convertir de l'énergie

liée en énergie libre⁷, ou, comme P.W. Bridgman le dit spirituellement, de faire de la contrebande d'entropie. »

A notre connaissance, l'interprétation statistique de la thermodynamique en termes moléculaires n'est aujourd'hui plus du tout mise en cause. Prenons par exemple la température, grandeur macroscopique bien connue dont le rôle est central dans les questions que nous discutons. On peut définir la température, notamment en s'appuyant sur le second principe : c'est une grandeur qui détermine l'existence ou l'absence de flux de chaleur entre deux systèmes – si de la chaleur passe du premier au second, c'est que la température du premier est plus élevée que celle du second. On peut aussi dire, dans une version nettement instrumentaliste, que c'est ce qu'on mesure avec un thermomètre.

Les concepts d'énergie libre et d'énergie liée utilisés par Georgescu-Roegen ne sont pas ceux que les physiciens mettent d'habitude derrière ces termes. Pour lui, l'énergie libre est utilisable par l'homme, qui la maîtrise, alors que l'énergie liée ne l'est pas. En thermodynamique classique, ce que Georgescu-Roegen appelle de l'énergie libre est du travail, susceptible d'être recueilli à la sortie d'un moteur, et qui peut servir à actionner des machines-outils, alors que l'énergie liée est de la chaleur, qui ne peut servir aux mêmes fins. Cette distinction entre travail et chaleur est typiquement macroscopique, elle n'a pas de sens à l'échelle microscopique, et un des mérites de la mécanique statistique est précisément de permettre de comprendre la distinction. Une mesure de l'énergie cinétique moyenne (c'est-à-dire la moyenne de l'énergie due au mouvement), moyenne prise sur l'ensemble des molécules formant notre système. S'il nous prenait la fantaisie de suivre une molécule dans son parcours, on verrait son énergie cinétique varier sans cesse, notamment lors de chacune des collisions qu'elle subit avec ses congénères. Cette constatation n'empêche pourtant pas la moyenne de cette grandeur fluctuante de s'avérer parfaitement stable à l'échelle d'un système isolé, et cette assimilation de la température à la moyenne de l'énergie des particules n'a jamais été mise en défaut.

« Un esprit non anthropomorphique ne pourrait pas comprendre le concept d'entropie — ordre qui [...] ne peut être séparé de la compréhension intuitive des buts humains. »

Or l'interprétation statistique a précisément pour ambition d'objectiver le second principe et de donner une définition formelle de l'entropie via le nombre de configurations possibles d'un système donné. En fait, s'opposer à l'interprétation statistique de la thermodynamique revient à contester que la matière est structurée en atomes et molécules, position assez répandue au début du XXe siècle, parmi ceux qu'on appelait les énergétistes (Mach, Ostwald), mais que les travaux de Perrin, acceptés comme une preuve de l'existence des atomes, ont précipitée dans l'oubli.

Remarquons, toujours à ce sujet, que la possibilité de faire de la contrebande d'entropie n'est nullement autorisée par la statistique. Ici aussi, prenons un petit exemple : chacun sait que quand on joue à pile ou face, la pièce peut retomber du côté pile ou du côté face. Il n'y a donc aucune impossibilité matérielle à voir la pièce retomber mille fois du côté pile si on la lance mille fois. Mais il est tout aussi évident que celui qui aurait joué en procédant à mille lancers et qui serait confronté à ce résultat miraculeux (mille fois pile) en conclurait (à juste titre !) que la pièce est truquée.

La manière dont Georgescu-Roegen fige absolument la distinction entre énergie libre et énergie liée, comme si l'énergie liée nous tait totalement inaccessible, relève de la même logique, celle du rejet de la mécanique statistique. Le fameux résultat de Carnot, celui par lequel il précise les limites qui pèsent sur le rendement des machines thermiques (« Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance », 1824) nous apprend que le travail

qu'une machine thermique peut fournir ne peut jamais être égal à la chaleur qui lui est communiquée, mais que dans le meilleur des cas, il ne peut que s'approcher d'une proportion de cette chaleur, celle qu'on obtient en la multipliant par le rapport entre deux températures absolues, d'une part la différence entre la température de la source chaude et celle de la source dite froide, indispensable pour refroidir le système et le ramener à son état initial, et d'autre part la température de la source chaude. Dans une machine ordinaire, si la source chaude (celle de la vapeur chaude, suite au chauffage procuré par la chaudière) est à une température de 200°C, soit à peu près 500 K, et que le refroidissement s'effectue à température ambiante, soit à peu près 300 K, la limite en question représente $(500 - 300)/500 = 0,4$ fois la chaleur injectée. Peut-on en conclure que la chaleur évacuée avec le fluide de refroidissement est complètement perdue pour autant ? Non : puisqu'on produit de l'eau chaude, celle-ci pourrait par exemple être utilisée à des fins de chauffage, pour des habitations, des installations collectives, etc. Cette énergie que Georgescu-Roegen appelle liée reste donc utilisable par l'homme.

Par ailleurs, Georgescu-Roegen sous-estime profondément la portée de la fameuse formule d'Einstein $E = mc^2$. Voici, en guise d'illustration, ce qu'il écrit : « Il existe une asymétrie même entre la masse et l'énergie, car s'il n'y avait aucune différence entre ces deux concepts, il n'y aurait aucune raison pour les distinguer dans le vocabulaire scientifique. Avec un choix convenable d'unités, l'équivalence d'Einstein pourrait s'écrire $E = m$. Pourtant, il serait absurde d'en conclure l'identité de l'énergie et de la masse. »

Paradoxalement, Georgescu-Roegen touche du doigt la réponse à son objection : ce qu'il dénonce comme absurde est précisément ce que font quotidiennement les physiciens théoriciens, lorsqu'ils formulent leurs théories en adoptant un système d'unités dans lequel $c = 1$. En physique des hautes énergies (ou des particules élémentaires), la masse des particules est donnée en unités d'énergie – dans le jargon des physiciens, la masse d'un proton, c'est 941 MeV, et celle de l'électron 0,51 MeV (1 MeV, c'est un million d'électronvolt, et un électronvolt est l'énergie conférée à une charge électrique élémentaire, celle négative de l'électron ou celle positive du proton, une fois qu'elle a été soumise à une différence de potentiel de 1 Volt).

La discussion de l'équivalence masse-énergie est abordée par Georgescu-Roegen sous un angle inattendu : il s'y engage pour écarter l'idée qu'on pourrait partir de l'énergie pour reconstituer les stocks de combustibles fossiles épuisés. Inattendu, dans la mesure où le noeud de la discussion concerne précisément notre approvisionnement en énergie : si nous disposions d'énergie en quantité suffisante pour en refaire de la matière (et Georgescu-Roegen a parfaitement raison de ne pas prendre cette idée au sérieux !), notre problème d'approvisionnement en énergie serait résolu.

Par contre, lorsqu'on envisage la transformation en sens inverse, la formule n'a rien de trompeur. Ainsi, on pourrait estimer la perte de masse provoquée par la combustion d'une bûche de bois – mais elle ne serait pas mesurable, tellement elle est faible. Ces incursions non maîtrisées de Georgescu-Roegen en physique témoignent à notre sens d'une fascination mal placée pour la théorie physique, ce qui lui procure une attitude teintée de scientisme. Il octroie en effet beaucoup de pouvoir aux lois de la physique, et en particulier à l'entropie.

« En réalité, c'est la Loi de l'Entropie qui explique pourquoi une machine (et même un organisme biologique) finit par s'user ». La pollution est également un oubli de l'entropie : « nul ne paraît voir que la cause de [la pollution] réside dans le fait que nous avons négligé de reconnaître la nature entropique du processus économique. »

Georgescu-Roegen estime même que c'est l'« indétermination entropique » qui permet à la vie d'avoir lieu. « La loi de l'entropie est la seule loi dont la prédiction n'est pas quantitative. Elle ne spécifie pas de combien sera l'accroissement à tel moment à venir ou quelle configuration entropique particulière surviendra. C'est pourquoi il existe dans le monde réel une indétermination

entropique qui permet non seulement à la vie de se développer selon une infinité de formes, mais encore à la plupart des activités d'un organisme vivant de jouir d'une certaine marge de liberté. »

L'affirmation que la loi de l'entropie ne donne pas d'indication quantitative n'est vraie que comme une généralité, tant que les propriétés spécifiques du système physique étudié ne sont pas précisées. Mais lorsque les interactions qui gouvernent l'évolution d'un système sont connues, il est parfaitement possible de calculer la variation d'entropie induite par les réactions dont ce système est le siège. Par ailleurs, ce que NGR appelle l'indétermination entropique correspond à un accroissement d'entropie, alors que l'émergence de la vie, associée à l'apparition de structures éminemment complexes, correspond à une diminution d'entropie... Ici aussi, nous pensons que la répugnance de NGR à l'égard de l'interprétation statistique de la thermodynamique le pousse à des formulations fantaisistes. A suivre NGR, ce serait le caractère incomplet et partiel des lois physiques qui les rendrait compatibles avec l'existence de la vie.

Ce « saut dans l'inconnu » n'est pas nécessaire si l'on met les statistiques en jeu : il n'est pas absurde de voir se réaliser des événements hautement improbables, pour autant que l'on s'entende sur ce qu'on appelle improbable.

Dire qu'un événement est improbable, cela signifie que sa probabilité de réalisation par unité de temps est faible. Mais si on laisse un temps très long au système, la probabilité tout court qu'il advienne (cette fois, plus par unité de temps) cesse à la longue d'être négligeable. Et si l'événement débouche sur l'apparition d'une structure relativement stable, la fluctuation au cours de laquelle cette structure s'est matérialisée peut s'amplifier, pour changer qualitativement le système considéré – dialectique du hasard et de la nécessité, repérée de longue date. Une transformation de ce type ne nous fait pas sortir de la physique: l'événement visé est peu probable, mais certainement pas impossible. Dans ce contexte, on n'établit aucune différence de nature entre matière vivante et matière inerte.

Une philosophie de l'histoire pessimiste

La hantise de la décroissance des ressources minérales nourrit chez Georgescu-Roegen une approche pessimiste de l'histoire. « Le destin ultime de l'univers n'est pas la « Mort Thermique » (comme on l'avait d'abord cru) mais un état plus désespérant: le Chaos. » La mort thermique de l'univers était la perspective offerte par les grands récits qui incorporaient le second principe à la fin du XIXe siècle : l'univers mourrait par une uniformisation de la température. Cette perspective serait remplacée par la dégradation irréversible de la matière. Mais si l'univers va vers le chaos, c'est qu'il vient d'un ordre supérieur — ce qui pose par ailleurs la question de l'origine de toute création d'ordre.

Comme nous l'avons vu, Georgescu-Roegen récuse l'idée que l'entropie peut diminuer localement dans un système fermé, soit un système qui n'échange pas de matière avec son environnement, alors que l'échange d'énergie ne lui est pas interdit. Même les organismes vivants ne semblent pas échapper à cette affirmation. « Tout organisme vivant s'efforce seulement de maintenir constante sa propre entropie. Et dans la mesure où il y parvient il le fait en puisant dans son environnement de la basse entropie afin de compenser l'augmentation de l'entropie à laquelle son organisme est sujet comme tout autre structure matérielle. Mais l'entropie du système total, constitué par l'organisme et son environnement ne peut que croître. En réalité, l'entropie d'un système croît plus vite s'il y a de la vie que s'il n'y en a pas. » Le vivant s'alimente de basse entropie ; il dégrade la matière en transformant les matériaux de basse entropie en déchets de haute entropie. Les plantes ne font que ralentir la marche de l'entropie.

Pourtant un organisme vivant n'est-il pas le plus parfait exemple de la création locale d'ordre à partir de matières de haute entropie ? Les phénomènes du vivant — et particulièrement les plantes

qui utilisent le rayonnement solaire — ne sont-ils pas des « mises en ordre » de la matière ? On retrouve ici le refus de NGR face à l'idée des structures dissipatives – structures qui transforment de l'énergie en entropie, et qui se définissent comme des systèmes fermés. L'entropie de certains systèmes fermés peut donc diminuer pendant la croissance des organismes vivants. Ainsi une plante dans une serre (en considérant donc le système « plante + terre + air »), capte de l'énergie solaire sans échange de matière, mais voit son « entropie de matière » diminuer. Mieux, l'histoire de la vie nous montre combien la création de nouveauté est associée à tout ce qui va à l'encontre de l'augmentation de l'entropie.

L'histoire que nous propose Georgescu-Roegen est essentiellement une eschatologie, une histoire de la fin du monde et du destin de l'humanité. Cette histoire ne comporte pas d'évaluation des durées :

Georgescu-Roegen voit la fin de l'humanité, plutôt que la construction pas à pas d'une histoire. Ce faisant, il lève au passage un tabou : pourquoi l'espèce humaine ne serait-elle pas amenée à disparaître un jour, à l'instar de bien d'autres espèces animales ? La possibilité ne peut être écartée sans autre forme de procès, mais la remarque perd beaucoup de son intérêt dès lors qu'aucun pronostic d'échéance ne l'accompagne – quel est l'horizon temporel de cette éventuelle disparition, et quels sont les événements qui pourraient rendre la fin qu'il imagine moins inéluctable que son récit ?

L'irruption de la nouveauté ne fait pas partie de ce récit. Ce récit rend incompréhensible l'apparition de l'humain — qui est pourtant la source du problème qu'il soulève. Comment perpétuer l'espèce humaine si l'univers va vers le chaos ?

En effet, le « coeur du problème » est la « quantité de vie totale » qu'il reste à l'humanité, ou autrement dit le nombre d'années que l'humanité peut encore vivre et prospérer (88). La préservation de l'espèce humaine est donc le problème fondamental, la valeur absolue. Or, toujours selon Georgescu-Roegen, l'humanité vit sur des stocks non renouvelables, au lieu de ne puiser que dans le flux d'énergie solaire. L'accessibilité de la matière-énergie utilisable est forcément décroissante. Donc pour maintenir le niveau de vie, il faut soit travailler plus (ce qui a des limites), soit innover toujours plus (et cela demande toujours plus de capital). « Nous ne pouvons compter que sur des ressources minérales à la fois irremplaçables et non renouvelables, dont plusieurs ont été épuisées successivement dans différents pays. À présent d'importants minéraux le plomb, l'étain, le zinc, le mercure, les métaux précieux - sont rares dans le monde entier »

Il est important de noter que la hantise de Georgescu-Roegen est construite théoriquement : elle ne s'appuie pas sur les données des stocks de minéraux restant, mais sur son interprétation de la « loi de l'entropie » : « nous ne pouvons utiliser une quantité donnée de basse entropie qu'une seule fois » .

Georgescu-Roegen est en faveur de ce qu'on appelle en économie la « soutenabilité forte » : le capital naturel est absolu et on ne peut y substituer d'autres formes de capital (technologique notamment). Il s'affirme contre l'idée que « nous trouverons toujours bien quelque chose ». L'urgence de la situation implique selon lui que nous ne pouvons pas attendre que les technologies résolvent nos problèmes. Il explicite d'ailleurs son scepticisme en se référant aux transformations socio-techniques du passé : l'humanité a bénéficié de deux conquêtes prométhéennes, l'une inaugurant l'ère du feu et l'usage du bois, l'autre venue du charbon et de l'invention de la machine à vapeur. Un nouveau Prométhée viendra-t-il résoudre la présente crise de l'énergie de la même manière que Prométhée II a résolu la crise de l'âge du bois, se demande NGR ?

De manière surprenante, le seul projet prométhéen évoqué par NGR est le surrégénérateur, à cause de sa capacité à produire de l'énergie à partir des déchets nucléaires produits par les centrales nucléaires standard. Mais les difficultés inhérentes au fonctionnement du surrégénérateur

(notamment le fait qu'il est refroidi au sodium, une substance hautement inflammable) ont amené l'abandon de fait des projets de développement de cette technologie. Par contre, NGR ne mentionne pas la fusion nucléaire, alors que son aboutissement rentrerait sans doute possible dans la catégorie des réalisations que NGR qualifie de prométhéennes... Il se contente de contester fortement la possibilité physique de la fusion thermonucléaire, mais il énonce malgré tout :

« En attendant que l'utilisation directe de l'énergie solaire soit entrée dans les moeurs ou bien que l'on soit parvenu à contrôler la fusion thermonucléaire [...] » L'ambiguïté de Georgescu-Roegen par rapport aux technologies est aussi manifeste quand il aborde l'utilisation possible ou non du « flux solaire ». D'un côté il affirme la nécessité de fonder l'économie sur l'énergie solaire. De l'autre, il nie la possibilité de faire massivement appel à l'énergie solaire au nom de la dispersion de sa répartition sur toute la surface terrestre. Les technologies sont donc tantôt décriées, tantôt appelées au secours. Nous pensons qu'un investissement et une réorientation profonde dans la recherche et développement pourrait contribuer à affronter le problème de la production d'énergie.

Le cri de protestation de Georgescu-Roegen emporte notre adhésion, écrivions-nous au début de cet article. Ce n'est pas parce que nous ne croyons pas au 4^e principe de la thermodynamique selon Georgescu-Roegen que les combustibles fossiles pourraient voir leur disparition rapide contrecarrée, par Dieu sait quel miracle ; cette idée n'a pas l'ombre d'une vraisemblance.

Oui, nous sommes probablement très proche du fameux « peak oil », et l'ère du tout au pétrole est révolue. La reconstitution de stocks souterrains d'hydrocarbures relève de la géologie, dont l'évolution est scandée par un rythme perceptible à l'échelle de millions d'années. Il reste, au-delà de ces remarques critiques, que les considérations mettant en jeu l'entropie et le second principe de la thermodynamique sont loin d'être dépourvues d'intérêt pour autant. Notamment pour ce qui demeure au coeur de la thermodynamique, à savoir les effets thermiques, parmi lesquels figurent en bonne place l'effet de serre et le réchauffement de la planète. Même si l'on adopte une attitude résolument optimiste à propos de la fusion nucléaire, qui constitue un enjeu majeur (parce que sa maîtrise nous mettrait pour un bon bout de temps à l'abri des problèmes d'approvisionnement), on doit être conscient que l'accroissement programmé de la production d'électricité créera d'inextricables problèmes de réchauffement.

Si l'on se veut optimiste, on caractérisera les décennies qui sont immédiatement à venir comme une période de transition nécessaire pour faire le joint en attendant la fusion (et en espérant que cette attente ne soit pas celle du Messie). On peut penser pour cela aux réserves de charbon, moins menacées d'épuisement que celles de pétrole. Mais la combustion de grandes quantités de charbon produit du CO₂ en quantités elles-mêmes énormes, et, sans autre précaution, un renforcement tragique de l'effet de serre. Sans autre précaution : on parle à ce sujet d'une captation du CO₂ produit dans les centrales thermiques, qui fonctionneraient alors en circuit fermé. Science fiction ? Sans doute pas, mais là aussi, il reste pas mal de pain sur la planche pour les chercheurs.

Revenons sur l'idée que Georgescu-Roegen se trompe de cible : alors qu'il s'adresse aux économistes, c'est fondamentalement le capitalisme et le productivisme qu'il vise. Reste cependant qu'on peut s'interroger, avec lui, sur la nécessité de fonder une autre science économique, qui n'exclurait pas de ses préoccupations la prise en compte de l'épuisement des ressources naturelles. Si l'on se tourne vers les définitions officielles de l'économie, elles ne sont pas incompatibles avec cette prise en compte. Littre nous dit par exemple que l'économie politique, c'est la science qui traite de la formation, de la distribution et de la consommation des richesses, et que l'économie sociale traite des conditions de l'existence, du travail, des droits civils et politiques des différentes classes de la société. Formation des richesses, cela ressemble à une entrée possible... D'autres définitions, plus récentes, parlent de production en lieu et place de formation. Mais les définitions

s'arrêtent généralement là, tout comme les modèles théoriques de l'économie : on ne parle pas de la disponibilité des ressources naturelles.

Georgescu-Roegen a donc raison d'insister sur ce point. Cette absence peut sans doute s'expliquer parce qu'aucune règle économique (en premier lieu, les règles qui régissent le commerce mondial) n'intègre cette donnée. Pourrait-il en être autrement ? Oui, mais cela passe par l'adoption et la mise en oeuvre d'un projet politique planétaire, centré sur d'autres priorités que celle des marchés, et appuyé sur un pouvoir démocratique, par opposition au pouvoir des détenteurs de capitaux. On quitte ainsi radicalement la sphère académique, en s'engageant dans cette voie, même si les mécanismes de fonctionnement d'un système soucieux de l'avenir de la planète et socialement juste méritent des études ... scientifiques sérieuses. Mais nous ne pensons pas que celles-ci puissent se penser uniquement comme une extension de la thermodynamique.

Pour l'instant, environ deux tiers des fonds européens pour l'énergie sont consacrés à la recherche nucléaire, laissant peu de ressources aux recherches sur les énergies renouvelables (Renouvelle 17, lettre de l'APERe, 2006). Les pronostics quant à l'aboutissement des programmes de recherche qui lui sont consacrés sont inquiétants : plus le temps passe, et plus le délai annoncé s'allonge. En 1975, on parlait de la fin du XXe siècle, alors qu'on nous dit aujourd'hui qu'un demi-siècle sera bien nécessaire... En outre, une économie basée sur l'énergie thermonucléaire implique une organisation sociale très centralisée, voire technocratique