



HAL
open science

Entropie et économie, dans le tournant théorique de Nicholas Georgescu-Roegen

Quentin Couix

► **To cite this version:**

Quentin Couix. Entropie et économie, dans le tournant théorique de Nicholas Georgescu-Roegen. Economies et finances. 2015. dumas-01404779

HAL Id: dumas-01404779

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01404779>

Submitted on 29 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris I Panthéon-Sorbonne

UFR 02 Sciences économiques – Mention THEME
Master 2 Recherche Économie et Sciences humaines
2014-2015

Entropie et économie, dans le tournant théorique
de Nicholas Georgescu-Roegen

Présenté et soutenu par Quentin Couix

Sous la direction de Michel Armatte

L'université Paris 1 Panthéon Sorbonne n'entend donner aucune approbation ni désapprobation aux opinions émises dans ce mémoire ; elles doivent être considérées comme propre à leur auteur.

Sommaire

Introduction.....	4
Chapitre I La loi de l'entropie : une rupture épistémologique dans la physique du XIXe siècle	16
Chapitre II La loi de l'entropie et la science économique.....	48
Conclusion.....	76
Bibliographie.....	78
Table des matières.....	81

Introduction

Sujet du présent mémoire et état de la question

Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) suggère pour la première fois l'existence de relations intimes entre la loi de l'entropie et le processus économique dans la longue introduction qu'il rédige pour un recueil d'articles, publié sous le titre *Analytical Economics* en 1966. Cet ouvrage est exemplaire du tournant théorique qu'amorce à cette époque l'économiste américain d'origine roumaine. En réunissant ses articles les plus connus depuis les années 30, ce recueil rappelle son importance dans la constitution de la théorie économique néoclassique. Ayant d'abord effectué un doctorat en mathématiques sur les composantes cycliques des séries statistiques, Georgescu-Roegen n'est venu à l'analyse économique qu'à la suite de sa rencontre avec Joseph Schumpeter à Harvard dans les années 30. Il s'intègre alors rapidement aux cercles des économistes de l'époque et fournit des contributions importantes à la théorie du consommateur ou à la théorie de la production (Beard et Lozada 1999). La préface de Paul Samuelson à l'ouvrage *Analytical Economics* révèle la relative reconnaissance académique dont Georgescu-Roegen bénéficie encore dans les années 60 (Georgescu-Roegen 1966).

Cependant, la plupart de ses contributions font preuve d'une insatisfaction à l'égard des fondements de l'analyse économique. Elles laissent présager une rupture prochaine vis-à-vis de la théorie néoclassique, rupture qui est réellement amorcée avec l'introduction de *Analytical Economics*. Dans cette introduction, il pose les grandes lignes de sa réflexion sur les relations entre la loi de l'entropie et le processus économique. Celle-ci sera pleinement développée en 1971 dans *The Entropy Law and the Economic Process*. Il synthétise alors les problèmes qu'il perçoit dans la science économique néoclassique, tout en proposant les linéaments d'un renouvellement de la pensée économique. Comme le suggère le titre, la loi de l'entropie occupe une place centrale tant dans la critique de l'économie standard, que dans la nouvelle perspective qu'il propose. Dans le présent mémoire, nous souhaitons examiner les traits singuliers de ce rôle de pivot qu'occupe la loi de l'entropie dans le tournant théorique de Georgescu-Roegen.

L'intérêt pour ce sujet est motivé principalement par le sentiment d'un manque d'attention

aux enjeux écologiques dans la pensée économique. De ce point de vue, les travaux de Georgescu-Roegen présentent l'avantage d'interroger la possibilité d'une telle attention en considérant les fondements épistémologiques des théories. Sa réflexion sur la loi de l'entropie est ainsi l'occasion de se questionner sur les présupposés de certaines représentations scientifiques du monde. En analysant les traits qui opposent la mécanique et la thermodynamique il fait émerger de nouvelles taxinomies épistémiques. Tandis que l'opposition entre le holisme et l'individualisme méthodologique est une préoccupation ancienne de la philosophie économique, celle entre le réversible et l'irréversible apparaît plus originale.

L'importation de ces nouvelles taxinomies depuis les sciences naturelles vers les sciences sociales est révélateur du lien étroit que Georgescu-Roegen envisage entre ces deux domaines. Il renouvelle ainsi les débats récurrents sur le statut scientifique de l'économie, et des sciences sociales en général. La connexion de l'économie avec des sciences naturelles n'est pas une faute en soi. Néanmoins, le choix des référents scientifiques doit être motivé par la similitude des phénomènes considérés. Dès lors que l'activité économique repose sur une transformation qualitative et irréversible des ressources naturelles, la thermodynamique doit se substituer à la mécanique comme architecture fondamentale de la pensée économique. Cette substitution contribue à ancrer la représentation des phénomènes économiques dans le substrat matériel sans lequel ils ne pourraient avoir lieu.

Cette approche cherche donc à inscrire la préoccupation écologique dans les structures les plus élémentaires de la réflexion économique. Ce point de vue nous semble pertinent, tout au moins dans son intention. L'impossibilité d'une saine prise en compte des contraintes environnementales qui s'exercent sur le processus économique semble reposer dans les hypothèses les plus fondamentales de la pensée économique contemporaine. Une analyse récente des travaux d'économistes sur le changement climatique conforte ce constat (Pottier 2014). Il se pourrait donc que l'émergence des enjeux écologiques globaux, concomitante du développement des nations industrielles avancées, impose de revoir les fondements de l'analyse économique. Georgescu-Roegen ayant tenté une telle révision, son travail nous semble digne d'intérêt.

Le basculement théorique, que Georgescu-Roegen articule autour de la loi de l'entropie, a déjà attiré l'attention d'un certain nombre d'auteurs. On trouve ainsi des synthèses très générales sur l'œuvre de Georgescu-Roegen (Beard et Lozada 1999 ; Missemer et Georgescu-

Roegen 2013). Celles-ci permettent de se familiariser tant avec les premiers travaux de Georgescu-Roegen, qu'avec ceux postérieurs à sa rupture avec l'économie standard. Ces derniers forment un tout relativement cohérent que Georgescu-Roegen nomme, à partir de 1975, la bioéconomie. Son principe fondateur conçoit les activités économiques des hommes dans la continuité des activités biologiques. La thermodynamique et la biologie sont alors des référents scientifiques aptes à rendre compte de la vraie nature des phénomènes économiques. Cependant, les aspects thermodynamiques restent les plus développés. Malgré leur intérêt, ces synthèses tentent de rendre compte de manière globale des travaux de Georgescu-Roegen. Dès lors, soit elles ne prennent pas le temps d'aller dans le détail de sa conception de la loi de l'entropie (Missemer et Georgescu-Roegen 2013), soit elles le font sans proposer un regard historique sur celle-ci (Beard et Lozada 1999). Or, pour comprendre le tournant théorique de Georgescu-Roegen, il nous semble nécessaire de reconstituer le cheminement historique qui voit la thermodynamique rompre avec l'épistémologie mécaniste, car lui-même l'envisage dans cette perspective historique.

Il s'agit donc d'interroger les intuitions épistémologiques de Georgescu-Roegen quant à la construction historique de la thermodynamique comme un paradigme irréductible à la mécanique. Les auteurs qui ont été inspirés par Georgescu-Roegen ont en général concentré leur attention sur la figure de Sadi Carnot, considéré comme le père de la thermodynamique (Grinevald 1976 ; Vivien 1991). Ces travaux ont l'avantage de faire explicitement le lien avec les préoccupations de Georgescu-Roegen. Mais la thermodynamique a beaucoup évolué après le travail fondateur de Carnot et il est donc nécessaire de parcourir son histoire au-delà de cette époque. Par ailleurs, si l'histoire de la rupture épistémologique que provoque la thermodynamique est si importante pour Georgescu-Roegen, c'est parce qu'il considère que la théorie néoclassique est quant à elle un analogue de la mécanique rationnelle. Là encore, son intuition a donné lieu à un travail plus exhaustif sur les rapports entre la mécanique et la théorie néoclassique (Mirowski 2001b). S'il est utile pour préciser la nature de ces rapports, il ne cherche pas à évaluer la pertinence des critiques que Georgescu-Roegen adresse à l'économie standard à partir de cette analyse.

Les travaux de Georgescu-Roegen ont par ailleurs été discutés de manière abondante au sein de l'économie écologique. Bien que ce courant reprenne à son compte certaines des critiques qu'il adressait à la théorie néoclassique, les discussions ont plutôt porté sur ses contributions relatives aux enjeux environnementaux. Une des controverses a porté sur la pertinence de la loi de l'entropie en ce qui concerne l'épuisement des ressources énergétiques

(Daly 1992 ; Khalil 1990, 1991 ; Lozada 1991 ; Young 1991). D'autres travaux se sont consacrés à la question de la dissipation de la matière (Ayres 1999 ; Cleveland et Ruth 1997 ; Mayumi 2001). Ils permettent de mettre en évidence les forces et les faiblesses des différentes contributions de Georgescu-Roegen.

Enfin, des auteurs ont adopté une perspective de sociologie des sciences quant au travail de Georgescu-Roegen. Certains se sont penchés sur ses rapports avec le courant environnementaliste (Levallois 2010 ; Vieille Blanchard 2011). Ils révèlent notamment les liens qu'il a temporairement tissés avec les membres du Club de Rome. Ces événements mettent en lumière le contexte favorable dans lequel Georgescu-Roegen écrivait, mais aussi les obstacles qui l'ont empêché de le mettre à profit pour la promotion de sa propre perspective. D'autres auteurs s'intéressent à la réception mitigée de ses travaux parmi les économistes (Iglesias 2009 ; Ould Boye 2014). Ils mettent en évidence son rôle pionnier dans la constitution d'une hétérodoxie écologiste au sein de l'économie, tout en montrant l'indifférence de la grande majorité des économistes. Si cette indifférence peut tenir à l'originalité de son propos, les caractéristiques sociales de Georgescu-Roegen semblent aussi avoir été défavorables à une réception plus large. Sa personnalité difficile a contribué à l'écarter tant de ceux qui choisissaient de continuer dans la voie de l'économie standard, que ceux qui se sont revendiqués de son héritage. Pour notre part, nous laisserons de côté ces aspects sociologiques pour nous concentrer sur la cohérence logique des propositions.

Méthode adoptée pour traiter la question

Plus précisément, on s'interroge ici sur la manière dont la loi de l'entropie est mobilisée par Georgescu-Roegen comme point d'appui épistémologique pour opérer le basculement qui le mène de la théorie néoclassique à la bioéconomie. Une telle question est bien évidemment suggérée par le titre et le contenu de son *magnum opus*, *The Entropy Law and the Economic Process*. Néanmoins, il faut déborder du cadre de ce seul ouvrage pour saisir pleinement les tenants et les aboutissants de ce basculement. D'une part, l'œuvre de Georgescu-Roegen suggère une lecture très spécifique de la loi de l'entropie et de ses attributs épistémologiques. Cette lecture invite à découvrir la thermodynamique à la lueur des thèses qu'elle promeut, afin d'en évaluer la portée réelle. D'autre part, la loi de l'entropie devient l'un des principes clefs du renouveau de la pensée économique proposé par Georgescu-Roegen. Il continue de développer sa critique de la théorie néoclassique et les fondements de son nouveau paradigme

tout au long des années 70 et 80. Malgré des modifications sensibles dans sa conception de la loi de l'entropie durant cette période, une impression de continuité transparait. Celle-ci appelle une analyse étendue dans le temps.

Pour comprendre le rôle de l'entropie dans la réorientation de la science économique qu'envisage Georgescu-Roegen, il est indispensable de se familiariser avec cette loi, et le cadre théorique de la thermodynamique, dans lequel elle prend son sens. Cette étude peut sembler très éloignée des préoccupations traditionnelles de la philosophie économique. Mais sans elle, on n'est pas en mesure d'apprécier à leur juste valeur les thèses de Georgescu-Roegen. Sur le plan du formalisme associé à ce cadre théorique, on restera succinct. Ceci se justifie par le caractère relativement élémentaire des outils mathématiques en jeu, qui sont de plus connus des économistes, et par la possibilité de dégager le sens des concepts sans s'aventurer trop loin dans des formules complexes. Il faudra néanmoins présenter quelques uns des outils conceptuels clefs ainsi que les formules élémentaires de la théorie en question. Cela permet de prendre conscience du processus d'abstraction, qui mène du phénomène de conduction de la chaleur à une théorie générale de l'évolution des systèmes matériels. Or, la question du rapport entre la théorie et le phénomène qui la suggère, est un élément important pour saisir la position de Georgescu-Roegen vis-à-vis de la loi de l'entropie.

On adopte aussi une approche historique de ce processus, qui part d'interrogations concrètes sur le rendement des machines thermiques pour aboutir à une conception nouvelle de l'évolution de l'univers. Cela permet d'examiner plus en détail la signification de la théorie. Un exposé issu d'un manuel contemporain de thermodynamique tendrait à gommer les difficultés théoriques et philosophiques qui parsèment le chemin allant des travaux d'un obscur ingénieur français à un corpus théorique bien établi. Il s'agit avant tout de proposer une histoire intellectuelle, qui entend reformuler les représentations du monde concurrentes. Le contexte social, politique et économique, et les attributs sociaux des protagonistes, ne sont mentionnés que dans la mesure où ils sont significatifs du point de vue intellectuel. Cette histoire ranime ainsi une querelle épistémologique qui a profondément bouleversé la physique du XIX^e siècle. Celle-ci oppose les tenants de la conception mécaniste du monde à ceux qui défendent le caractère *sui generis* des phénomènes de la chaleur. C'est de cette virulente controverse qu'émerge la première utilisation des probabilités en physique. Celles-ci modifient le regard porté sur le caractère nécessaire de l'évolution thermodynamique du monde, et propose une issue pour le moins ambiguë à la controverse. En rappelant cette ambiguïté historique on se donne du même coup la possibilité de comprendre comment les

intuitions épistémologiques de Georgescu-Roegen prennent leur source dans ce faux compromis de la mécanique et de la thermodynamique.

Dès lors, l'approche historique entend aussi rendre plus sensibles les attributs épistémologiques de la thermodynamique, et ce qui les oppose à la conception mécaniste du monde. On interroge l'histoire de la loi de l'entropie et de la thermodynamique à la lueur des questions qui naissent lorsqu'on lit Georgescu-Roegen. Quel sens donné à l'affirmation que la thermodynamique est une physique de la valeur économique ? Que signifie le caractère anthropomorphique de l'entropie, et en quoi est-il unique dans la physique ? D'où provient l'indétermination inhérente à la prédiction des phénomènes thermodynamiques ? Toutes ces questions constituent une grille de lecture de l'histoire de la thermodynamique qui nous est proposée à posteriori par Georgescu-Roegen. Il répond lui-même à certaines d'entre elles de manière convaincante, par exemple lorsqu'il examine l'opposition entre la mécanique et la thermodynamique à l'égard du critère de réversibilité des phénomènes. Mais certaines apparaissent avant tout comme des intuitions épistémologiques, que l'auteur ne prend pas le temps d'examiner de manière systématique. Sans prétendre parvenir à un examen systématique, on tente de donner une épaisseur à ces affirmations en les reliant aux évolutions historiques de la thermodynamique.

On reconstitue ainsi la controverse qui nous occupe à la frontière entre l'histoire de la thermodynamique, telle qu'elle se présente dans les ouvrages des historiens des sciences, et la lecture particulière qu'en propose Georgescu-Roegen. Ces récits sont dans une large mesure complémentaires. Leur réunion aboutit à une représentation plus nette du système d'opposition épistémique opposant la thermodynamique et la mécanique. Il permet du même coup de rendre plus intelligible le positionnement de Georgescu-Roegen sur les différentes interprétations de la thermodynamique. Ainsi, on retrouve dans son refus de la mécanique statistique les marques d'une conception phénoméniste de la science défendue avant lui par des physiciens tels que Ernst Mach ou Pierre Duhem. Cette lecture du positionnement de Georgescu-Roegen se révèle pertinente pour interpréter ses travaux ultérieurs.

Après avoir approfondi les fondements de la loi de l'entropie et ses caractéristiques épistémologiques, on abandonne le point de vue historique. On se consacre alors à l'analyse des propositions de Georgescu-Roegen associées à son basculement de la théorie néoclassique vers la bioéconomie. Celui-ci commence réellement en 1966 avec l'introduction à *Analytical Economics*, même si des éléments de divergence au cadre standard sont présents dès les

premiers travaux de Georgescu-Roegen. Pour cette raison, on concentre notre attention sur les travaux des années 70 et 80. Des retours en arrière sont néanmoins possibles lorsqu'ils permettent d'éclairer certaines affirmations de Georgescu-Roegen.

Dans cette période, ses arguments présentent une relative continuité. On identifie assez clairement une succession de sujets de prédilection. Au début des années 70, la critique de l'épistémologie mécaniste et la conception entropique du processus économique dominant. Après 1975, la promotion de la bioéconomie comme cadre épistémologique du renouveau de la science économique devient prépondérant, et il se consacre aussi à la critique de la politique de l'état stable défendue entre autre par les membres du Club de Rome et son ancien élève Herman Daly. La controverse sur l'état stable le pousse à défendre l'idée d'une dissipation irréversible de la matière, qui prend peu à peu la forme d'une 4^{ème} loi de la thermodynamique et l'amène à la critique du « dogme énergétiste ». Ces thèmes, ainsi que l'analyse globale des technologies sur la base de son modèle flux-fonds, occupent la plupart de ses écrits à la fin des années 70 et au début des années 80.

Chacun de ces sujets est développé dans plusieurs publications. Un des enjeux de notre analyse consiste donc à proposer une synthèse des arguments avancés dans chaque domaine. On doit pouvoir identifier les éléments de continuité dans cet argumentaire, tout en précisant les contradictions qui ne manquent pas d'apparaître lorsque celui-ci est développé sur une longue période. Une fois ce travail de structuration réalisé on peut se consacrer à une analyse critique des propositions de Georgescu-Roegen. Cette analyse examine d'une part la cohérence du propos de Georgescu-Roegen, d'un point de vue strictement logique, mais aussi à l'égard de son positionnement singulier sur la thermodynamique. D'autre part, elle questionne la pertinence de ses propositions au vu des objectifs poursuivis, qu'il s'agisse de la mise en évidence des limites de la théorie néoclassique ou d'éclairer les conditions de reproduction du système économique dans le long terme.

Cependant, pour mener cette analyse, il convient de ne pas se restreindre aux seuls travaux de Georgescu-Roegen. En amont, il faut considérer les références sur lesquels ceux-ci s'appuient. Cela est d'autant plus important que, comme il l'avoue lui-même, Georgescu-Roegen n'est pas un spécialiste de la plupart des thèmes qu'il aborde (1981 : 4). Lorsqu'il traite de thermodynamique ou de biologie, il se fonde sur la lecture de ce qu'il perçoit comme les références dans ce domaine. Ceci invite dès lors à interroger le regard qu'il porte sur ces références. On précise ce qu'il en retient et ce qu'il en rejette, mais aussi comment il l'intègre à son propre exposé. Dans ce travail transdisciplinaire, on met donc en évidence les continuités

et les interprétations nouvelles. Le travail de clarification de la position de Georgescu-Roegen vis-à-vis de la loi de l'entropie est alors mobilisé pour comprendre ces interprétations, mais aussi les problèmes que celles-ci peuvent poser.

Par ailleurs, il est nécessaire d'appuyer notre analyse sur les travaux qui ont prolongé les intuitions de Georgescu-Roegen. C'est, par exemple, le cas de ceux de Philip Mirowski sur les rapports entre la théorie néoclassique et la mécanique rationnelle. En mobilisant ceux-ci, on peut préciser le sens qui doit être donné aux affirmations de Georgescu-Roegen. Il ne s'agit pas nécessairement de rendre compte de ce qu'il souhaitait dire lui-même. On cherche plutôt à préciser le sens qu'on a pu donner à ses intuitions, en effectuant des recherches plus abouties. Cela nous permet de porter un regard critique sur la manière dont Georgescu-Roegen mobilise ses intuitions. Par exemple, lorsqu'il critique la théorie néoclassique à partir du caractère mécaniste de cette dernière.

Dans cette démarche on attache beaucoup d'importance à la signification des concepts mobilisés. Il s'agit d'approfondir cette signification toutes les fois que l'auteur mobilise un concept sans prendre le temps d'en révéler toutes les facettes ou comment il s'articule avec les autres concepts. On en propose alors notre propre interprétation, mais à partir de la conception plus large que développe Georgescu-Roegen ou ses auteurs de référence. Cela nous permet de mettre en évidence des zones d'ombres dans son architecture conceptuelle. Il peut s'agir de concepts regroupant des réalités distinctes sous une même terminologie, ou bien de terme divers désignant une même réalité. On analyse alors les différentes manières dont ces concepts sont mobilisés, pour savoir si ces zones d'ombre donnent lieu à des problèmes de cohérence logique.

On espère que la méthode adoptée permettra de rendre compte clairement des forces et des faiblesses logiques du tournant théorique que Georgescu-Roegen articule autour de la loi de l'entropie.

Structure du mémoire

Cette analyse est séparée en deux chapitres. Le premier propose une perspective historique sur la loi de l'entropie. On suit tout d'abord les débuts de la thermodynamique autour des travaux de Sadi Carnot sur le rendement des machines à vapeur, et de leur reprise par Rudolf Clausius et William Thomson. Les outils conceptuels élémentaires, tels que les transformations réversibles et la notion d'entropie, sont introduits. Et on distingue les deux

traditions concurrentes à l'égard de l'interprétation du second principe, qui sont fondées par Clausius et Thomson. On s'intéresse ensuite au sens que le second principe donne à toute une variété de phénomènes élémentaires, tels que l'électricité et la lumière, ou plus complexes, tel que le vivant.

Puis, on tourne notre attention vers la controverse entre tenant d'une conception mécaniste des phénomènes thermiques et défenseur d'une irréductibilité de ces phénomènes aux principes de la mécanique. On précise les caractéristiques de l'épistémologie mécaniste, ainsi que du phénoménisme. Les fondements des tentatives d'interprétation mécaniste du second principe, promues notamment par Ludwig Boltzmann, sont introduits. Ceci nous conduit à préciser le sens des critères de réversibilité ou d'irréversibilité, et à présenter les critiques adressées à la théorie de Boltzmann. Cette dernière se transforme sous les coups de ses adversaires et accouche de la mécanique statistique qui envisage l'évolution entropique comme tendance au désordre.

On relève alors la singularité de la position de Georgescu-Roegen quant à l'interprétation légitime de la loi de l'entropie. Au XX^e siècle, la crise provoquée par la thermodynamique dans la physique du XIX^e n'est plus une préoccupation centrale et la mécanique statistique est considérée comme une explication valable. Mais Georgescu-Roegen ranime la controverse et refuse l'interprétation statistique. On le situe alors dans une posture qui le rapproche de l'épistémologie phénoméniste, et on précise le système d'oppositions épistémiques qu'il envisage entre la mécanique et la thermodynamique.

Le second chapitre est consacré à la double dimension du tournant théorique de Georgescu-Roegen : la critique de la théorie néoclassique et les fondements de la perspective bioéconomique. Ces deux dimensions sont envisagées du point de vue de sa réflexion sur la loi de l'entropie. Par ailleurs, on distingue les enjeux épistémologiques des enjeux écologiques dans les rapports que Georgescu-Roegen suggère entre la loi de l'entropie et le processus économique.

Concernant la critique de la théorie néoclassique, on montre que l'un de ses arguments consiste en l'identification d'une analogie volontaire avec la mécanique rationnelle. A partir des travaux de Mirowski, on montre le caractère incomplet de la métaphore mécaniste. Sur cette base, on synthétise et on analyse les différentes contraintes qui s'exercent sur la théorie néoclassique selon Georgescu-Roegen. Le système d'oppositions épistémiques mis en évidence dans les controverses autour de l'interprétation de l'entropie constitue la principale

grille de lecture de ces contraintes. L'argument est donc en partie épistémologique. Mais les préoccupations environnementales apparaissent aussi. L'entropie est envisagée comme le concept permettant de réintroduire les transformations qualitatives de l'environnement.

Ce point de vue est approfondi dans la présentation des fondements de la bioéconomie. Pour cela, il convient de revenir à la question des rapports entre le vivant et la loi de l'entropie. On s'appuie alors sur les travaux de Erwin Schrödinger et Ilya Prigogine. Les liens de ces références avec les analyses de Georgescu-Roegen sont précisés. On réexamine les attributs épistémologiques de la loi de l'entropie à l'aune de son rapport au vivant. Puis, on présente les liens de continuité et la spécificité de l'économique par rapport au vivant, tels qu'ils sont suggérés par Georgescu-Roegen. On tire alors les leçons de cette analyse pour la perception du processus économique.

Pour finir, on tente de préciser les conséquences d'une lecture entropique pour la question de l'épuisement des ressources énergétique et minérales terrestres. Pour les ressources énergétiques, Georgescu-Roegen propose un modèle élémentaire. On commente celui-ci à partir des propriétés de l'entropie discutées en amont. En se plaçant du point de vue de la pertinence de ce modèle dans le moyen terme, on introduit les enjeux liés à l'évolution technologique. Pour les ressources minérales, on précise l'évolution de la réflexion de Georgescu-Roegen sur les relations entre la loi de l'entropie et la matière. Puis, les deux arguments qu'il avance pour défendre l'impossibilité du recyclage intégral sont discutés.

Cet exposé met en lumière la fertilité des analyses épistémologiques de Georgescu-Roegen à l'égard de la loi de l'entropie. On montre que la nature économique de la loi de l'entropie est inscrite dans la démarche initiale de Carnot et qu'elle transparaît ensuite aux différentes étapes de l'évolution de la thermodynamique. De même, le caractère anthropomorphique se forge à la frontière d'une propriété naturelle et de la signification économique de la loi de l'entropie. En ce qui concerne l'incompatibilité de la mécanique et de la thermodynamique, elle repose sur un système d'oppositions épistémiques bien établi. A l'opposition classique entre la réversibilité des phénomènes mécaniques et l'irréversibilité des phénomènes entropiques, Georgescu-Roegen ajoute la double opposition entre une mécanique quantitative et déterministe, et les transformations thermodynamiques qualitatives et indéterminées. Son refus de la mécanique statistique, fondé sur cette analyse épistémologique, apparaît dès lors justifié et cohérent. Il le place du côté des tenants d'une interprétation phénoméniste de la loi de l'entropie.

On met alors en évidence le rôle tout à fait central que joue son interprétation de la loi de l'entropie dans le tournant théorique qu'il opère à partir de la fin des années 60. On structure celui-ci selon deux grilles de lectures: d'une part, l'élaboration conjointe de la critique de la théorie néoclassique et des fondements de la bioéconomie ; d'autre part, une distinction entre les enjeux épistémologiques et les enjeux environnementaux, avec l'identification d'un glissement des premiers vers les seconds. Dans ces deux dichotomies, la loi de l'entropie joue un rôle de pivot pour passer d'un terme à l'autre.

La critique de la théorie néoclassique sur la base de l'influence de l'épistémologie mécaniste se révèle peu convaincante. Tant sur le plan épistémologique que sur le plan environnemental, elle repose sur une conception floue du mécanisme et des traits qu'il transmet à la théorie néoclassique. Elle manque de développements historiques sur la genèse de la pensée néoclassique et les travaux ultérieurs ne permettent pas de donner plus d'assise à ses arguments. Le « péché du mécanisme » apparaît comme une cause unique des limites de la théorie néoclassique, construite à posteriori pour en simplifier la critique. Mais cette simplification masque des problèmes conceptuels. Précisons cependant qu'elle ne constitue qu'une partie de la critique élaborée par Georgescu-Roegen et que notre analyse ne dit rien de ses autres arguments, tels que sa réflexion sur l'arithmomorphisme.

L'analyse des fondements de la perspective bioéconomique montre quant à elle la cohérence globale de ce nouveau paradigme. On note des dissonances entre la position de Georgescu-Roegen sur la loi de l'entropie et celle des références qu'il mobilise pour traiter la question du vivant. Malgré cela, la conception bioéconomique des activités économiques s'inscrit clairement dans la continuité de sa réflexion sur la loi de l'entropie. Les propriétés épistémologiques de cette dernière lui confèrent une place privilégiée pour traiter conjointement du vivant et de l'économique. Elle permet d'articuler la transformation qualitative et irréversible de l'environnement, et l'évolution indéterminée des structures biologiques ou économiques. Le choix de la biologie et de la thermodynamique comme nouveaux référents pour la science économique renforce l'hypothèse selon laquelle Georgescu-Roegen se rattache à une conception phénoméniste de la science. Cependant, la nouvelle architecture constitue avant tout un cadre pré-analytique qui demande à être complété par différentes perspectives. De par ses propriétés, elle est naturellement ouverte à l'analyse des institutions ou à l'histoire environnementale.

Georgescu-Roegen invite à ces dernières, mais il se concentre pour sa part sur des tentatives pour donner un pouvoir analytique aux lois de la thermodynamique. Ces tentatives

reposent sur des bases peu fiables. Son modèle d'épuisement des ressources énergétiques terrestres pose des problèmes conceptuels et d'interprétation. La quantification du stock de ressource terrestre ne semble pas formulée de manière convaincante. Même si elle pouvait l'être, il n'est pas sûr qu'elle soit significative pour l'analyse de la soutenabilité de la dynamique économique mondiale. De même, sa défense d'un épuisement irrévocable des ressources minérales présente des faiblesses majeures. Il échoue à donner une définition propre de l'entropie de la matière, et il commet une erreur dans son analyse de la coordination des activités de production et de recyclage. Ces faiblesses ne remettent pas en question le cadre pré-analytique de la bioéconomie, mais ils appellent à une réflexion plus aboutie sur les méthodes et les outils de ce nouveau paradigme.

Chapitre I

La loi de l'entropie : une rupture épistémologique dans la physique du XIX^e siècle

Pour appréhender dans les meilleures conditions les réflexions de Georgescu-Roegen quant à la nature entropique du processus économique, il est nécessaire d'effectuer un détour par l'histoire de ce concept apparu dans la physique de la seconde moitié du XIX^e siècle. Il s'agit tout d'abord de faire une présentation succincte du cadre théorique de la thermodynamique, cadre avec lequel l'économiste n'est pas nécessairement familier, bien qu'il lui arrive d'utiliser un formalisme semblable (Mirowski 2001b). Nous concentrerons notre attention sur la loi de l'entropie car le concept d'entropie reste à la fois moins connu et plus difficilement intelligible que le concept d'énergie, et car il est le cœur de la réflexion de Georgescu-Roegen. Tandis qu'on semble bien comprendre la signification de la conservation de l'énergie, les conséquences de la croissance de l'entropie ne paraissent pas aussi immédiatement perceptibles.

On propose donc de se familiariser avec le cadre théorique de la thermodynamique. Pour cela un exposé issu d'un manuel contemporain suffirait. Mais la construction historique de la thermodynamique, et en particulier de son second principe, est porteuse de sens. Elle permet de rappeler les enjeux épistémologiques qui ont accompagné la constitution de la thermodynamique en un corpus cohérent. Elle montre notamment comment celle-ci a entraîné une remise en cause de la suprématie de la mécanique dans le champ scientifique. Cette dernière se proposait comme une explication globale du monde. Mais la thermodynamique est venue à la fois mettre en évidence ses limites et proposer une nouvelle représentation du monde. Georgescu-Roegen (1981 : 9) lui-même ne manque pas de souligner que la loi de l'entropie a provoqué « la plus grande transformation jamais subit par la physique ». Et on perçoit nettement dans son travail l'ambition de provoquer une transformation semblable en économie. Ce faisant, il prend position sur les controverses qui ont marqué le XIX^e siècle. En précisant la nature de celles-ci, on se donne du même coup la possibilité de comprendre cette position. L'histoire du second principe permet de mettre en perspective certaines affirmations de Georgescu-Roegen, par exemple en ce qui concerne les caractères anthropomorphique, économique ou qualitatif de la loi de l'entropie.

Ce chapitre commence avec les travaux pionniers de Sadi Carnot sur les machines à vapeur, en mettant l'accent sur leur dimension économique. Ceux-ci permettent de forger les outils qui seront ceux de la thermodynamique. Mais ils nécessitent d'être reformulés dans le langage de l'énergie, après 1840 et la découverte de la conservation de l'énergie. Rudolf Clausius et William Thomson se chargeront séparément de cette tâche, le premier aboutissant au concept d'entropie, tandis que le second préférera parler de dégradation de l'énergie. On s'intéressera alors à l'extension de la portée du second principe. Il organise peu à peu un grand nombre de phénomènes au sein d'une même architecture théorique. On verra entre autres sa fertilité quand il s'agit de comprendre la nature des activités économiques ou biologiques.

Malgré cette fécondité, le second principe interroge les physiciens tout au long du XIX^e siècle par sa forme si particulière, et par l'antinomie entre les phénomènes du mouvement et ceux de la chaleur dont il rend compte théoriquement. Si certains acceptent la thermodynamique comme une science neuve, autonome des connaissances antérieures, d'autres ne peuvent se résoudre à abandonner l'idée que la mécanique doit permettre de rendre compte de tous les phénomènes de la matière. Les tentatives pour interpréter le second principe en termes de mouvement de particules, aboutiront à la mise en lumière d'un des critères épistémologiques qui opposent la mécanique et la thermodynamique : le caractère réversible ou non des transformations envisagées.

La vive controverse qui entoure cette mise en lumière, nous mènera directement à Georgescu-Roegen. Sa réflexion sur la loi de l'entropie s'inscrit dans la continuité de celle-ci. Il prend alors résolument position contre tout ce qu'il perçoit comme une tentative pour sauver le « dogme mécaniste » et précise ainsi les antagonismes épistémologiques qui opposent radicalement la mécanique et la thermodynamique. Il entend critiquer sur cette base la théorie économique néoclassique, issue selon lui d'une imitation de la mécanique et donc marquée par les mêmes travers épistémologiques. A partir de cette réflexion épistémologique, il entend aussi proposer les fondements d'une nouvelle théorie économique, qui prendra par la suite le nom de bioéconomie.

I.1 L'émergence du second principe de la thermodynamique

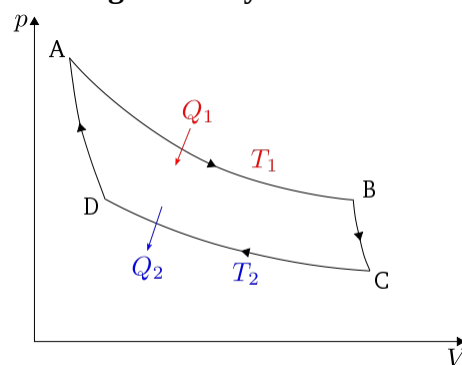
Le second principe, aussi appelé principe de Carnot, et plus tard loi de l'entropie, est en somme formulé avant même le premier principe, celui de la conservation de l'énergie. On en situe en effet l'origine aux *Réflexions sur la puissance motrice du feu* de Sadi Carnot (1796-

1832), publiées en 1824. Sadi Carnot tente dans cet ouvrage de fournir l'une des premières études théoriques du fonctionnement des machines à vapeur, dont l'utilisation, en particulier en Angleterre, est avant tout guidée par une forme de pragmatisme (Grinevald 1976 : 44). Il entend ainsi déterminer les conditions qui permettront d'obtenir le rendement maximal, c'est à dire d'obtenir le maximum de travail mécanique pour une quantité de combustible donné. Ce faisant, il est partie prenante d'un processus qui affecte l'ensemble de la communauté scientifique française. Le rétablissement des relations commerciales avec l'Angleterre après la chute de Napoléon a en effet montré aux scientifiques français que celle-ci a pris une avance considérable dans le domaine industriel, et qu'elle doit une bonne partie de sa prospérité aux machines à vapeur. Ce constat est en particulier celui des partisans du saint-simonisme. Cette doctrine socio-économique, fondée par le comte Henri de Saint-Simon au début du XIX^e siècle, réunit de nombreux ingénieurs polytechniciens, tels que Auguste Comte et Sadi Carnot. Ceux-ci entendent rediriger toutes les forces sociales vers la production de richesses, et les savants sont parmi les premiers à être mobilisés dans cette perspective (Vivien 1991 : 66). Ils s'inscrivent ainsi en rupture vis-à-vis de l'idée qui a dominé sous le règne de Napoléon, celle d'une mobilisation de la nation pour la guerre. La machine ne doit plus servir les besoins de la conquête mais ceux de la production de richesse, et le savant doit aider à la recherche des conditions qui permettront de maximiser cette production (Vivien 1991 : 84).

Sadi Carnot est largement influencé par cette nouvelle perspective, et c'est ainsi qu'il quitte l'armée en 1828, comme un « témoignage concernant le fameux passage de l'état militaire à l'état industriel mis à l'honneur par l'idéologie saint-simonienne » (Grinevald 1976 : 45). Dans ses ouvrages il montre une conscience aiguë du rôle des machines à vapeurs, du charbon et des ressources minérales dans la récente prospérité économique de l'Angleterre (Vivien 1991 : 88). Percevant la racine économique des préoccupations de Carnot, Georgescu-Roegen déclare ainsi que : « Carnot, en conséquence, pourrait bien être considéré comme le premier économètre » (1981 : 276). En se proposant d'identifier les conditions qui permettent de maximiser le travail mécanique obtenu à partir de la consommation d'une unité de charbon, Carnot propose de fait d'établir les conditions de la prospérité au niveau le plus élémentaire des activités économiques. Le travail mécanique est clairement identifié comme une source de richesse économique par sa capacité à transformer le monde. Dans le même temps, l'idée que dans la nature rien n'est créé gratuitement invite Carnot à chercher la cause réelle de cette production de travail mécanique, et à établir l'équivalence entre cette cause et son effet.

Pour mener ses investigations, Carnot va chercher à abstraire le principe de fonctionnement des machines réelles pour aboutir à un schéma, uniquement mental, de la machine idéale. Il s'agit donc avant tout d'une « expérience de pensée » qui se propose comme une grille d'interprétation pour les phénomènes de la chaleur (Locqueneux 2009 : 29). A son époque, la chaleur est encore conçue comme un fluide, nommé calorique, qui peut passer d'un corps à l'autre. Il imagine alors le fonctionnement des machines à vapeur par analogie avec celui des machines hydrauliques. De même que la chute de l'eau peut engendrer un travail mécanique, la « chute » du calorique d'un corps chaud à un corps froid est une source de travail mécanique. Dans les machines réelles, les transformations d'un mélange d'eau et de vapeur permettent la production de travail mécanique et le transport la chaleur du corps chaud au corps froid. Ce mélange est nommé corps « intermédiaire », car il joue le rôle d'intermédiaire dans la transmission du calorique. L'abstraction de Carnot lui permet de conclure qu'il ne s'agit là que d'une substance possible parmi d'autres pouvant jouer ce rôle. Par ailleurs, toujours par analogie avec les connaissances des ingénieurs de son temps, et notamment de son père Lazare Carnot (1753-1823), il suggère que pour obtenir une machine idéale, ayant le rendement maximal, il faut limiter les chocs. Dans le cas des machines à vapeur, il s'agit de limiter les « chocs thermiques », c'est à dire que les échanges thermiques entre les corps extrêmes, chaud et froid, et le corps intermédiaire doivent s'effectuer à températures égales ou presque. Si un flux de chaleur devait avoir lieu entre deux corps de températures différentes, il représenterait une perte de rendement (Prigogine et Stengers 1993 : 181).

Figure 1 : Cycle de Carnot



Le fonctionnement d'une machine thermique idéale est donc ramener à un ensemble de transformations du corps intermédiaire selon le cycle suivant : une dilatation isotherme en contact avec le corps chaud ; une dilatation adiabatique (sans échange de chaleur) qui l'amène à la température du corps froid ; une compression isotherme en contact avec le corps froid ;

une compression adiabatique qui le ramène à la température du corps chaud. Ce cycle de Carnot permet de fournir un travail égal à l'aire de la surface qu'il délimite dans un diagramme volume/pression (Figure 1). Plus important, l'ensemble des transformations sont réversibles et il est donc possible de parcourir le cycle en sens inverse pour faire « remonter » le calorique vers la source chaude grâce à une action mécanique.

A partir de cette remarque, il aboutit au principe qui portera bientôt son nom, à savoir le fait que le rendement maximum d'une telle machine dépend uniquement des températures des corps chaud et froid. En particulier, il ne dépend aucunement du corps intermédiaire. Pour établir cela, Carnot part de l'impossibilité du mouvement perpétuel. Le mouvement perpétuel désigne l'idée qu'il serait possible de produire un travail mécanique *ex nihilo*. Sa négation apparaît à Carnot comme un axiome nécessaire à toute investigation dans les sciences de la nature. On perçoit ici que l'interrogation sur les machines à vapeur rejoint des préoccupations plus vastes sur les lois de la nature. Pour démontrer son principe, Carnot procède ainsi. Supposons qu'il existe deux machines idéales avec les mêmes températures pour les corps extrêmes, mais un rendement différent. On peut alors produire un travail mécanique avec la machine dont le rendement est le plus élevé, puis utiliser une fraction de cette énergie mécanique pour faire « remonter » le calorique, en parcourant le cycle inverse pour la machine de moindre rendement. On aboutit ainsi à une production de travail mécanique nette, alors que les échanges de calorique se sont compensés, ce qui équivaut à la possibilité du mouvement perpétuel (Locqueneux 2009 : 34-35).

Le formalisme de Carnot sera remis en question quelques années plus tard, lorsque James Prescott Joule (1818-1889) mettra en évidence la possibilité de produire de la chaleur avec une action mécanique. Ce fait expérimental est en effet contradictoire avec la représentation de la chaleur comme manifestation du calorique, c'est-à-dire d'un fluide indestructible. Il faut une nouvelle théorie qui permettent d'envisager la *transformation* du travail mécanique en chaleur. Cela mènera, dans les années 1840, à la formulation du principe de conservation de l'énergie. Ce principe interprète ces différents phénomènes comme des manifestations d'un changement de forme d'une même entité nommée *énergie*, dont la quantité reste constante. Malgré la familiarité qu'on peut aujourd'hui avoir avec ce nouveau formalisme, il convient de noter qu'il n'est pas dénué d'ambiguïtés et de questions dérangeantes (Locqueneux 2009 : chap. 2 ; Mirowski 2001b : chap. 2).

Cependant, il est plus intéressant pour notre sujet de savoir comment le travail de Carnot a

pu survivre, alors que la théorie dans laquelle il avait été formulé était discréditée. En 1850, Rudolf Clausius (1822-1888) va le premier chercher à surmonter les contradictions entre la théorie de l'énergie et celle de Carnot. Il retient du travail de Carnot que celui-ci a mis en évidence la corrélation entre deux processus apparemment indépendants, à savoir le flux de chaleur d'un corps chaud à un corps froid et la transformation de chaleur en travail mécanique. Mais l'impossibilité du mouvement perpétuel énoncée par Carnot n'est plus suffisante pour justifier l'existence d'un rendement maximal qui ne dépend que des températures. Dans la théorie de l'énergie cette impossibilité équivaut à la conservation de l'énergie. Or, s'il existait deux machines idéales de rendements différents, l'argument de Carnot aboutirait à la conversion intégrale d'une quantité de chaleur en travail, ce qui n'est pas a priori contradictoire avec la conservation de l'énergie.

C'est dans un nouvel axiome de la nature que Clausius cherche l'origine du principe de Carnot : « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud » (Cité dans Locqueneux 2009 : 168). Il s'agit là de la transcription de l'observation que, lorsque deux corps de températures différentes sont mis en contact, leurs températures tendent à s'égaliser, le corps le plus chaud cédant de la chaleur au corps plus froid. Le phénomène inverse, qui verrait la différence de température augmenter, ne se produit jamais naturellement. Cet énoncé confine donc à l'empirisme le plus pur. Clausius en déduit, par un raisonnement analogue à celui de Carnot¹, que le rendement maximal est déterminé et ne dépend que des températures des corps chaud et froid. Si l'on note Q_1 le flux de chaleur reçu du corps chaud par le corps intermédiaire à la température T_1 , et Q_2 le flux reversé au corps froid à T_2 , on obtient que $\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$. Si l'on suppose que le corps intermédiaire est un gaz parfait on obtient alors par des calculs relativement simples, faisant intervenir la loi des gaz parfaits et la conversion de la chaleur en travail, que $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$ (1). D'après le principe de Carnot revisité par Clausius, cette égalité est vraie quel que soit le corps intermédiaire. L'objectif initial poursuivi par Carnot, à savoir obtenir une formule donnant le rendement maximal en fonction des températures, est atteint.

1 On imagine qu'il existe deux machines idéales de rendements différents. Alors, on peut produire du travail avec celle dont le rendement est le plus élevé, puis utiliser ce travail pour obtenir un flux de chaleur du corps froid au corps chaud en faisant fonctionner la seconde à l'envers. Au final on obtient un flux net de chaleur du corps froid au corps chaud, sans dépense de travail mécanique. C'est absurde d'après l'axiome de Clausius.

I.2 L'invention du concept d'entropie

Jusque-là, la recherche des principes théoriques qui déterminent le fonctionnement des machines thermiques s'est appuyée principalement sur le fait d'observation qui veut que « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud ». C'est cette forme que Clausius propose d'abord de donner au second principe. Il vient s'ajouter au principe de conservation de l'énergie pour constituer le socle axiomatique de ce qui deviendra la thermodynamique, la science des transformations de l'énergie. Mais il souhaite aussi donner un caractère plus général à son principe, et se propose pour cela de lui donner une forme quantifiée. Il s'agit d'associer à chaque transformation une quantité qui puisse dire à quelle condition deux transformations différentes en nature sont équivalentes sur le plan thermodynamique, tout comme le flux de chaleur et la conversion de chaleur en travail le sont dans le cas du cycle de Carnot.

Reprenant la formule (1) du rendement maximum, qui établit justement un lien entre la conversion de la chaleur et le transfert du corps chaud au corps froid, il l'écrit sous la forme

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad .$$

Si l'on considère maintenant les flux de manière algébrique, positifs s'ils entrent dans le corps intermédiaire, négatifs s'ils en sortent, la formule est $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$. En supposant que l'on s'intéresse à un cycle de Carnot plus complexe, qui implique une succession de flux

Q_i à des températures T_i avant que le corps intermédiaire ne revienne à l'état initial, alors on a $\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$. Pour accéder à une forme encore plus générale de cette formule, on passe à des transformations infinitésimales. On obtient $\int \frac{dQ}{T} = 0$ (2)² pour tous les cycles réversibles fermés, c'est-à-dire les cycles qui ramènent le corps intermédiaire à son état initial, défini par une température et un volume donné (Locqueneux 2009 : 195).

La reformulation du second principe sous la forme (2) permet alors d'affirmer qu'il existe une fonction d'état S dont la différentielle est égale à $\frac{dQ}{T}$. Précisons ce que l'on entend par là : toutes les fonctions considérées sont des fonctions des deux variables indépendantes qui définissent l'état du corps intermédiaire, à savoir sa température T et son volume V . Selon ce formalisme, le flux de chaleur dQ est une forme différentielle, c'est à dire qu'elle a

² Le cycle étant réversible les transferts de chaleur s'effectuent à températures égales entre le corps intermédiaire et le corps avec lequel il est en contact. Donc dans l'intégrale T peut désigner la température du corps intermédiaire et dQ le flux depuis le point de vue de ce même corps. Toutes les variables en jeu sont donc rattachées à ce dernier exclusivement (Locqueneux 2009 : 187).

un lien déterminé avec les variations de volume et de température, $dQ=g(T,V)dT+h(T,V)dV$. La condition (2) est l'une des conditions équivalentes qui permettent d'affirmer que $\frac{dQ}{T}$ est une forme exacte, c'est-à-dire qu'il existe une fonction S , de T et de V , telle que $dS=\frac{dQ}{T}$ (3)³. S est appelée *entropie* du système. Il s'agit d'une fonction d'état, c'est à dire une fonction qui ne dépend que de l'état du corps intermédiaire et non du chemin parcouru pour parvenir à cet état (Locqueneux 2009 : 193-195).

La définition de l'entropie se fonde uniquement sur l'analyse des cycles réversibles fermés, mais ces derniers sont justement l'opposé de ce qu'on peut concevoir comme des processus naturels. Que nous apprend donc l'entropie sur ces derniers ? Partant toujours du fait central de la thermodynamique qui est que « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud », on se propose d'évaluer la variation de S dans le cas d'un transfert de chaleur $Q>0$ d'un corps à T_1 vers un corps à T_2 . Le système considéré est la réunion des deux corps, dont on suppose qu'ils forment un système isolé, c'est à dire n'échangeant ni matière ni énergie avec son environnement. Les variations de l'entropie sont données par la somme des variations des entropies des deux corps. Pour calculer la variation d'entropie, il faut *imaginer* des transformations réversibles, menant de l'état de départ à celui d'arrivée. Pour de telles transformation, la relation (3) est valide, et donc $\Delta S=\int \frac{dQ}{T}$ (4). On aurait tout d'abord une transmission de chaleur Q , du premier corps à un corps tiers de même température T_1 , ce qui représenterait une perte $-\frac{Q}{T_1}$ d'entropie. Puis on amènerait à T_2 la température de ce corps intermédiaire, et il céderait la chaleur Q au second corps. Soit un gain $+\frac{Q}{T_2}$ pour ce dernier. Donc la variation globale d'entropie est $\Delta S=Q\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)$. Si on obtenait $\Delta S<0$, cela signifierait que $T_1<T_2$, et que la chaleur est passée d'elle-même du corps froid au corps chaud. Postulant l'impossibilité d'un tel phénomène, Clausius conclut que, de manière plus générale, seules les transformations qui accroissent l'entropie peuvent advenir. C'est à dire $\Delta S>0$ (5) (Beard et Lozada 1999 : 84).

Il propose ainsi une nouvelle formulation du second principe de la thermodynamique : l'entropie d'un système isolé augmente jusqu'à un maximum. Celle-ci rend compte de l'idée

³ Ces quelques éléments formels ne devraient pas être trop étrangers aux économistes. Ils mobilisent des outils mathématiques similaires à ceux qui sont nécessaires dans le cadre du problème de l'intégrabilité, en théorie du consommateur (Mirowski 2001b : 268).

que la croissance de l'entropie mène à un état final qualifié d'*équilibre thermodynamique*, dont l'entropie est maximum. L'exemple caractéristique d'un tel équilibre est l'égalisation des températures de deux corps de températures initiales différentes que l'on met en contact. On notera la sobriété de cette loi qui, en fin de compte, se borne à donner le sens des processus physiques. Clausius propose le terme d'entropie par analogie de dénomination avec l'énergie, mais aussi car celui-ci est formé à partir du mot grec signifiant « transformation » (Locqueneux 2009 : 193). Ce faisant, il semble accepter en partie l'interprétation du travail de Carnot proposée par son concurrent anglais William Thomson (1824-1907). Celui-ci met l'accent sur la perte de rendement que le cycle de Carnot est censé éviter. Précisément, il s'interroge sur ce qui est perdu quand la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid sans produire le travail mécanique que l'on aurait pu en tirer avec un tel cycle idéal. Il conclut alors qu'il y a eu dissipation irréversible de l'énergie, c'est à dire disparition de l'énergie « utilisable » (Stengers 2003 : Vol.1, 199).

Il s'intéresse donc davantage aux processus naturels et les conçoit comme soumis à une dégradation de l'énergie aussi universelle que la conservation de l'énergie. Pour sa part, Clausius attache plus d'importance à la tradition de l'étude des cycles réversibles, qui sont l'antithèse des processus naturels. Le concept d'entropie est issu de cette seconde approche et de ce fait ne semble pas prioritairement destiné à rendre compte des processus naturels. Ainsi, « l'entropie n'a, dans le cas non idéal, aucun rapport déterminé avec les variables qui caractérisent le système » (Stengers 2003 : Vol.1, 207). Elle ne définit les processus naturels que comme perte par rapport à l'idéal d'une transformation réversible. Deux traditions concurrentes, quant à l'interprétation des travaux de Carnot, semblent donc naître vers 1850.

Il faut bien garder à l'esprit que la reformulation du second principe de la thermodynamique par l'équation (5) a été obtenue par une théorisation de phénomènes qui n'ont rien de naturel. Tout d'abord, dans la continuité des travaux de Sadi Carnot, la thermodynamique opère une mutation de la physique. Elle déplace le regard, des phénomènes proprement naturels vers des objets hybrides, où l'inventivité humaine contrôle les forces naturelles pour les mettre à son profit. Alors que dans la nature, la chaleur serait passée du corps chaud au corps froid sans produire un quelconque effet mécanique, la ruse humaine permet au contraire de tirer de ce transfert un travail mécanique utile à l'économie des hommes. Les cycles réversibles, inventés par Carnot, poussent en somme cette logique du contrôle humain sur les forces naturelles jusqu'à son point extrême. Un tel cycle suppose en

permanence un manipulateur minutieux qui permette que tout transfert de chaleur entraîne une variation de volume, pour qu'il n'y ait aucune perte de rendement, et que cela s'opère dans le sens souhaité. On aboutit ainsi à une « pure et simple fiction », qui n'a non seulement pas d'existence dans la nature, mais qui dépasse aussi la capacité d'action humaine (Stengers 2003 : Vol. 1, 141-142). La machine parfaite est à tout jamais un idéal, et les transformations réelles impliqueront toujours des pertes.

Quel est alors le sens d'une telle fiction ? On ne peut mieux le dire que de la manière suivante : « Le cycle de Carnot est une fiction, mais c'est également une invention physico-mathématique de type nouveau, une véritable " machine à créer de l'égalité " entre deux ordres de phénomènes qui n'entretiennent, dans la nature, aucun rapport déterminé. » (Stengers 2003 : Vol. 1, 144). L'idéalisation du contrôle humain sur la machine thermique aboutit en effet à mettre en relation un flux de chaleur d'un corps chaud vers un corps froid et la conversion d'une quantité de chaleur en travail mécanique, ce qu'exprime la formule (1), $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Le travail de Clausius est en somme une généralisation de cette mise en rapport de phénomènes divers, qui prend une forme plus générale avec la définition de l'entropie. Cette filiation entre l'entropie et l'idéalisation de la machine thermique montre bien le caractère intrinsèquement anthropomorphique de l'entropie. C'est à dire qu'il s'agit d'un concept qui ne prend son sens que du point de vue humain et non une entité ayant une existence naturelle, indépendante de l'activité de théorisation des hommes. La définition de l'entropie comme « une mesure de l'énergie inutilisable dans un système thermodynamique » (cité dans Georgescu-Roegen 2006 : 68) exprime ce constat de manière encore plus directe. L'adjectif « inutilisable » fait référence à l'homme et à sa capacité à mettre à profit certaines formes d'énergie pour ses besoins économiques.

Ce caractère anthropomorphique entre a priori en conflit avec la représentation traditionnelle de la science, comme étudiant des objets ayant une existence autonome de l'homme et projetant sur ces derniers un regard neutre, dénué de préconceptions. Cependant, on perçoit ce caractère anthropomorphique des concepts scientifiques dans de nombreux autres domaines. Par exemple, François Vatin (1993) montre comment le concept de travail en mécanique est apparu dans les études scientifiques des ingénieurs économistes français, tels que Charles-Augustin Coulomb. Ceux-ci cherchaient une mesure du travail humain, à la frontière entre le physiologique et l'économique.

Selon Georgescu-Roegen (2006 : 69), on ne saurait trop s'étonner du caractère anthropomorphique des concepts scientifiques, car « tout élément par lequel l'homme cherche

à entrer en contact avec la réalité ne peut être qu'anthropomorphique ». Cependant, il reconnaît que « le cas de la thermodynamique est plus frappant ». Le concept d'entropie, tant dans ses fondements historiques et théoriques, que dans ses définitions les plus immédiatement intelligibles, semble entretenir un lien étroit avec les activités humaines. Mais l'énoncé de la loi de l'entropie s'appuie aussi sur le fait de nature selon lequel « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud ». Le mystère de l'entropie semble donc résider à la frontière entre les hommes et leur environnement.

I.3 L'extension du champ d'interprétation du second principe

Dans ce qui précède, on a vu émerger le second principe de la thermodynamique sous ses différentes formulations, toutes équivalentes entre elles et toutes construites sur l'étude des machines thermiques sous leur forme abstraite et idéale. Cependant, dès les années 1850, William Thomson propose de donner au principe de dégradation de l'énergie une portée plus large, tout comme le principe de conservation de l'énergie étend progressivement son emprise sur des phénomènes aussi divers que la chaleur, le mouvement, l'électricité, les réactions chimiques ou la lumière (Stengers 2003 : Vol. 1, 199). Il est ainsi le premier à accomplir « le saut vertigineux de la technologie des moteurs à la cosmologie » (Prigogine et Stengers 1993 : 184), en conférant au principe de dégradation de l'énergie un statut universel. Selon sa perspective, l'Univers s'achemine vers un état de « mort thermique » où toutes les différences de températures ayant été annulées, la chaleur étant répartie de manière homogène, il ne sera plus possible d'en tirer un quelconque mouvement.

Cette brusque montée en généralité proposée par Thomson, n'est pas le propre de la thermodynamique. Depuis ses origines, la théorie physique opère ainsi une articulation des préoccupations techniques et cosmologiques, à l'image des réflexions de Galilée (Grinevald 1976 : 76). Mais la dimension prophétique du concept de « mort thermique » va marquer le XIX^e siècle par le pessimisme qu'elle véhicule. Ainsi, Camille Flammarion (1842-1925) dans *La fin du monde* vulgarisera-t-il la conception de l'avenir thermodynamique proposée par Thomson (extrait dans Locqueneux 2009 : 250-251). Cette interprétation de la thermodynamique n'est pas sans lien avec le contexte économique et social, qui voit le bouleversement des modes d'insertion dans la nature, soulevant des inquiétudes nouvelles. « La hantise de l'épuisement des stocks et de l'arrêt des moteurs, l'idée d'un déclin irréversible traduisent certainement cette angoisse propre au monde moderne » (Prigogine et

Stengers 1993 : 185).

Clausius semble lui aussi céder en partie à la tentation de donner une dimension cosmologique à la thermodynamique. Ainsi, en 1865 il en formule les deux principes de la manière suivante : « L'énergie de l'Univers est constante. L'entropie de l'Univers tend vers un maximum. » (Cité dans Locqueneux 2009 : 193). Néanmoins, cette formulation se veut moins chargée de sens philosophique que celle de Thomson. Sa justification réside dans le fait que l'Univers est, selon Clausius, le seul système qui puisse réellement être considéré comme isolé. Plus généralement, il entend montrer, contre Thomson, que la dégradation de l'énergie ne peut avoir le sens universel que lui prête ce dernier. Seule la comparaison à une transformation idéale réversible, c'est à dire un dispositif artificiel, peut, selon lui, donner un sens à la dégradation de l'énergie (Stengers 2003 : Vol.1, 200). En cela, il réaffirme le caractère anthropomorphique de l'idée de dégradation de l'énergie, et montre une plus grande sobriété à l'égard de la signification philosophique du second principe de la thermodynamique.

Contrairement aux inquiétudes évoquées plus haut, les remarques de Clausius quant à la signification de la loi de l'entropie pour l'humanité seront rares. Pourtant, son rôle central dans la constitution de la thermodynamique lui laissait beaucoup d'opportunités pour s'exprimer. C'est seulement en 1885, vers la fin de sa vie, que, dans un article intitulé « Sur les stocks d'énergie dans la nature et leur valorisation pour les bienfaits de l'humanité », il évoque quelques inquiétudes à l'égard du caractère fini des réserves de charbon et sa préférence pour la production d'électricité à l'aide de barrages (Martinez-Alier 1990 : chap. 5).

Si le caractère prophétique de l'annonce de la « mort thermique de l'Univers » n'est pas du goût de tous les protagonistes de la thermodynamique, cette dernière ne s'en révèle pas moins une clef de lecture tout à fait nouvelle du monde matériel. Avec l'entropie, le problème des processus irréversibles s'introduit en physique, comme l'un des éléments majeurs des processus naturels. En particulier, on fait plus clairement le lien entre les transformations qui ont lieu à la surface de la Terre et l'énergie qui provient de la dégradation progressive du Soleil, même si celle-ci n'est pas encore bien expliquée avant la naissance de la physique nucléaire.

« La chaleur que répand le soleil sur le globe y devient la source de presque toute l'énergie dont nous disposons : la chaleur solaire est la cause essentielle de la circulation des vents et de la

circulation des eaux qui, en amenant aux montagnes la neige et la pluie, produisent les rivières et les fleuves, et nous font retrouver sous forme d'énergie mécanique utilisable pour notre industrie une part de l'énergie calorifique reçue. La radiation solaire a joué encore un rôle capital dans la constitution des dépôts de charbon que renferme notre sous-sol, d'où nous tirons l'énergie chimique, dont nous faisons à volonté de l'énergie calorifique. » (Brunhes 1927 : 23)

Si la tendance à la dégradation de l'énergie annonce donc un avenir peu souhaitable, elle est dans le présent la source de la plupart des énergies qui courent à la surface du globe et que les hommes, et plus généralement les organismes vivants, mettent à leur profit. Il se dessine donc ici une autre version de la perspective cosmique envisagée par Thomson, qui lie inextricablement les sociétés humaines à l'astre solaire.

A la surface de la Terre, le second principe de la thermodynamique guide aussi les transformations ultérieures de l'énergie issue du Soleil. L'ensemble des énergies peuvent alors être classées selon leur « qualité », comme l'explique Bernard Brunhes (1867-1910) dans sa synthèse éclairante sur *La dégradation de l'énergie*. L'idée sous-jacente à cette classification est que le travail mécanique est la forme la plus haute de l'énergie, tandis que la chaleur, en particulier si elle est répartie de manière uniforme, est la forme la plus basse. Toutes les autres formes d'énergies sont alors classifiées selon qu'elles ont une qualité équivalente à l'une ou l'autre de ces formes de l'énergie. Cela donne lieu à la constitution de deux classes, les formes *supérieures* et *inférieures* de l'énergie. L'équivalence de qualité entre deux formes de l'énergie se définit selon Brunhes par la capacité *théorique* à transformer intégralement l'une dans l'autre et réciproquement (Brunhes 1927 : 54).

Selon cette perspective, l'importance du travail de Sadi Carnot est d'avoir mis en évidence l'impossibilité théorique d'une transformation intégrale de la chaleur en travail mécanique, et donc la différence de qualité entre ces deux formes de l'énergie. A l'inverse, la mécanique rationnelle établit la possibilité de convertir intégralement l'énergie potentielle en énergie cinétique et réciproquement, donc ces deux formes de l'énergie mécanique sont de qualité équivalente et appartiennent aux formes supérieures. De même, l'invention de la dynamo a permis de montrer que l'énergie électrique est une forme supérieure de l'énergie puisqu'elle peut, théoriquement, être transformée intégralement en énergie mécanique, et réciproquement si l'on renverse le fonctionnement de la dynamo (Brunhes 1927 : 54). Ceci ne signifie pas qu'on puisse opérer en pratique ces conversions totales, mais du moins la théorie n'établit-elle pas de limite absolue à la conversion, comme dans le cas de la machine thermique.

On voit, dans ce qui précède, que les formes supérieures de l'énergie correspondent à une qualité unique. Au contraire, les formes inférieures de l'énergie constituent une échelle continue de qualités décroissantes. Ainsi la chaleur est de qualité plus élevée si elle est associée à une source plus chaude, conséquence immédiate du fait qu'on peut faire passer de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid de manière intégrale, mais que dans l'autre sens il faut une consommation d'énergie mécanique (Brunhes 1927 : 73). La lumière, et plus généralement des ondes électromagnétiques, est un autre exemple d'énergie de forme inférieure. D'une part, cette énergie se présente elle aussi sous des degrés de qualité divers, plus élevés du côté du bleu sur le spectre, c'est à dire lorsque la fréquence de l'onde est plus élevée, et plus basses du côté du rouge, ou des fréquences plus basses. D'autre part, cette énergie radiative est en tout point équivalente en qualité à la chaleur ou plus précisément : « L'énergie rayonnée par un corps matériel chauffé dans certaines conditions bien définies, est de tous points équivalente à de l'énergie calorifique prise à la température du corps » (Brunhes 1927 : 86). Enfin, pour ce qui est de l'énergie chimique dans un sens large, elle recouvre plusieurs formes d'énergie qui peuvent être soit supérieures soit inférieures (Brunhes 1927 : 38).

Ayant ainsi précisé l'idée de qualités différentes des énergies, on est plus à même de cerner ce que signifie le principe de dégradation de l'énergie. Il désigne la tendance générale des énergies de forme supérieure à se dégrader en une forme inférieure. Cette formulation permet d'intégrer une classe de phénomènes plus vaste que la simple diffusion de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid, premier exemple de dégradation interprétée comme telle par Thomson. Ainsi, les phénomènes de frottement mécanique transforment de l'énergie mécanique, forme supérieure, en chaleur, forme inférieure. De même, l'effet Joule consiste en la conversion en chaleur d'une part de l'énergie électrique qui traverse la résistance. Néanmoins, ces phénomènes ne sont pas les seuls qui puissent se produire. Ainsi on a vu que la conversion de la chaleur en énergie mécanique, qui correspond à une élévation de la qualité, est aussi possible. Mais celle-ci est compensée, dans la machine thermique, par la dégradation qu'implique le transfert de chaleur concomitant du corps chaud au corps froid.

Pour cerner plus précisément qu'elles sont les transformations possibles il faut donc établir des rapports quantitatifs entre les différentes formes d'énergie. C'est le rôle de l'entropie ainsi que du concept d'énergie utilisable. On peut définir l'énergie utilisable d'un système, de manière plus rigoureuse, comme la quantité maximum d'énergie mécanique que l'on pourrait obtenir de toutes les énergies du système. Il s'agirait donc d'une valeur supérieure à la seule

quantité d'énergie de forme supérieure, puisque les énergies de forme inférieure peuvent aussi être partiellement converties en énergie mécanique. Le principe de dégradation de l'énergie consiste à affirmer que la quantité d'énergie utilisable ne peut que diminuer dans un système isolé (Brunhes 1927 : 44).

On peut dès lors préciser le sens économique du second principe. Celui-ci est né des préoccupations économiques de Carnot, et il permet a posteriori de mieux comprendre le sens de la plupart des activités industrielles. On peut distinguer deux groupes d'activités. Les premières consistent à accélérer volontairement la dégradation de l'énergie dans son sens naturel. C'est le cas par exemple lorsqu'on brûle du bois ou du charbon, une énergie chimique de forme supérieure, pour produire de la chaleur, une forme inférieure de l'énergie. Les autres consistent à l'inverse à lutter contre la dégradation naturelle de l'énergie en transformant une forme inférieure en forme supérieure, mais toujours en obtenant en fin de compte un déficit d'énergie utilisable. Par exemple, les frottements engendrent partout des pertes d'énergie mécanique. Pour perpétuer les mouvements l'homme doit donc en permanence combler cette perte en produisant du travail mécanique avec de la chaleur. Il s'agit ici pour l'homme de préserver sa capacité à transformer le monde matériel grâce à « l'industrie primordiale : celle de la production de puissance mécanique » (Brunhes 1927 : 199).

On cerne mieux dès lors l'ambiguïté inhérente au concept d'énergie utilisable. Celui-ci se fonde sur l'idée d'une supériorité de l'énergie mécanique, supériorité dont on peut distinguer deux sources : d'une part, en tant que forme supérieure, elle a le *pouvoir* d'être convertie intégralement en n'importe laquelle des formes d'énergie ; d'autre part, sur le plan économique, elle est le fondement de la capacité d'action des hommes sur leur environnement, et donc la plus *utile* des énergies. Le caractère anthropomorphique de l'énergie utilisable, et au-delà de l'entropie, se niche dans cet entrelacement des préoccupations naturelles et économiques.

Jusqu'à maintenant, on a principalement prêté attention à l'énergie et à sa dégradation. Mais le second principe de la thermodynamique semble aussi être en mesure de traiter de certains phénomènes propres à la matière. L'exemple le plus connu à cet égard est le cas de la diffusion de la matière, c'est à dire de la propension au mélange homogène qui anime la matière. Ce phénomène est particulièrement observable dans le cas de deux gaz mis en contact et qui, au bout d'un certain temps, se retrouvent tout à fait mélangés. Mais il a aussi

lieu lorsque deux solides sont mis en contact de manière prolongée (Brunhes 1927 : 137-138).

Dans les années 1870, Willard Gibbs (1839-1903) a montré que la loi de l'entropie pouvait rendre compte de ce phénomène. Il part pour cela du problème suivant : une boîte ne permettant pas les échanges de chaleur est divisée en deux compartiments, chacun contenant deux gaz parfaits à la même pression et à la même température ; puis, on enlève la séparation entre les deux gaz, de sorte qu'ils se mélangent. Pour calculer la variation d'entropie totale, il faut calculer la variation d'entropie pour chacun des deux gaz, en imaginant des transformations réversibles qui les amènent du volume initial au volume final. Il s'agit de la même méthode que celle employée pour calculer la variation d'entropie associée au transfert de chaleur entre deux corps. En effectuant les calculs, on trouve la formule dite de Gibbs pour ΔS , et on constate que $\Delta S > 0$ (Beard et Lozada 1999 : 87-88).

La loi de l'entropie se trouve donc en accord avec ce phénomène de diffusion des gaz, puisque l'entropie s'est accrue entre l'état initial et l'état final. Mais, dans ce cas, il est plus difficile de faire le lien avec une quelconque dégradation de l'énergie. Contrairement au cas de la diffusion de la chaleur, on ne peut imaginer de dispositif qui aurait permis d'obtenir de l'énergie mécanique grâce à cette diffusion. En fait, Gibbs propose, dans le paradoxe qui porte depuis son nom, l'idée que ce processus apparemment irréversible n'en est pas un. En effet, à la différence de la diffusion de la chaleur, une fois les gaz mélangés ils restent distinguables au niveau microscopique, et on peut imaginer des procédés qui « trient » les gaz. Cette opération ne nécessitant pas d'énergie, on peut penser qu'elle permet de retrouver l'état initial de séparation des gaz sans dégradation énergétique, et donc que le phénomène est réversible (Brunhes 1927 : 146-148).

Le cas du mélange des gaz n'en a pas moins fourni une nouvelle interprétation de l'entropie comme d'une mesure du *désordre* tant dans l'énergie que dans la matière. Une nouvelle forme d'interprétation cosmologique vient de pair avec cette reconnaissance de la tendance au désordre dans la nature. Il ne s'agit plus seulement de l'annonce de la « mort thermique de l'Univers », mais plutôt celle d'un état encore moins enviable : le « chaos » (Georgescu-Roegen 2006 : 96). Dans ce dernier, non seulement toute l'énergie est répartie de manière uniforme, et par là même inutilisable, mais la matière aussi n'est plus disponible sous forme structurée, elle est tout à fait diffuse. La question des rapports entre énergie, entropie et matière devient dès lors une question importante de la thermodynamique.

Avec l'émergence de l'interprétation de l'entropie en termes d'ordre et de désordre, on voit

se poser des questions nouvelles. En particulier, les organismes vivants questionnent l'universalité de la tendance au désordre puisqu'ils parviennent à constituer des structures ordonnées stables. Déjà, au cours du XIX^e siècle, certains des principaux acteurs de l'émergence de la thermodynamique, tels que Thomson et Joule, avaient émis des doutes sur le fait que les organismes vivants soient eux-aussi soumis à la dégradation de l'énergie. Ils pouvaient même apparaître comme des « machines » à restaurer l'énergie utilisable (Brunhes 1927 : 180). Par la suite, les expériences sur l'énergétique animale ont mis en évidence que la « machine animale » était beaucoup plus efficace que la machine thermique, à transformer l'énergie chimique en travail mécanique. Cela ne signifie pas nécessairement qu'elle enfreigne la loi de l'entropie. Car si la machine thermique a un rendement aussi faible, c'est parce qu'elle transforme d'abord l'énergie chimique du charbon, forme supérieure, en chaleur, forme inférieure, puis cette dernière en partie en travail mécanique, et en partie en chaleur à plus basse température. Il est vraisemblable que l'organisme vivant utilise un processus plus complexe qui lui permet de transformer l'énergie chimique en travail mécanique sans passer par la forme inférieure de la chaleur, responsable de la perte de rendement dans la machine thermique (Brunhes 1927 : 186-187). Si l'on accepte donc que les êtres vivants ne font pas exception à la dégradation de l'énergie, on peut ensuite s'interroger sur le fait de savoir s'il l'accélère ou s'il la ralentisse, question sur laquelle nous reviendrons.

Pour le moment, c'est l'interprétation de l'entropie en termes de désordre qui questionne la nature profonde des processus vivants à la fin du XIX^e siècle. En effet si la tendance générale de l'univers est tournée vers le désordre, comment expliquer qu'un organisme vivant, ensemble matériel structuré ait pu voir le jour (Prigogine et Stengers 1993 : 200)? La réponse à cette question peut être formulée par analogie avec les activités économiques : « le désordre créé pour obtenir cet ordre, le charbon dissipé pour agglomérer ce fer, etc., sont, en fait, relativement si considérables, que l'on peut négliger cette création d'ordre » (Borel 1948 : 239). L'ordre créé en un endroit précis ne va pas contre la loi de l'entropie dès lors qu'il entraîne un plus grand désordre par ailleurs. On notera en passant que l'on perçoit ici la manière dont l'entropie unifie les problématiques biologiques et économiques, ce qui est l'essence même de la bioéconomie de Georgescu-Roegen et sera l'objet du second chapitre.

I.4 Les interprétations physiques du second principe

Après avoir décrit l'influence scientifique, intellectuelle et culturelle du second principe,

nous souhaitons maintenant revenir aux enjeux proprement épistémologiques qu'il fait émerger dans la physique du XIX^e siècle. Cet aspect est crucial dès lors que l'on cherche à comprendre l'intérêt de Georgescu-Roegen pour la loi de l'entropie. Il s'agira de situer clairement son positionnement par rapport aux différentes interprétations physiques du second principe et à leurs fondements épistémologiques. Mais pour commencer, il nous faut considérer la théorie qui domine la physique avant l'arrivée de la thermodynamique, à savoir la mécanique.

Cette théorie entend rendre intelligible et prédire les mouvements des corps. Issue des travaux de Galilée, elle acquiert toute sa renommée avec la formulation en termes de lois que lui donne Newton. A la fin du XVIII^e, Lagrange propose une nouvelle forme aux principes de la mécanique qui devient alors plus abstraite et mathématique. Les capacités prédictives de cette science impressionnent fortement et elle acquiert le statut de « science reine ». On pense alors, à l'image de Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), qu'elle est en mesure de rendre compte de tous les phénomènes du monde matériel (Mirowski 2001b : 37). Elle véhicule une vision du monde dont les caractéristiques sont les suivantes : tous les phénomènes observables sont issus du *mouvement* des corps ; on peut établir les équations qui gouvernent ces mouvements et ainsi *déterminer* l'évolution du monde. C'est cet ensemble de présupposés que Georgescu-Roegen (2006 : 88) nomme le « dogme mécaniste ».

Les acteurs du développement de la thermodynamique n'échappent pas à l'influence de la conception mécaniste de l'univers. On ne saurait trop s'en étonner selon Jacques Grinevald, pour qui « il est inévitable que la première reconnaissance du nouveau monde se fasse avec les schèmes de l'ancien » (1976 : 76). Chez Sadi Carnot l'influence de la mécanique est perceptible dans l'analogie hydraulique qui l'amène à considérer que c'est le *mouvement* du calorique entre le corps chaud et le corps froid, la « chute du calorique », qui entraîne le mouvement du moteur, tout comme la chute de l'eau permet de faire tourner le moulin. La conversion des forces est imaginée exactement dans les mêmes termes que dans le cas de l'étude des machines mécaniques dont Lazare Carnot, son père, était un spécialiste. Et la question de la maximisation du rendement est envisagée dans cette même perspective. Son père avait montré que pour limiter les pertes, il fallait que les transmissions de mouvement se fassent sans contact brusque entre des corps de vitesses différentes. Sadi Carnot suggère, pour sa part, que la maximisation du rendement est atteinte en évitant les contacts entre corps de températures différentes (Prigogine et Stengers 1993 : 181).

Toutefois, la conception de la machine thermique chez Carnot n'est mécanique que par

analogie. En ce qui concerne Clausius, l'influence de la mécanique touche plus directement à la nature même de ce qu'est la chaleur. Il déclare dans ses travaux de 1850 : « nous admettrons, en général, qu'il existe un mouvement des particules et que la chaleur est la mesure de sa force vive » (cité dans Locqueneux 2009 : 162). Notons que si une telle hypothèse sur l'origine de la chaleur n'est pas étrange pour l'époque, elle attend toujours des validations expérimentales. En particulier l'hypothèse d'une structure discontinue de la matière, constituée d'atomes et de molécules, n'est pas acquise avant la toute fin du XIX^e siècle. Avant cela, cette hypothèse apparaît plutôt comme une doctrine sans réel fondement empirique, que l'on qualifie du nom d'atomisme (Locqueneux 2009 : 393). Clausius appartient pleinement à ce courant et il publie en 1857 l'une des premières interprétations de la loi des gaz parfaits fondée sur une représentation atomiste des gaz, ce qui deviendra la théorie cinétique des gaz. Mais cette conception de la matière influence aussi les travaux qui le mènent au concept d'entropie. Ainsi, en 1862, il introduit le concept de « disgrégation », qui désigne le degré de division des particules dans la matière considérée, et lui sert d'intermédiaire pour expliquer la transformation de la chaleur en travail mécanique (Locqueneux 2009 : 190). Les considérations qui précèdent permettent de mieux comprendre pourquoi Clausius donnera le nom de *Théorie mécanique de la chaleur* à l'ouvrage qui rassemble ses contributions à la thermodynamique à la fin des années 1860.

Néanmoins, il semble qu'à son stade d'achèvement, à la fin du XIX^e siècle, la thermodynamique peut être considérée comme tout à fait autonome des considérations mécanistes et atomistes. Ainsi, Ernst Mach (1838-1916) va proposer une interprétation de la thermodynamique qu'on peut qualifier de *phénoméniste*⁴. On peut résumer la conception phénoméniste de la science de la manière suivante : « L'explication, la question pourquoi, la recherche des causes cachées, doivent être bannies au profit de la description, de la question comment et de la détermination [...] des lois qui régissent les phénomènes » (Soler 2000 : 121). Selon Mach, les sensations doivent être le point de départ de la pratique scientifique, en permettant d'accéder à un ensemble de relations stables qu'il s'agit d'abstraire. On parle alors de *phénoménisme sensualiste*. Cette position va de pair avec l'idée que c'est le *principe d'économie* qui guide la démarche scientifique, c'est à dire que l'essence d'un énoncé scientifique est de condenser un grand nombre de phénomènes divers. Mais surtout, elle invite à ne pas aller « au-delà de l'expérience », et elle conteste la nécessité du recours à des entités

⁴ On trouve aussi parfois les termes de phénoménaliste ou de phénoménologique, au risque d'une confusion avec la doctrine philosophique fondée par Edmund Husserl.

abstraites (Soler 2000 : 122).

Dans cette perspective, Mach constate que les travaux de Clausius gardent toute leur validité sans les hypothèses sur la structure moléculaire de la matière. Il reconstruit ainsi la thermodynamique comme une abstraction d'un ensemble de sensations que sont le volume, la température, la chaleur, et surtout, le phénomène central qui est que la chaleur passe toujours d'elle-même du corps chaud au corps froid. A partir de ces quelques hypothèses, on peut reconstruire l'édifice de la thermodynamique, et faire émerger le concept d'entropie, comme on l'a vu plus haut. La théorie de la chaleur apparaît alors comme tout à fait indépendante de la mécanique et on substitue le terme de « thermodynamique » à « théorie mécanique de la chaleur » (Locqueneux 2009 : 196).

Une autre interprétation des principes de la thermodynamique a été proposée. Celle-ci s'inscrit plus directement dans la perspective que Clausius adoptait de manière implicite, à savoir une conception atomiste de la matière, dont il s'agit d'étudier les propriétés en tant que mouvement des dits atomes. Outre les travaux de Clausius déjà évoqués, James Clerk Maxwell (1831-1879) établit les premiers résultats de cette théorie cinétique des gaz, en introduisant des considérations probabilistes sur les vitesses des particules dans les gaz (Locqueneux 2009 : 274). Mais, c'est principalement le nom de Ludwig Boltzmann (1844-1906) qui est attaché à la tentative d'une interprétation mécaniste du second principe de la thermodynamique, entreprise dès 1866. Il s'agit de rendre compatibles les lois qui sont censées gouverner le mouvement des atomes et l'évolution vers l'homogénéité des températures dont rend compte le second principe. Dans la continuité de Maxwell, il considère que l'agitation des gaz incite à adopter une conception probabiliste des vitesses des différentes particules et fait diverses hypothèses sur les impacts des particules entre elles. Sans entrer dans les détails, Boltzmann définit alors une fonction H dépendant de la distribution des vitesses. Il montre à partir des lois de la mécanique qu'elle est décroissante au cours du temps et constante à partir du moment où le gaz est à l'équilibre. Il estime alors que cette propriété, que l'on désigne depuis par le nom de théorème- H , doit permettre de relier H à l'entropie, qui, par sa croissance, rend compte de la même tendance à l'équilibre thermodynamique (Locqueneux 2009 : 284).

Avec cette nouvelle interprétation du second principe, Boltzmann entend montrer la fertilité des considérations atomistes et mécanistes pour rendre compte des évolutions thermodynamiques. Il prend donc une posture opposée à celle du phénoménisme en cherchant

les causes profondes de ces évolutions sans s'en tenir à la simple reconnaissance des relations qui existent entre les différentes formes de l'énergie. Il conçoit d'ailleurs le phénoménisme comme une doctrine vaine car, par définition, l'opération d'abstraction, que les phénoménistes ne récusent pas, implique d'aller au-delà de l'expérience. Pour lui, la différence entre son approche et celle des phénoménistes n'est pas de nature mais de degré. Il s'agit plutôt de savoir jusqu'à quel point on peut se permettre d'avancer des hypothèses sur la structure intime de la matière (Soler 2000 : 122). Dans le cas qui nous occupe, la controverse va porter sur deux éléments, l'existence des atomes et la pertinence d'une conception mécaniste de l'univers.

A la fin du XIX^e siècle, l'existence des atomes n'est pas acquise, faute de validation expérimentale convaincante. De nombreux physiciens ne croient plus en cette hypothèse. C'est en particulier le cas des membres qui se rattachent au courant dit de *l'énergétisme*, dont Wilhelm Ostwald (1854-1932) est l'un des porte-paroles. Ce dernier attaque vivement l'interprétation de la thermodynamique proposée par Boltzmann dans un article de 1895 intitulé « La déroute de l'atomisme contemporain » (Extrait dans Locqueneux 2009 : 326-332). Il va jusqu'à remettre en question la pertinence de la notion de matière qui pour lui « n'est autre chose qu'un groupe de différentes énergies, rangées ensemble dans l'espace, et tout ce que nous voulons en dire, nous le disons de ces énergies seulement » (Locqueneux 2009 : 330). Mais, le début du XX^e voit s'accumuler les preuves, nécessairement indirectes, de l'existence des atomes. Celle-ci est finalement largement acceptée par la communauté des physiciens après 1908. Ostwald lui-même, le plus fervent critique de l'atomisme, se convainc de la réalité des atomes (Locqueneux 2009 : 394). Néanmoins, la conception de la thermodynamique proposée par Boltzmann reste problématique en ce qui concerne la vision mécaniste du monde qu'elle promet.

I.5 L'incompatibilité de la mécanique et de la thermodynamique

On en vient là à un point crucial de notre exposé. Il s'agit de comprendre la nature de ce qui oppose la mécanique et la thermodynamique sur le plan épistémologique, c'est à dire en ce qui concerne les propriétés fondamentales du monde matériel que ces deux théories présupposent. Le premier élément à cet égard est apparu peu après les travaux de Boltzmann. Le physicien Josef Loschmidt (1821-1895) fait remarquer qu'il existe une contradiction entre le caractère réversible des systèmes mécaniques et les évolutions irréversibles de la thermodynamique.

Cette opposition entre irréversibilité et réversibilité est perceptible dans le domaine même

des phénomènes. Pour le voir, il suffit d'imaginer que l'on filme le mouvement d'un mobile, par exemple le jet d'un projectile. Si l'on passe le film à l'envers, personne ne pourra s'en apercevoir, le mouvement obtenu sera tout à fait cohérent avec notre expérience du monde mécanique. On dit que le phénomène est réversible. Au contraire, le flux de chaleur qui passe d'un corps chaud vers un corps froid ne saurait être « montré » à l'envers sans que l'on s'en aperçoive, il est irréversible. Un autre exemple de phénomène irréversible, qui coïncide mieux avec l'idée de filmer et de passer le film à l'envers, est donné par la croissance d'une plante ou de toute organisme vivant (Georgescu-Roegen 1981 : 200 ; Ostwald dans Locqueneux 2009 : 327). L'antinomie entre les phénomènes de la chaleur et ceux du mouvement est perçue dès le début du XIX^e, et provoque une controverse entre Joseph Fourier (1768-1830) et les théoriciens de la mécanique rationnelle réunis autour de Laplace et Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Fourier, lorsqu'il énonce sa loi de propagation de la chaleur en 1811, considérait en effet que « la propagation de la chaleur entre deux corps de températures différentes est un phénomène *sui generis* qu'il serait gratuit et illusoire de vouloir ramener aux interactions dynamiques entre masses voisines » (Prigogine et Stengers 1993 : 167).

Les théories devant être en accord avec les phénomènes qu'elles entendent décrire, il n'est pas étonnant de constater que les caractéristiques de réversibilité et d'irréversibilité se retrouvent dans les équations de la mécanique et de la thermodynamique. Pour s'en rendre compte, il faut observer ce que deviennent ces équations si l'on inverse la variable du temps. Pour la mécanique, considérons à titre d'exemple la trajectoire $z(t) \in \mathbb{R}^3$ d'un corps uniquement soumis à la pesanteur. La seconde loi de Newton est dans ce cas donnée par : $mz''(t) = mg$ entre 0 et t_0 . Si l'on pose $y(t) = z(t_0 - t)$ entre 0 et t_0 , y représente bien la trajectoire parcourue dans le sens inverse. Cette trajectoire est-elle aussi en accord avec la loi de Newton ? Pour le vérifier, on note que $y'(t) = -z'(t_0 - t)$, puis que $y''(t) = z''(t_0 - t)$. Donc $my''(t) = mz''(t_0 - t) = mg$, et cette trajectoire est conforme aux lois de la mécanique. A l'inverse, la loi de l'entropie se formule, pour un système isolé d'entropie S_0 , de la manière suivante : $S_0(t_2) - S_0(t_1) > 0$ si $t_2 > t_1$. Si l'on renversait le temps, on obtiendrait des valeurs de l'entropie S_1 du système « renversé » telles que : $S_1(t_2) - S_1(t_1) < 0$ si $t_2 > t_1$. Une telle évolution n'est donc pas cohérente avec la loi de l'entropie.

Si ces caractéristiques formelles semblent cohérentes avec les domaines phénoménaux

respectifs de la mécanique et de la thermodynamique, elles posent néanmoins un problème dès lors que l'on cherche, à l'image de Boltzmann, à expliquer les phénomènes thermodynamiques en partant d'explications mécaniques. Loschmidt formule le problème de la manière suivante : Boltzmann prétend montrer l'existence d'une fonction H décroissante, qui dépend des mouvements des particules du gaz ; mais, si l'on inverse le mouvement des particules, la fonction H devrait croître, sans qu'on enfreigne quelque loi de la mécanique que ce soit (Locqueneux 2009 : 282). Cette incompatibilité entre les lois de la mécanique et la loi de l'entropie est par la suite reformulée de manière plus théorique, mais le principe reste le même : il est impossible de déduire logiquement une loi irréversible en partant d'un ensemble de lois réversibles (Georgescu-Roegen 1981 : 152).

Face à cette critique du théorème- H , Boltzmann va proposer une nouvelle interprétation. Cette dernière affirme que la croissance de l'entropie est simplement l'événement le plus probable, et que sa décroissance est possible, mais improbable. Pour aboutir à cette interprétation, Boltzmann construit une nouvelle définition de l'entropie. L'idée centrale est que les molécules d'un gaz isolé, en nombre fini N , se répartissent dans un nombre fini de niveaux énergétiques m . Il s'agit en particulier de l'énergie cinétique, dans la continuité des travaux de Maxwell et Boltzmann déjà évoqués. On dit qu'on a un *état macroscopique* si on se donne N_1, \dots, N_m des entiers naturels de sorte que $N_1 + \dots + N_m = N$. Pour un tel état, on dit qu'on a un *état microscopique* adapté si les N particules ont chacune un niveau énergétique, de telle sorte que N_1 ont le niveau 1, N_2 ont le niveau 2, etc. Les définitions ainsi posées, on suggère que l'observateur du gaz est incapable de discerner les particules les unes des autres. Il ne discerne que les états macroscopiques. Dès lors, il s'agit de savoir combien d'états microscopiques correspondent à un même état macroscopique

N_1, \dots, N_m . En notant ce nombre W , la combinatoire nous donne que $W = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_m!}$ (6), nombre que l'on appelle aussi le coefficient multinomial⁵ (Locqueneux 2009 : 283).

Pour Boltzmann, W représente aussi la probabilité que l'état macroscopique en question se manifeste dans la nature, si l'on considère que tous les états microscopiques sont équiprobables. La tendance naturelle devrait donc être celle qui achemine le gaz vers les états les plus probables, mais cela n'empêche pas qu'il y ait des fluctuations autour de ces états, et qu'on repasse temporairement par des états moins probables. Or, les états macroscopiques qui

⁵ Il s'agit d'une généralisation du binôme de Newton, $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

correspondent à la plus grande valeur de W , sont ceux qui s'approchent le plus des égalités $N_1 = N_2 = \dots = N_m = \frac{N}{m}$, c'est à dire d'une équipartition des N particules dans les m niveaux d'énergie possibles⁶. Il suggère d'interpréter ces états comme les états de plus grand désordre, car il y a absence de toute dissymétrie entre les différents niveaux d'énergie. Dès lors, il propose d'identifier croissance de l'entropie et évolution vers le désordre, en posant $S = k \cdot \ln(W)$ (7)⁷, où k est appelée constante de Boltzmann. Ce faisant, il renforce l'interprétation de l'entropie comme étant une mesure du désordre, dont nous avons vu qu'elle est déjà présente dans la conception classique de la thermodynamique. Notons qu'au cours de ce raisonnement, le rôle des lois de la mécanique disparaît de l'explication microscopique du comportement macroscopique des gaz. « Nous sommes, dès maintenant, très loin de Newton » (Prigogine et Stengers 1993 : 195).

Au début du XX^e siècle, Gibbs reformulera les intuitions de Boltzmann de manière plus abstraite et la théorie présentée ci-dessus prendra alors le nom de *mécanique statistique*. Comme il s'agit d'une nouvelle interprétation de la thermodynamique, on parlera pour désigner la première formulation de *thermodynamique classique*, bien que le nom de thermodynamique phénoméniste soit peut-être plus juste. La mécanique statistique se fonde sur l'idée qu'on évolue de l'état le moins probable vers le plus probable. Cependant cette loi est avant tout une intuition mathématique, elle n'a pas de lien direct avec la réalité, contrairement au principe qui fonde la thermodynamique classique, à savoir que « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud ».

Il faut donc trouver des moyens indirects pour valider la construction hypothétique sur laquelle la mécanique statistique repose. On peut, pour cela, chercher à montrer qu'il existe un lien entre les formules (7) et (4), $\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$. Boltzmann le fera dans le cas d'un gaz parfait monoatomique (Locqueneux 2009 : 284). L'étude du mélange de deux gaz montre quant à elle que l'on obtient la formule de Gibbs (I.3) avec les deux formules. L'autre méthode de validation consiste à examiner les prédictions que permet d'effectuer ce nouveau formalisme et de les confronter à la réalité. Il s'agit là d'une conception de la science qui se rapproche plus du rationalisme critique de Popper. Sur ce point, la mécanique statistique semble avoir obtenu un certain nombre de succès. Elle fournit des prédictions dans des domaines où la thermodynamique classique ne permet pas de s'aventurer car elle propose un cadre moins

6 Lorsque N est très grand, comme dans le cas des molécules d'un gaz, ces états macroscopiques représentent rapidement l'écrasante majorité des états microscopiques, tout état différent de l'équipartition devient donc très improbable.

7 Le logarithme permet de préserver la propriété de sommation de l'entropie.

général (Beard et Lozada 1999 : 92).

Mais revenons au problème initial que constituait l'opposition fondamentale entre les mouvements réversibles de la mécanique et les processus irréversibles de la thermodynamique. La nouvelle construction de Boltzmann a-t-elle apporté une réponse au problème ? Pour son auteur, elle permet d'accepter l'objection de Loschmidt quant à la validité du théorème- H , en suggérant que l'évolution décrite par ce théorème est seulement « hautement probable », mais que des évolutions contraires ne peuvent être exclues. Il aboutit ainsi à une interprétation probabiliste de l'entropie. Cependant, si l'on prend l'argument de Loschmidt au pied de la lettre, il faut accepter qu'à toute évolution vers l'équilibre correspond une évolution qui s'en éloigne. Ces différents types d'évolution devraient donc avoir la même probabilité, si l'on souhaite conserver l'hypothèse d'une origine mécanique du comportement macroscopique.

Face à ces critiques, Boltzmann en acceptera l'essentiel et tentera de les rendre cohérente avec l'expérience sensible des phénomènes irréversibles en proposant un argument cosmologique : l'univers dans son ensemble oscille autour de l'équilibre thermodynamique, de sorte qu'il existe autant de régions qui sont portées vers l'équilibre, que de régions qui s'en éloignent (Stengers 2003 : Vol. 1, 242-244). Notre expérience du fait que « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud » n'est due qu'au fait que nous habitons une région du premier type.

Malgré les faiblesses perceptibles dans ce dernier argument, la mécanique statistique deviendra pleinement légitime en physique. Le théorème- H sera largement accepté, tandis que la conception phénoméniste de la thermodynamique perdra en influence. Le problème de l'incompatibilité de la mécanique et de la thermodynamique ne fera plus l'objet d'une attention particulière de la part de la majorité des physiciens après le début du XX^e siècle. Il reste un sujet important seulement pour quelques philosophes des sciences, pour les chimistes de l'école bruxelloise tels qu'Ilya Prigogine, et bien sûr pour Georgescu-Roegen (Mirowski 2001b : 79), dont nous pouvons maintenant préciser la position.

I.6 Georgescu-Roegen et la loi de l'entropie

Notons pour commencer que Georgescu-Roegen est de son propre aveu un « non initié » (1981 : 407) en ce qui concerne la thermodynamique et plus largement la physique. Il faut

entendre par là qu'il est avant tout, de par sa formation et sa carrière universitaire, un mathématicien et un économiste. De ce point de vue, il s'interroge sur les fondements épistémologiques de l'économie standard, pour reprendre ses propres termes, en tant qu'économiste y ayant contribué, bien que de manière généralement critique. Il cherche donc dans les autres domaines scientifiques un écho de ses propres préoccupations concernant la nature des transformations dont la science peut et doit rendre compte. Il a probablement été confronté pour la première fois à la loi de l'entropie dans l'ouvrage *Le Hasard* de Emile Borel (1871-1956), l'un de ses professeurs pendant son doctorat à Paris (Beard et Lozada 1999 : 120). Il va trouver dans les débats qui ont entouré son émergence l'occasion de préciser son positionnement épistémologique. Celui-ci sera présenté de la manière la plus détaillée dans son ouvrage de 1971, *The Entropy Law and the Economic Process*.

Ses réflexions s'inscrivent dans la continuité des débats autour de l'incompatibilité des lois de la mécanique et de la thermodynamique. Il porte alors un regard très critique sur l'intention de Boltzmann de réconcilier mécanique et thermodynamique avec son théorème-*H*. Il discute ainsi en détail les critiques de ce théorème qu'ont élaboré Loschmidt, Zermelo ou Poincaré, et prend résolument leur parti lorsqu'il conclut que : « De quelque angle que nous scrutons la thermodynamique statistique nous découvrons ce qui était évident depuis le départ : l'impossibilité d'expliquer des processus unidirectionnels par des lois qui soient indifférentes à la direction » (1981 : 168).

Il propose notamment une étude plus détaillée du modèle de Boltzmann pour chercher d'où peut venir l'erreur de ce dernier. Il identifie trois points problématiques : l'hypothèse sur la répartition statistique des chocs entre particules, le choix de l'intervalle de temps pour étudier les variations du système, l'absence de réversibilité des équations obtenus (1981 : 410). Sans prétendre pouvoir évaluer la pertinence de cette critique, on notera que, lorsque Georgescu-Roegen émet cette dernière dans les années 70, le théorème-*H* était largement accepté comme vrai. Ce n'est que depuis peu que les philosophes des sciences s'accordent pour dire l'inverse, et ils le font pour certaines des raisons évoquées par Georgescu-Roegen (Beard et Lozada 1999 : 108).

En outre, Georgescu-Roegen se distingue par une posture plus généralement hostile à tout l'édifice de la mécanique statistique, alors que celle-ci dans ses formes ultérieures n'entretient plus de lien avec la mécanique rationnelle. Pour justifier ce rejet catégorique il évoque que « les nombreux manuels de mécaniques statistiques [...] dénotent par leur absence à quelque

expérience que ce soit » (1981 : 161). Il juge dès lors qu'il s'agit avant tout d'une construction mathématique sans aucun lien avec la réalité phénoménale dont elle est censée rendre compte. La question de la validation expérimentale de la mécanique statistique semble encore aujourd'hui sujet à controverse, certains affirmant que les validations expérimentales sont nombreuses (Beard et Lozada 1999 : 109), tandis que d'autres notent qu'elle ne peut se substituer à la thermodynamique classique dans de nombreux cas pratiques (Mirowski 2001b : 79). Il convient donc encore une fois de suspendre notre jugement sur ce point, dans l'attente d'une étude plus systématique.

Mais Georgescu-Roegen soulève par ailleurs un autre problème, qui touche à la possibilité de rendre cohérentes les différentes interprétations de l'entropie. Plus précisément, la formule (7) prétendant fournir une interprétation de l'entropie comme définie par la thermodynamique classique, il est nécessaire que cette formule soit cohérente avec la formule (4). On a déjà dit que cela peut être le cas, mais Georgescu-Roegen nous rappelle aussi qu'en général cela s'est révélé impossible. D'autres formules pour les probabilités des états macroscopiques ont dû être proposées pour permettre de rendre compte d'autres évolutions macroscopiques, ce qui invite à penser que ces définitions de l'entropie sont en partie arbitraires (1981 : 147).

Pour Georgescu-Roegen, elles posent d'ailleurs un problème épistémologique plus profond, à savoir celui de la distinction entre une variable ordinale et une variable cardinale. Il faut insister ici sur la dimension physique, et non seulement mathématique, de la distinction dont nous souhaitons rendre compte. Les variables cardinales sont celles qui nous apparaissent les plus simples à priori, elles sont associées à l'idée de *quantités* d'une même entité, et elles présupposent une abstraction vis-à-vis des *qualités* des différents objets considérés. De ce fait, on peut donner un sens à la somme et à la différence de deux quantités d'une telle entité. C'est le cas par exemple de la longueur, où l'on fait abstraction de l'objet concret qui la porte pour simplement comparer son extension à celle d'autres objets concrets. De même, lorsque l'on verse deux verres d'eau dans une carafe, on identifie à de l'eau autant les entités de départ que d'arrivée, le changement est juste quantitatif.

A l'opposé, il existe des mesures pour lesquelles les opérations d'addition ou de soustraction n'ont pas de sens car il est impossible de procéder à cette identification entre les états de départ et d'arrivée. L'addition de la température de deux corps par exemple n'a pas de sens physique, on ne peut lui associer une transformation physique comme le mélange des liquides dans le cas du volume. Le seul attribut physique intéressant est qu'il fasse *plus* ou *moins* chaud, c'est un simple *ordre*, et la mesure est dite *purement ordinale* (1981 : 98-99).

De ce point de vue, la thermodynamique classique donne uniquement un sens ordinal à l'entropie⁸. L'équation (4), $\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$, permet uniquement de dire si un état est de plus grande ou de plus petite entropie. L'entropie n'est donc jamais définie de manière absolue, et par là même, l'addition de deux entropies ne peut avoir de sens physique. A l'inverse, la formule (7), $S = k \cdot \ln(W)$, entend définir l'entropie de manière absolue. Elle suggère donc la possibilité d'ajouter deux valeurs de l'entropie. Georgescu-Roegen s'oppose à une telle opération car il juge qu'elle ne correspond à aucune réalité physique sous-jacente (1981 : 146). Il est néanmoins possible de préserver le caractère ordinal de l'entropie en mécanique statistique dès lors qu'on ne définit S qu'à une constante près (Beard et Lozada 1999 : 108). Il ne s'agit donc pas là d'un critère permettant de rejeter la mécanique statistique, comme l'envisageait Georgescu-Roegen. Mais cela permet de souligner cette propriété importante de l'entropie.

On perçoit, à travers ces critiques envers la mécanique statistique, que Georgescu-Roegen rejette vivement toute les tentatives pour réduire les principes de la thermodynamique au mouvement des particules. On est donc amené à penser qu'il est plus proche de l'interprétation phénoméniste de ces principes, proposée entre autre par Ernst Mach. A cet égard, on peut déjà constater que Georgescu-Roegen adopte la conception de la science comme guidée par le principe d'économie, qui fait partie intégrante du phénoménisme de Mach (1981 : 27). De plus, dans ses différentes présentations de la loi de l'entropie il met avant tout l'accent sur le phénomène central sur lequel se construit la thermodynamique classique, à savoir que la chaleur ne passe d'elle-même que du corps chaud au corps froid (1981 : 129, 2006 : 70 et 193). Cela l'amène à parler de « l'essence phénoménologique de la loi de l'entropie » (1986 : 3).

Par ailleurs, il donne la plupart du temps une définition de l'entropie comme « une mesure de l'énergie inutilisable dans un système thermodynamique » (2006 : 68) et adhère ainsi plutôt à la conception du second principe héritée de Thomson, c'est-à-dire en terme de dégradation de l'énergie. Il est d'ailleurs symptomatique qu'il ne présente jamais, même brièvement, le concept d'entropie comme nous avons pu le faire plus haut, en montrant comment ce concept constitue en somme une généralisation abstraite du constat que la chaleur ne passe d'elle-même que d'un corps chaud à un corps froid. On pourrait mettre cela sur le compte de la

⁸ Georgescu-Roegen propose plutôt de parler de mesure *faiblement cardinale*, car la différence entre deux niveaux d'entropie a un sens physique de par la relation (4).

pédagogie, du moins pour les exposés brefs qui se trouvent dans ses différents articles. De même, Brunhes déclare, pour justifier sa préférence pour l'idée de dégradation de l'énergie, que « on a usé et peut-être abusé, pour une exposition élémentaire, de cette notion très difficile d'entropie » (1927 : 225-226). Néanmoins, cela reste inexpliqué dans le cas d'un exposé plus complet comme dans *The Entropy Law and the Economic Process*, où il prend par ailleurs le temps d'exposer les fondements de la mécanique statistique en détail (1981 : chap. 6). Cela ne facilite pas la compréhension des attributs épistémologiques de l'entropie, qui constituent l'objet d'une grande partie de l'ouvrage.

Dans une large mesure l'opposition entre le caractère réversible des lois de la mécanique et l'irréversibilité des phénomènes thermodynamiques est suggérée à Georgescu-Roegen par les controverses de la fin du XIX^e siècle. En ce qui concerne les points que nous allons aborder à présent, il fait preuve de plus d'originalité. Nous commencerons par nous intéresser à ce que Georgescu-Roegen nomme *l'indétermination entropique*, terme par lequel il entend le fait que : « [La loi de l'entropie] ne détermine ni quand (selon une horloge mécanique) l'entropie d'un système isolé atteindra un certain niveau ni exactement ce qu'il se passera. » (1981 : 12). En effet, la loi de l'entropie, sous la forme de l'équation (5), $\Delta S > 0$, prédit uniquement la croissance de l'entropie. Elle détermine la direction générale des processus. Mais, contrairement aux lois de la mécanique qui permettent de déterminer les caractéristiques du système considéré à chaque instant futur⁹, la thermodynamique ne dispose pas d'un tel pouvoir prédictif.

On peut trouver la source de cette indétermination dans la procédure même qui a vu naître le concept d'entropie, et en particulier son caractère anthropomorphique. En effet, on a souligné le fait que l'entropie est avant tout définie en référence aux cycles réversibles, c'est-à-dire à des transformations qui sont de pures fictions théoriques. Qu'il s'agisse de la diffusion de la chaleur ou du mélange d'un gaz, le calcul de l'entropie implique toujours l'imagination de transformations réversibles qui permettraient d'atteindre le même état. Au cours des transformations irréversibles, c'est-à-dire celles qui sont réellement suivies par le système, la variation d'entropie ne peut être mise en relation avec aucune autre variable du système, d'où l'affirmation d'Isabelle Stengers : « L'entropie a beau être une fonction d'état généralisée, [...] »

9 Certes, dans le cas où les équations différentielles en jeu ne sont pas linéaires, la résolution analytique peut ne pas être possible. Mais, d'une part cela ne concerne pas la mécanique pure, le caractère non linéaire apparaissant du fait d'interactions tels que des frottements, d'autre part la simple écriture de l'équation permet en général d'établir l'unicité de la solution et d'envisager des procédures d'approximation des solutions.

sa définition ne confère aucun pouvoir au physicien dès lors que le cycle n'est pas idéal. » (2003 : Vol.1, 207). Ce trait spécifique de l'entropie éclaire par ailleurs un autre aspect, qui classe cette fonction d'état parmi les plus étonnantes de la physique. Il s'agit de l'impossibilité, à ce jour, de concevoir un instrument de mesure de l'entropie (Georgescu-Roegen 1981 : 101). En effet, dès lors que la mise en relation de l'entropie avec d'autres variables nécessite l'imagination de transformations idéales différentes de celles que le système subit réellement, on peine à imaginer que cela soit possible un jour.

Mais la propriété la plus importante pour Georgescu-Roegen est vraisemblablement le caractère qualitatif des enseignements de la loi de l'entropie : « [La loi de l'entropie] marque la reconnaissance par [la physique] [...] qu'il y a un changement qualitatif dans l'univers. » (1981 : 10). Cet énoncé peut apparaître paradoxal si l'on considère la forme quantitative de la loi de l'entropie, donnée par l'équation (5). Mais la discussion qui précède, sur le caractère ordinal de l'entropie, nous rappelle que dans cette équation ce ne sont pas les quantités d'entropie qui comptent. Celles-ci sont toujours définies à une constante près, et c'est plutôt l'ordre, qui établit la supériorité de l'entropie à un instant ultérieur dans le temps, qui importe. Georgescu-Roegen propose de donner le nom de *loi d'évolution* à tout énoncé impliquant une variable ordinale E telle que $E_1 < E_2$ si l'observation de E_2 est ultérieure à celle de E_1 . Ainsi, il semble entendre l'idée d'un changement qualitatif à la fois comme la modification de la nature profonde de l'objet et comme l'impossibilité de retourner à quelque état précédent que ce soit.

Cette préoccupation, de voir dans la loi de l'entropie l'indicateur d'une transformation en profondeur de la nature et d'opposer à cela la mécanique comme une science des transformations superficielles, est déjà perceptible au début du XIX^e. Avant l'avènement de la thermodynamique, la gravitation apparaît déjà comme préservant l'intégrité du corps qui la subit, tandis que la chaleur transforme la matière (Prigogine et Stengers 1993 : 168). De même, il est clair dans l'exposé de Brunhes que le second principe a à voir avec la transformation qualitative de l'énergie, qui tend naturellement à passer d'une forme supérieure à une forme inférieure (Brunhes 1927 : 44). Si l'idée n'est donc pas neuve, elle prend chez Georgescu-Roegen un sens épistémologique plus profond en opposant deux conceptions de la science : l'une portée vers l'analyse des transformations superficielles, postulant une stabilité qualitative de son objet, à l'image de la mécanique ; l'autre cherchant à rendre compte des changements véritables, des transformations qualitatives de l'objet, en donnant la structure générale de ces transformations, à l'image de la thermodynamique (Georgescu-

Roegen 1981 : chap. 8). La perception d'une incompatibilité profonde entre ces deux conceptions est en fin de compte ce qui guide son ouvrage de 1971, et tout particulièrement son refus de la mécanique statistique :

« ... le sujet apparaît extrêmement important, car il touche au fait de savoir si le domaine phénoménal dans lequel notre connaissance est à la fois la plus riche et la plus irréfutable [, la physique,] soutient ou nie l'existence de lois d'évolution. C'est la raison pour laquelle j'ai senti la nécessité d'analyser en détail le raisonnement de la thermodynamique statistique même si pour de nombreux étudiants de sciences sociales cette analyse peut a priori sembler être une digression technique. » (Georgescu-Roegen 1981 : 169)

Georgescu-Roegen adopte donc une conception bien particulière de la thermodynamique. On peut synthétiser son propos en constatant qu'il met en exergue un système d'oppositions épistémiques, qui fait de la thermodynamique et de la mécanique des sciences irréconciliables. D'une part, la mécanique se caractérise par la *réversibilité* des trajectoires, la focalisation sur les aspects *quantitatifs* des transformations et le *déterminisme* absolu. De l'autre, la thermodynamique met en évidence l'existence de transformations *irréversibles*, qui modifient *qualitativement* le monde matériel et dont elle donne la direction générale tout en laissant une part d'*indétermination*.

Conclusion du premier chapitre

Au terme de ce premier chapitre, on a donc pu préciser la conception que Georgescu-Roegen se fait de la loi de l'entropie, tout en nous familiarisant avec les aspects historique, épistémologique et théorique qui entourent cette loi. L'émergence de la thermodynamique, depuis les travaux de Carnot, confirme l'idée de Georgescu-Roegen selon laquelle cette loi a une signification économique. Son caractère anthropomorphe repose en partie sur cette dimension économique, mais il se fonde aussi sur des aspects plus « naturels » dans la distinction entre les différentes qualités de l'énergie. On a aussi été amené à considérer les différentes interprétations qui ont pu être données à cette loi. Bien que le principe de dégradation de l'énergie avancé par Thomson et l'idée d'accroissement de l'entropie de Clausius soient utilisés de manière indistincte par Georgescu-Roegen, on a constaté qu'ils n'étaient pas équivalents, tant du point de vue philosophique que théorique. Georgescu-Roegen semble plutôt se placer dans la lignée de Thomson, tout comme Brunhes.

Mais la controverse la plus importante quant à l'interprétation du second principe, reste

celle qui oppose une conception phénoméniste de la thermodynamique, défendue par Mach, Ostwald ou Duhem, et l'interprétation mécaniste, initiée par Boltzmann avec son théorème-*H*, et qui prendra par la suite le nom de mécanique statistique. Même si des questions persistent sur ce point, le rejet de la mécanique statistique et l'adoption d'une conception proche du phénoménisme par Georgescu-Roegen apparaissent justifiés et cohérents. Il fonde ce choix sur une opposition radicale entre une mécanique traitant des phénomènes réversibles, de manière déterministe et sans prêter attention aux transformations qualitatives, tandis que la thermodynamique s'occupe des phénomènes irréversibles, impliquant des transformations qualitatives et une indétermination irréductible.

Mais, au-delà de ces deux branches de la physique, ce système d'oppositions se propose comme une grille de lecture plus générale des fondements épistémologiques de différentes disciplines. En particulier, c'est sur celle-ci qu'il entend fonder à la fois sa critique de l'économie standard et la nouvelle orientation qu'il envisage pour le renouvellement de la science économique, qui prendra par la suite le nom de bioéconomie.

Chapitre II

La loi de l'entropie et la science économique

Dans ce qui précède, on a à diverses reprises souligné le caractère économique de la loi de l'entropie. Néanmoins, le lien entre celle-ci et la science économique reste encore à préciser. C'est sur la base de la loi de l'entropie que Georgescu-Roegen entend proposer une orientation radicalement nouvelle à la théorie économique. Dans la suite, nous nous proposons donc d'analyser les traits essentiels de cette relation intime qu'il suggère entre le processus économique et la loi de l'entropie. Afin de structurer cette analyse on peut distinguer les enjeux proprement épistémologiques des enjeux environnementaux. Il s'agit d'identifier d'une part des réflexions qui s'appuient sur les caractéristiques épistémologiques de la loi de l'entropie, que nous avons mises en évidence ci-dessus. Dans ce cas, les réflexions renvoient aux objets habituels de la théorie économique, tels que les marchés et les comportements de consommation, et non à la matière et ses transformations. D'autre part, certaines analyses de Georgescu-Roegen se préoccupent plus directement des fondements matériels des activités économiques. Dans ce cas, c'est la signification physique de l'entropie qui est mobilisée.

Cette dichotomie sert avant tout de grille de lecture. Il ne s'agit pas de prétendre que chaque proposition de Georgescu-Roegen appartient strictement à l'une ou à l'autre de ces catégories. La plupart des propositions semblent en fait tenir un peu de ces deux aspects. Néanmoins cette grille de lecture permet de mettre en évidence un glissement dans l'appréciation des rapports entre la science économique et la loi de l'entropie proposée par Georgescu-Roegen. Lorsqu'il commence à s'intéresser assidûment à ces rapports à partir de la fin des années 60, il semble que ce soit avant tout du fait de préoccupations épistémologiques sur les fondements de la théorie néoclassique et sur une possible réorientation de ce programme de recherche. Mais peu à peu la signification écologique de la loi de l'entropie devient dominante dans ses écrits. Ce processus va de pair avec une prise de distance critique toujours plus importante à l'égard de la théorie néoclassique. L'ambition de réforme initiale se transforme en une ambition de révolution scientifique. Il propose alors les linéaments d'une nouvelle conception de la science économique, à laquelle il donne le nom de « bioéconomie ».

Pour rendre compte du rôle central qu'occupe la loi de l'entropie dans cette mutation progressive de la pensée économique de Georgescu-Roegen, nous débuterons ce chapitre par

l'étude des différents éléments de sa critique de l'économie standard. On considérera d'abord les enjeux épistémologiques de cette critique. Il sera alors nécessaire de préciser le sens qu'on peut donner à l'affirmation selon laquelle la théorie néoclassique est un analogue de la mécanique rationnelle. A partir de là, on évaluera la critique par Georgescu-Roegen des contraintes que cette analogie exerce sur la pensée économique. En ce qui concerne la dimension environnementale de sa critique, on considérera ses deux variantes. La première consiste à faire reposer sur le schéma pré-analytique reliant production et consommation l'omission totale des ressources naturelles dans l'analyse économique. La seconde dénonce quant à elle l'absence de considérations pour les transformations qualitatives de l'environnement. Il ressort de l'analyse de ces différents aspects une faiblesse de cette critique qui tend à faire reposer l'ensemble des défauts de la théorie néoclassique sur la seule analogie mécanique.

Ayant nuancé l'intérêt de l'opposition épistémologique entre mécanique et thermodynamique en ce qui concerne la critique de l'économie standard, on s'intéressera au cadre bioéconomique que Georgescu-Roegen propose comme paradigme alternatif. La justification du terme de bioéconomie apparaît clairement dès lors qu'on envisage le processus économique comme une continuation de l'activité biologique. Cette continuité est en particulier entretenue par le rôle que joue la loi de l'entropie dans les deux cas. Celle-ci permet d'envisager les structures biologiques ou économiques comme luttant pour la stabilisation de leur entropie aux dépens de leur environnement. Georgescu-Roegen fonde sa conception du rapport entre l'entropie et le vivant sur les travaux d'auteurs tels que Erwin Schrödinger et Ilya Prigogine. On mettra en évidence les ambiguïtés qui entourent le recours à de telles références. Malgré celles-ci, la conception entropique du processus économique apparaît comme un cadre pré-analytique cohérent et offre la perspective d'une science économique réellement attentive aux enjeux écologiques.

Pour finir, on approfondira les analyses de l'impact du processus économique sur les ressources naturelles que suggère le cadre bioéconomique, achevant ainsi la transition annoncée des enjeux épistémologiques vers les enjeux environnementaux. On considérera en premier lieu la formalisation simple que Georgescu-Roegen propose à l'égard de l'épuisement des ressources naturelles. Celle-ci présente en fait de nombreux problèmes conceptuels qui confortent l'idée d'une dimension avant tout pré-analytique du cadre bioéconomique. Des faiblesses théoriques semblables apparaissent dans l'idée d'une dégradation irréversible de la matière avancée par Georgescu-Roegen. Malgré cela, cette dernière thèse aura permis de faire

émerger un problème méconnu jusqu'alors par les économistes, alors même qu'il pourrait représenter un enjeu crucial à long terme.

II.1 La critique de l'économie standard : enjeux épistémologiques

Rappelons pour commencer que Georgescu-Roegen a apporté plusieurs contributions importantes à la théorie économique néoclassique. Celles-ci concernent notamment les théories du consommateur ou de la production, et lui valaient d'être reconnu comme un membre éminent de cette école, au moins jusqu'au milieu des années 60. Toutefois, dès ses débuts, ses travaux montrent une interrogation profonde sur les fondements de l'analyse néoclassique, et il proposa de nombreux programmes alternatifs au sein du courant dominant (Beard et Lozada 1999 : 45-46). Son interrogation le conduit à voir dans l'influence de la mécanique sur la théorie néoclassique l'une des causes des défauts qu'il perçoit dans celle-ci.

Les articles de Georgescu-Roegen à partir des années 70 rappellent en effet inlassablement comment les premiers auteurs néoclassiques, tels que Stanley Jevons, Léon Walras, Vilfredo Pareto ou Irving Fisher, ont eu l'ambition de s'inspirer de la mécanique pour fonder la science économique. Stanley Jevons (1835-1882) prétendait ainsi construire la « mécanique de l'utilité et de l'intérêt individuel » (Cité dans Georgescu-Roegen 2006 : 65). Georgescu-Roegen attribue cette influence à la fascination générale que la mécanique exerçait dans tous les champs de la connaissance, notamment à travers les œuvres de Laplace et les exploits d'Urbain Le Verrier. Mais il note qu'elle intervient alors même que la thermodynamique a déjà remis en question l'universalité de la mécanique en physique dans les années 1870. Malgré ce fait étonnant, il n'examinera pas de manière systématique les liens entre la théorie néoclassique et la mécanique. Les travaux ultérieurs de Philip Mirowski poursuivront les intuitions de Georgescu-Roegen (Mirowski 2001b : 1).

Dans son ouvrage *More Heat than Light*, Mirowski propose une analyse historique des conditions qui ont vu l'adoption de métaphores mécaniques par les premiers auteurs néoclassiques. Il recense un nombre important de références de la part de ces auteurs, qui laissent percevoir l'influence de la mécanique sur leurs travaux. Précisons qu'il s'agit avant tout des travaux concernant la théorie du consommateur. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que le formalisme de la mécanique s'étendra à la théorie de la production, par volonté de construire une théorie économique qui présente une symétrie formelle entre production et consommation (Mirowski 2001b : 355).

Mirowski propose de parler de proto-énergétisme pour désigner la conception de la mécanique qu'ont les auteurs néoclassiques. Ce proto-énergétisme intègre le concept d'énergie et sa loi de conservation, mais il se confine à la description des phénomènes mécaniques, et ne tient pas compte du second principe de la thermodynamique. Il se réduit donc formellement à un principe de conservation de l'énergie mécanique et à une loi de minimisation de l'énergie potentielle, sous contrainte si nécessaire. Pour cela, il recourt aux outils mathématiques que sont les fonctions d'état et les champs vectoriels. Les économistes, et en particulier Irving Fisher (1867-1947) dans sa thèse, raisonneront par analogie en assimilant l'utilité à l'énergie potentielle, et les utilités marginales aux forces qui déplacent le panier du consommateur dans l'espace des marchandises (Mirowski 2001b : 259). Le problème se réduit donc à la maximisation de cette utilité sous la contrainte budgétaire, mais le principe de conservation de l'énergie disparaît. De fait, il semble impossible de construire une quantité qui soit l'analogie économique de l'énergie cinétique (Mouchot 1998 : 307).

La métaphore est donc incomplète, tout comme l'est la compréhension exacte des contraintes qu'impose ce nouveau formalisme. Malgré leur prétention à dominer les autres sciences sociales en transformant l'économie politique en une « science physico-mathématique », comme le dit Léon Walras (1834-1910) (Cité dans Georgescu-Roegen 1977 : 14), les économistes néoclassiques ont eux-mêmes des lacunes dans ce domaine. Ceci ne manquera pas d'être remarqué par les physiciens et mathématiciens de l'époque. Hermann Laurent (1841-1908) tentera par exemple de montrer à Walras les conséquences mathématiques de l'existence d'une fonction d'utilité, et l'invitera à réfléchir à leur signification économique (Mirowski 2001b : 281-282). Ce faisant, il fait émerger des problèmes qui tiennent au réalisme de l'hypothèse d'une fonction d'utilité, mais ceux-ci ne seront réellement pris au sérieux par les économistes qu'à partir des années 30.

Ceci laisse penser que les connaissances des économistes en question n'étaient que partielles en ce qui concerne les mathématiques et la physique. De ce point de vue, l'étonnement de Georgescu-Roegen, vis-à-vis du fait que l'école néoclassique a pris la mécanique pour référence scientifique au moment même où celle-ci était remise en cause au sein de la physique, n'a pas lieu d'être. Il semble oublier le fait que les économistes néoclassiques étaient extérieurs à ce champ académique, et qu'il est donc peu probable qu'ils aient eu vent de cette révolution scientifique. S'il est vrai que la thermodynamique a connu une forme de vulgarisation, c'est avant tout le premier principe, celui de la conservation de l'énergie qui en a été l'objet, or celui-ci n'est pas porteur d'une remise en cause de la

mécanique. A l'inverse, le second principe ne connaîtra pas le même succès populaire, comme le souligne Brunhes, dont l'ouvrage entend justement combler ce manque (1927 : 8-9). Ce constat d'un déséquilibre dans la vulgarisation des deux principes de la thermodynamique est d'ailleurs sûrement valable encore aujourd'hui.

Georgescu-Roegen tente en somme de révéler les controverses épistémologiques opposant la mécanique et la thermodynamique à ceux qui ont poursuivi le programme de recherche néoclassique. Il entend ainsi dévoiler les défauts inhérents à ce dernier. Pour cela, il s'appuie sur la grille de lecture des oppositions épistémologiques synthétisées précédemment. Le premier inconvénient de « l'épistémologie mécaniste » est sa focalisation sur des phénomènes réversibles, objet central du débat sur les travaux de Boltzmann. Selon Georgescu-Roegen, cette propriété a été transmise à la théorie néoclassique, au sujet de laquelle il déclare : « Tout alors, se réduit à des mouvements pendulaires. [...] La réversibilité complète est la règle générale, exactement comme en mécanique. » (2006 : 88).

Cependant, il faut bien admettre qu'il explicite rarement de manière détaillée ce qui est réversible dans la théorie néoclassique et les conséquences analytiques de ce présupposé. En fait, il semble que ce soit là une préoccupation antérieure à ses écrits des années 60 sur les liens entre la loi de l'entropie et la théorie économique. Le problème épistémologique de la réversibilité apparaît en effet dans son article de 1950 intitulé « The theory of choice and the constancy of economic laws ». S'intéressant à la théorie du consommateur telle qu'elle est formulée à son époque, il constate que celle-ci postule l'invariance des préférences de l'individu, alors qu'une observation sommaire des comportements inviterait plutôt à penser qu'elles se modifient sous l'influence de l'expérience du consommateur. Il construit ensuite un modèle qui tente de rendre compte de cet hystérésis des préférences pour conclure que : « Cette irréversibilité [...] apparaît avec ce modèle comme étant le cas normal, tandis que la réversibilité est exceptionnelle. » (1966 : 179). Ce travail illustre bien les ambitions de réforme interne de la théorie néoclassique qui animent Georgescu-Roegen à cette époque (Ould Boye 2014 : 51).

Néanmoins, il n'est pas fait explicitement mention dans cet article de l'épistémologie mécaniste qui sous-tendrait la théorie du consommateur. Ce n'est que plus tard, dans une référence implicite à ce travail, que Georgescu-Roegen attribue l'absence de prise en compte des modifications du comportement du consommateur à la nature mécaniste de la théorie néoclassique : « Les fondations mécanistes de l'économie ordinaire se révèlent [...] par la

description conventionnelle du fonctionnement du marché qui suppose que les quantités échangées se déplacent réversiblement au gré des fluctuations réversibles de l'offre et de la demande. » (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 99). Dans l'état de notre investigation, il semble donc plutôt que cette explication est venue a posteriori pour intégrer les critiques initiales qu'il adressait à la théorie néoclassique. Le lien entre les problématiques de réversibilité dans la théorie du consommateur et dans la mécanique rationnelle demande encore à être explicité.

L'un des problèmes à cet égard est l'absence de prise en compte du temps dans la théorie néoclassique. Cette caractéristique, si elle est critiquable en soi pour une théorie qui entend rendre compte des échanges sur un marché, semble prévenir toute tentative de renvoyer la réversibilité du comportement de consommation à la réversibilité du mouvement. En effet, le formalisme de la théorie du consommateur entend seulement établir le panier de biens qui maximise l'utilité, mais ne nous dit jamais comment le consommateur se « déplace » vers ce panier de biens¹⁰. On peut d'ailleurs suggérer que c'est cette absence qui entraîne l'impossibilité d'établir un analogue de l'énergie cinétique, quantité impliquant la vitesse et donc la description du mouvement, et par là l'impossibilité d'un analogue de la conservation de l'énergie.

Enfin, on pourrait ajouter que Georgescu-Roegen montre justement avec son modèle qu'il est possible de dépasser la réversibilité du comportement de consommation tout en restant dans le cadre de la théorie néoclassique. Pour cela, il convient d'introduire des périodes successives de marché, et donc une prise en compte discrète du temps qui n'a rien à voir avec celle de la mécanique. Dans son modèle, les prix se modifient d'une période sur l'autre et l'équilibre du consommateur aussi. La question de la réversibilité ou de l'irréversibilité se résume alors à savoir si l'expérience du consommateur modifie ses préférences d'une période à l'autre ou non. Si l'on poursuit l'analogie avec la physique, la modification des prix correspond à une modification de la contrainte qui s'exerce sur le mouvement considéré. Mais l'irréversibilité n'a pas besoin de modification de ce type pour apparaître en mécanique. Il suffit, tout en considérant la même contrainte mécanique, d'introduire les frottements qui transforment l'énergie mécanique en chaleur, et impliquent donc une dégradation irréversible de l'énergie. Les deux problèmes, même s'ils usent de la même terminologie, semblent donc relativement distincts sur le plan conceptuel.

¹⁰ Quel sens pourrait-on d'ailleurs donner à ce déplacement ? Est-ce uniquement un déplacement mental ? Ou l'individu consomme-t-il vraiment ?

Il nous faut maintenant considérer une assertion assez proche, à savoir que l'analogie mécanique ne permet pas de rendre compte des transformations qualitatives qui affectent l'économie. Rappelant encore une fois la nature mécanique de la théorie néoclassique, Georgescu-Roegen note qu'elle « ne permet à aucun changement de laisser sa marque sur le processus économique, que le changement soit une sécheresse, une inflation, ou un krach financier » (1977 : 14). Cette idée, qu'il reprend régulièrement dans ses publications, semble suggérer l'existence de transformations à la fois qualitatives et irréversibles de l'économie, rendant floue la distinction entre ces deux aspects. Si l'on tente néanmoins d'isoler la réflexion de Georgescu-Roegen quant à la possibilité d'une prise en compte des transformations qualitatives, il apparaît que malgré sa dénonciation récurrente du dogme mécaniste c'est plutôt le formalisme mathématique qu'il juge impropre à une telle démarche.

Il développe extensivement cette idée dans son ouvrage de 1971 où il propose de distinguer les concepts arithmomorphiques et les concepts dialectiques. Les premiers sont ceux qui sont strictement identifiables, à l'image des nombres réels, et par là même peuvent être soumis à des manipulations logiques classiques. A l'inverse, les seconds se caractérisent par l'incertitude qui entoure leur définition et qui ne permet de tracer une ligne précise entre les entités qui correspondent à ce concept et celles qui n'y correspondent pas. Pour illustrer ce dernier cas, Georgescu-Roegen propose par exemple le concept de « vie », dont il est difficile de donner une définition assez précise pour que toutes les entités matérielles puissent être classées sans ambiguïté entre celles qui appartiennent au monde vivant et celles qui n'y appartiennent pas (1981 : 44-46). Nous ne souhaitons pas nous étendre plus ici sur ces considérations qui nécessiteraient de plus longs développements. Signalons simplement que pour Georgescu-Roegen la tendance à la mathématisation des sciences, à laquelle il donne le nom de « superstition arithmomorphique », est une impasse (1981 : 80). Et l'une des raisons, et c'est là que nous voulons en venir, en est que : « La difficulté indéniable à décrire le changement qualitatif provient d'une source : le changement qualitatif échappe à la schématisation arithmomorphique. » (1981 : 62-63).

Il semble donc que lorsqu'on en vient à la question des transformations qualitatives, ce n'est pas l'épistémologie mécaniste en elle-même qui est visée par Georgescu-Roegen, mais le mécanisme en tant que support de la mathématisation de la science économique. La distinction peut paraître d'autant plus difficile que l'idée que la science se doit d'être mathématique émerge précisément avec la mécanique. Cette dimension de la science moderne s'affirme avec ce qu'Isabelle Stengers propose d'appeler « l'événement lagrangien ». Lagrange,

de son propre aveu, entend en effet transformer la mécanique en une simple branche de l'analyse. Dans sa *Mécanique analytique*, il reformule les principes de la mécanique newtonienne dans une forme abstraite, forme qui acquiert une autonomie considérable vis-à-vis des phénomènes physiques dont elle entend initialement rendre compte (Stengers 2003 : Vol.1, 115).

Lorsque les économistes néoclassiques font référence à la mécanique rationnelle, il est donc probable qu'ils aient avant tout en tête le formalisme mathématique qui lui est associé. L'autonomie de ce dernier par rapport aux enjeux proprement physiques pourrait alors expliquer le caractère incomplet de l'analogie mécanique, qui omet en particulier un principe de conservation. Ceci ne remet pas en question la critique que Georgescu-Roegen adresse à la mathématisation de l'économie, au contraire, mais on précise ainsi les responsabilités quant à l'absence de prise en compte de changements qualitatifs. Ce n'est pas le mécanisme seul qui est responsable, comme il semble parfois le suggérer, mais plus largement les mathématiques, dont l'introduction en économie est historiquement permise par l'emprise de la philosophie mécaniste.

II.2 La critique de l'économie standard : enjeux environnementaux

Les critiques de Georgescu-Roegen envers la théorie néoclassique que nous avons considérées jusqu'à présent appartenaient à ce que nous avons qualifié plus haut « d'enjeux proprement épistémologiques ». On entend par là qu'ils considèrent les rapports entre la physique et l'économie avant tout sous l'angle des analogies et des échanges conceptuels. Mais les liens entre les deux disciplines sont aussi plus concrets, car toutes deux ont à faire à la matière et à ses transformations. Dans ce domaine, Georgescu-Roegen juge aussi que l'épistémologie mécaniste a eu une influence néfaste sur la pensée économique.

Le premier aspect de la pensée économique dont il attribue l'origine à l'épistémologie mécaniste est tout simplement l'absence de prise en compte des ressources naturelles dans la représentation de l'économie. Ainsi il note que : « ...rien de ce qui est intervenu n'a fait dévier la pensée économique de l'épistémologie mécaniste qui était déjà celle des ancêtres de la science économique orthodoxe. Preuve en est – et elle est éclatante – la représentation dans les manuels courants du processus économique par un diagramme circulaire enfermant le mouvement de va-et-vient entre la production et la consommation dans un système complètement clos. » (2006 : 65). On retrouve cette référence à une représentation circulaire

de l'économie dans la plupart de ses travaux à partir des années 70 (1977 : 14, 1981 : 2 ; Missemmer et Georgescu-Roegen 2013 : 99). Elle est emblématique de son tournant environnementaliste, de telles préoccupations n'ayant jamais été au cœur de ses travaux avant cette date (Ould Boye 2014 : 122). De ce point de vue, il est vrai que cette représentation circulaire n'est de toute évidence pas favorable à une prise en compte des relations entre les activités économiques et l'environnement naturel dans lequel elles s'inscrivent.

Néanmoins, il semble problématique de renvoyer cette schématisation de l'économie à l'influence de la mécanique rationnelle sur la pensée économique et à lui faire porter ainsi la responsabilité de l'absence de considérations pour les ressources naturelles, comme dans ce passage : « L'épistémologie mécaniste est responsable [...] de la complète ignorance du rôle des ressources naturelles dans le processus économique. » (1977 : 15). Cette interprétation n'est d'ailleurs jamais plus étayée que cela, si ce n'est par une analogie encore plus fragile : « En parfait accord avec les lois de la mécanique, on pourrait tout aussi bien inverser les flèches sur ce graphique-là, il représenterait toujours le même mécanisme. » (Missemmer et Georgescu-Roegen 2013 : 99). C'est le thème de la réversibilité qui revient ici à nouveau mais toujours sans une analyse qui aille au-delà d'une simple intuition.

Il serait nécessaire de construire la genèse de ce diagramme pour s'assurer qu'il n'a pas de lien avec l'influence qu'a eu la mécanique rationnelle sur la théorie néoclassique. Mais on peut déjà remarquer que les objets ne sont pas les mêmes. En ce qui concerne la mécanique rationnelle, son influence a porté principalement sur la théorie du consommateur, et seulement plus tard sur la théorie de la production. Or ce diagramme semble avant tout représenter la circulation. Il est étrange que Georgescu-Roegen ait persisté à qualifier ce schéma de « mécaniste », alors qu'en s'interrogeant sur ce qui « circule » dans celui-ci, il propose une explication beaucoup plus féconde nous semble-t-il : « Parce que la monnaie semble tourner en rond, une autre raison qui peut expliquer la conception circulaire du processus économique est le fétichisme monétaire caractéristique de la pratique des affaires. » (Missemmer et Georgescu-Roegen 2013 : 99).

Avec ce diagramme, on était encore quelque peu dans le domaine de l'analogie. Venons-en maintenant aux aspects strictement matériels. Georgescu-Roegen note que pour la théorie économique standard : « le processus économique n'induit pas de changement qualitatif et n'est pas affecté par le changement qualitatif de l'environnement dans lequel il est ancré. » (1981 : 2). En effet, il rappelle que si certains économistes, tels que Marshall, ont fait

référence aux différentes lois de conservation, de la matière ou de l'énergie, aucun d'entre eux ne s'est interrogé sur ce que le processus économique fait réellement à la matière ou à l'énergie. Mirowski précise que les lois de conservation ont d'abord incité les économistes néoclassiques à se détourner de la production sous prétexte que celle-ci ne soit qu'une illusion, dès lors que l'homme ne crée ni ne détruit rien (Mirowski 2001b : 332). Ils n'ont pu écarter ce domaine très longtemps, tant il s'agissait d'un enjeu important pour les économistes classiques qui les avaient précédés. Mais ils n'ont jamais fait attention à la différence qualitative entre la matière et l'énergie qui entrent dans le processus économique et celles qui sortent de ce même processus (2006 : 66-67).

Or, la loi de conservation de l'énergie n'est pas contradictoire avec la mécanique. C'est uniquement lorsqu'on prend en compte la transformation qualitative de l'énergie, c'est à dire le second principe, que l'on sort du domaine de la mécanique. Georgescu-Roegen juge que les économistes néoclassiques négligent l'importance de cet aspect matériel du processus économique, et, parlant des articles de Robert Solow sur les ressources naturelles, il estime qu'ils « fournissent un exemple pertinent pour élucider les conséquences du fait de concevoir le processus économique non comme une transformation thermodynamique, mais comme un système mécanique. » (1986 : 11). Cependant, lorsqu'il parle de « système mécanique », il ne peut s'agir de la même influence dont Mirowski retrace l'histoire. Celle-ci s'est certes transmise de la théorie du consommateur à la théorie de la production par volonté de créer une symétrie formelle entre ces deux domaines (Mirowski 2001b : 355). Mais cette théorie rend uniquement compte des choix du producteur, et ne s'intéresse pas du tout à la matérialité de la production. Or, dans le cas qui nous occupe, il s'agit précisément de savoir comment les économistes néoclassiques se représentent cette matérialité.

On serait alors plutôt tenter de croire que c'est l'asymétrie dans la vulgarisation des deux premiers principes de la thermodynamique qui empêche les économistes de percevoir les transformations qualitatives de l'environnement qu'entraînent les activités économiques. Le premier principe, qui peut laisser penser que l'action humaine ne transforme que superficiellement le monde, est largement connu du grand public, tandis que le second reste méconnu. Brunhes notait déjà avec étonnement : « Chose étrange ! Pendant longtemps l'industrie a paru ignorer le principe de la dégradation de l'énergie, et c'est l'industrie pourtant qui l'a suggéré ! » (1927 : 198). S'il y a donc « péché de mécanisme » (Ould Boye 2014 : 158), il n'a rien à voir avec l'importation du formalisme mathématique de la mécanique rationnelle par les premiers auteurs néoclassiques, mais touche plutôt à la difficile

vulgarisation du second principe qui laisse place aux interprétations plus optimistes du premier principe.

Notre analyse de la critique de l'économie standard par Georgescu-Roegen suggère donc qu'il a tenté de renvoyer tous les défauts qu'il percevait dans cette théorie à une cause unique : l'emprise de la philosophie mécaniste. Mirowski note d'ailleurs : « [Georgescu-Roegen est retourné] en Amérique et a découvert que la théorie néoclassique des prix avait pris un tournant qu'il trouvait curieux, voire répugnant, en se figeant dans une orthodoxie bourbakiste autour du modèle Arrow-Debreu. Il a passé les années 50 et 60 à s'interroger sur les causes de ce tournant malheureux, et décidé que le penchant pour le « dogme mécaniste » était une motivation majeure » (2001a : F475). Ce faisant, Georgescu-Roegen assimile de manière indiscriminée l'absence de considérations pour les effets d'hystérèse, les transformations qualitatives et les ressources naturelles à la seule épistémologie mécaniste. Ces affirmations sont peu convaincantes, ou en tout cas demanderaient à être étayées plus longuement. Le problème n'est pas tant que les critiques qu'il adresse à la théorie néoclassique sont infondées, mais précisément qu'il fait du mécanisme la cause unique. Ce travers est d'autant plus regrettable qu'il avance par ailleurs des explications qui semblent plus pertinentes et ne nécessitent pas de référence au « dogme mécaniste », par exemple dans sa critique de l'arithmomorphisme et du fétichisme monétaire.

Néanmoins la réflexion épistémologique qui l'a amené à réfléchir sur les oppositions radicales entre la mécanique et la thermodynamique, autour de la loi de l'entropie, n'aura pas été sans conséquences favorables. Cela l'amène en effet à développer une conception du processus économique fondée sur ses aspects proprement matériels.

II.3 La loi de l'entropie : du vivant à l'économique

La critique multiforme que Georgescu-Roegen adresse à la théorie néoclassique l'amène à prendre toujours plus de distance avec ce programme de recherche. Mais il ne se confine pas à la critique. Il propose lui-même une orientation nouvelle pour la science économique, à laquelle il donnera le nom de bioéconomie à partir de 1975. La loi de l'entropie va être l'un des piliers de sa construction théorique. Il s'agit pour lui de préciser son sens économique, et d'en tenir compte afin de réintroduire dans le champ de la science économique les transformations irréversibles et qualitatives, ou encore l'indétermination. Mais, si ces

dimensions épistémologiques sont encore importantes, c'est avant tout la dimension matérielle du processus économique qui va occuper de plus en plus de place dans les travaux de Georgescu-Roegen.

Pour comprendre comment la loi de l'entropie est perçue par Georgescu-Roegen comme le principe physique permettant d'ancrer les activités économiques dans leur contexte environnemental, il nous faut au préalable revenir à la question des rapports entre les organismes vivants et la loi de l'entropie. On a vu précédemment (I.3) que ces organismes avaient interpellé les scientifiques du XIX^e siècle par leur capacité à maintenir l'ordre qui caractérise leur structure. Certains sont allés jusqu'à émettre l'hypothèse qu'ils ne soient pas soumis à la loi de l'entropie comme les structures inanimées. Vraisemblablement la conception de l'entropie comme mesure du désordre sous-tendait cette hypothèse. L'organisme vivant étonne par sa capacité apparente à la lutter contre la tendance au désordre. Or, on a vu que cette interprétation de la loi de l'entropie comme une tendance au désordre est avant tout associée à la mécanique statistique de Boltzmann, même si la formule de Gibbs (I.3) permet aussi une telle interprétation dans le cadre de la thermodynamique classique. Le paradoxe du vivant ainsi formulé est donc ambigu en ce qui concerne l'interprétation de l'entropie sous-jacente, mais il laisse plutôt penser qu'il s'agit de la conception de Boltzmann, celle que Georgescu-Roegen rejette.

Cependant, l'idée qu'une loi de la physique établit aussi sûrement puisse être mise en défaut par une quelconque structure matérielle est bien vite apparue insoutenable. Pour rendre compatible le vivant et la loi de l'entropie on a d'abord constaté qu'un organisme vivant n'est pas un système isolé puisqu'il est continuellement traversé par un flux de matière et d'énergie. Si l'on considère le système isolé constitué de l'organisme et de son environnement, on peut décomposer la variation d'entropie du système en la somme des variations d'entropie de l'organisme et de son environnement, soit $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$. La loi de l'entropie impose alors $\Delta S > 0$, mais cela n'interdit pas $\Delta S_1 < 0$ du moment que $\Delta S_2 > -\Delta S_1$ (8). La diminution d'entropie pour l'organisme, assimilée dans l'interprétation de Boltzmann à une tendance à l'ordre, est donc possible si elle s'accompagne d'une dégradation entropique accrue dans l'environnement (Borel 1948 : 239).

Erwin Schrödinger (1887-1961) dans son livre *Qu'est ce que la vie ?*, paru en 1944, proposera une interprétation plus poussée de cette même question. Il s'interroge sur ce qui permet à l'organisme d'échapper ainsi à la décomposition. Il considère tout d'abord l'hypothèse selon laquelle la matière que l'organisme absorbe et rejette continuellement, tout en

conservant une quantité relativement constante de matière à l'âge adulte, jouerait ce rôle. Cette hypothèse est écartée suite au constat que sur le plan strictement matériel il y a identité entre ce qui entre dans l'organisme et ce qui en sort. Celui-ci ne peut donc en tirer quelque bienfait que ce soit. Il en est de même pour l'énergie qui traverse le corps, si l'on fait abstraction de la qualité de celle-ci. A l'âge adulte, le bilan énergétique du corps est nul et le corps n'accumule donc pas d'énergie qui pourrait expliquer sa résistance à la dégradation. Schrödinger propose alors une nouvelle interprétation, à savoir que le corps se nourrit « d'entropie négative » (Schrödinger 1993 : 171-172). Une production importante d'entropie $\Delta S > 0$ a perpétuellement lieu au sein de l'organisme. Pour se maintenir à un niveau d'entropie stable, il lui faut donc se débarrasser de cette entropie en la rejetant dans son milieu. Ce rejet d'entropie justifie pour Schrödinger l'emploi du terme « entropie négative », puisque du point de vue de l'organisme on peut dire qu'il absorbe $-\Delta S$ depuis son environnement.

L'interprétation de Schrödinger est l'une des principales sources d'inspiration de Georgescu-Roegen en ce qui concerne les rapports entre l'entropie et le vivant (1981 : 192, 281, 2006 : 71, 98). Cette référence paraît pourtant doublement problématique. Tout d'abord, l'interprétation de Schrödinger se fonde sur une conception statistique de l'entropie, celle-là même que Georgescu-Roegen refuse radicalement. Schrödinger va jusqu'à manipuler l'équation (7) pour la mettre sous la forme $-S = k \cdot \ln\left(\frac{1}{w}\right)$, et affirme ainsi que l'entropie négative est une mesure de l'ordre et que « le mécanisme grâce auquel un organisme se maintient stationnaire à un niveau assez élevé d'ordre [...] consiste réellement en ce qu'il absorbe continûment de l'ordre, à partir du milieu environnant » (Schrödinger 1993 : 176). De plus, cette interprétation est établie par Schrödinger sur une petite dizaine de pages et apparaît plutôt comme une hypothèse. Dans les éditions ultérieures, il rapporte que cette partie de son ouvrage a été reçue avec « doute et opposition par des collègues physiciens » (Schrödinger 1993 : 177). Par ailleurs, il admet que son interprétation n'est pas celle d'un spécialiste de la biologie, ni de la thermodynamique¹¹ (Schrödinger 1993 : 33). Il n'est donc sûrement pas très avisé pour Georgescu-Roegen de parler de « l'autorité de Erwin Schrödinger » pour appuyer son interprétation du rôle de l'entropie pour les organismes vivants (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 105).

Si le concept « d'entropie négative » est donc à utiliser avec précaution, il faut noter que

11 Sa spécialité en tant que physicien est la mécanique quantique. Il a laissé son nom à l'équation fondamentale du comportement des systèmes quantiques ainsi qu'à l'expérience de pensée dite du « chat de Schrödinger ». S'il est une autorité scientifique c'est donc avant tout dans ce domaine.

Georgescu-Roegen ne l'utilise pas et lui préfère les termes de « basse » et « haute » entropie. Son interprétation de l'hypothèse de Schrödinger est alors que « tout organisme s'efforce sans cesse de compenser sa propre dégradation entropique continue en assimilant de la basse entropie (néguentropie) et en rejetant de la haute entropie » (2006 : 98). Ce faisant, il ne reprend donc pas à son compte l'idée que la vie se nourrisse d'entropie négative. Mais il lui substitue une conception légèrement différente dans laquelle la vie se nourrit de « basse entropie » (1981 : 192). La référence à Schrödinger doit alors plutôt être comprise comme une adhésion à sa démonstration que ni la matière ni l'énergie en tant que tels ne peuvent être le principe de la lutte du vivant contre la dégradation, et que seul l'entropie peut jouer ce rôle. Mais pourquoi trouve-t-il nécessaire de distinguer la « basse » et la « haute » entropie ? Il nous semble qu'il faut entendre ces adjectifs comme décrivant la capacité d'une quantité de matière ou d'énergie à se dégrader. Cette capacité est grande pour les matières de « basse entropie », mais elle est faible pour celles de « haute entropie ». La basse entropie est donc nécessaire à la vie. Si on considère le système formé de l'organisme et des matières qui le traversent alors la diminution de l'entropie de l'organisme pourra être d'autant plus grande que l'augmentation d'entropie des matières sera importante, d'après l'inégalité (8). Cette formulation en terme de basse et haute entropies est donc, selon nous, en tout point équivalente à celle qui affirme que l'organisme ne stabilise son entropie qu'aux dépens d'une augmentation d'entropie de son milieu.

Les travaux plus récents sur la thermodynamique des états stationnaires de non équilibre, dont Ilya Prigogine (1917-2003) est l'un des contributeurs les plus reconnus, permettent de préciser la nature des phénomènes en jeu. Selon Prigogine, la tendance au désordre que traduit la loi de l'entropie est pertinente avant tout lorsque le système est à proximité de l'état d'équilibre thermodynamique, c'est à dire de l'état où matière et énergie sont répartis de manière uniforme. Mais si l'on considère un système ouvert, c'est-à-dire traversé par un flux de matière et d'énergie, alors ce flux peut maintenir le système éloigné de l'équilibre tout en stabilisant son entropie. On dit que le système est en *état stationnaire de non équilibre*. Prigogine montre, à l'aide de plusieurs expériences, que des formes matérielles structurées peuvent apparaître dans ces conditions. Il parle alors de *structures dissipatives* car ces dernières ne peuvent se maintenir que grâce à la dégradation entropique du flux de matière et d'énergie qui traverse le système. Dès que celui-ci cesse, elles disparaissent (Prigogine 1972 : 552). Ces nouveaux comportements thermodynamiques permettent de rendre compte des phénomènes du monde vivant. Diverses expériences montrent ainsi que la

synthèse de certaines molécules caractéristiques du vivant s'opère selon ces principes. Prigogine retourne ainsi l'interrogation historique sur le rapport du vivant aux lois du monde inanimé et prétend que « l'introduction des structures dissipatives [...] nous permet d'espérer que dans ce qu'elle a d'essentiel la vie est déductible des "premiers principes" » (Prigogine 1972 : 562).

Cette nouvelle conception du vivant en termes de structure dissipative est tout à fait cohérente avec la proposition Georgescu-Roegen selon laquelle la vie se nourrit de basse entropie. En effet, la notion de basse entropie renvoie au potentiel de dégradation entropique d'une ressource, c'est-à-dire à son éloignement de l'état d'équilibre. La basse entropie assimilée par l'organisme permet donc à celui-ci de se maintenir loin de l'équilibre et d'atteindre un état stationnaire de non-équilibre dans lequel les structures dissipatives peuvent apparaître. Il n'est donc pas étonnant que plus tard Georgescu-Roegen est fait sienne cette nouvelle terminologie introduite par Prigogine (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 105). Il convient néanmoins d'ajouter que, si l'exposé de Prigogine s'appuie en général sur les outils de la thermodynamique classique, où l'entropie apparaît avant tout comme une fonction d'état (Prigogine 1996), lorsqu'il passe dans le domaine de l'interprétation il se réfère abondamment au principe d'ordre de Boltzmann. Ainsi, bien que le concept de structure dissipative ait un sens en thermodynamique classique, il est aussi marqué par l'interprétation de Boltzmann. Son adoption par Georgescu-Roegen pourrait donc être contradictoire avec son refus catégorique de la mécanique statistique.

Malgré cette ambiguïté, il semble que la théorie des structures dissipatives de Prigogine soit en mesure d'éclairer une autre facette de l'entropie à laquelle tient Georgescu-Roegen, celle de l'indétermination entropique (I.6). Prigogine note en effet que l'apparition des structures dissipatives semble reposer sur des fluctuations du système au niveau microscopique qui ont un caractère aléatoire. Dans un système proche de l'équilibre ces fluctuations se résorbent sans pouvoir donner lieu à une structure macroscopique. Mais dans un système maintenu dans un état stationnaire de non équilibre par un échange de matière et d'énergie avec son environnement, ces fluctuations peuvent subir un phénomène d'amplification jusqu'à former un structure macroscopique stable, c'est-à-dire une structure dissipative (Prigogine 1972 : 552). Il y a donc un jeu, entre l'aléa au niveau microscopique et les conditions macroscopiques de non-équilibre, qui permet l'apparition de ces structures. Ceci fait dire à Prigogine que « le hasard et la nécessité coopèrent » (Prigogine 1972 : 562).

Si l'accroissement de l'entropie est donc une loi fondamentale qui structure le rapport des êtres vivants à leur environnement, elle n'en laisse pas moins une place importante à l'aléa. Ce constat fait écho à la remarque de Georgescu-Roegen selon laquelle l'équation (5), $\Delta S > 0$, prédit uniquement la croissance de l'entropie, c'est-à-dire qu'elle détermine la direction générale des processus. Dans cette direction plusieurs trajectoires sont possibles et mènent à différents états futurs. Pour Georgescu-Roegen, qui reprend sur ce point une remarque de Ostwald, « c'est par vertu de cette liberté qu'un organisme vivant peut poursuivre le but de sa vie » (1981 : 194). Il entend par là réintroduire une forme de liberté dans le développement des organismes vivants, alors que l'épistémologie mécaniste ne peut aboutir, selon lui, qu'à un déterminisme total, incompatible avec la diversité des phénomènes du vivant.

Mais, dans les différentes orientations qui lui sont offertes, l'organisme vivant ne fait pas simplement un choix qui implique sa propre structure. Par la relation étroite que tout phénomène vivant suppose avec l'environnement inanimé, ce choix implique aussi les états futurs de l'environnement lui-même. Les organismes vivants ne mettent aucunement en défaut la loi de l'entropie, mais ils compensent la stabilisation entropique de leur structure par la dégradation entropique de leur milieu, de sorte qu'au niveau global l'entropie croît bel et bien. Si le vivant ne saurait altérer le sens de l'évolution entropique, on peut donc se poser la question de sa capacité à en affecter la vitesse. Les réponses apportées par Georgescu-Roegen à ce problème sont diverses et contradictoires. Il affirme dans un premier temps que les expériences de laboratoire tendent à laisser penser que la présence de la vie est un facteur d'accélération de la dégradation entropique d'un système isolé (1981 : 194, 2006 : 71). Mais il lui arrive aussi de prétendre que certains organismes ralentissent la dégradation entropique, en particulier les végétaux qui évitent la dissipation d'une partie du rayonnement solaire en chaleur (2006 : 98). Il semble en fait qu'il n'y ait pas de réponse définitive à cette question.

Il se pourrait que la question ne soit pas la bonne. Telle qu'elle est posée par Georgescu-Roegen, celle-ci revient à comparer le système contenant un organisme vivant avec l'hypothétique système où celui-ci serait absent. Il semble plus pertinent de s'interroger sur les différents états du système pour différents modes de vie d'un même organisme. Il apparaît alors clairement que l'organisme peut entraîner différents régimes entropiques, selon le mode d'intégration dans son environnement. En tant qu'être humain, il est ainsi toujours possible de choisir entre brûler ou ne pas brûler une quantité donnée de charbon, et chaque terme du choix donne lieu à une dégradation entropique différente. Encore s'écarte-t-on avec cet exemple de la préoccupation purement biologique, ce qui nous amène à considérer la spécificité de

l'espèce humaine dans le schéma théorique dessiné jusqu'ici.

Pour Georgescu-Roegen, cette spécificité tient au fait que l'homme est la seule espèce qui fasse dépendre sa prospérité d'outils qu'il façonne lui-même. Ces outils, que l'économiste rassemble sous le nom de « capital », lui apparaissent comme de véritables organes qui s'ajoutent aux organes biologiques de l'homme. Reprenant une terminologie suggérée par Alfred Lotka (1880-1957), il parle d'*instruments endosomatiques* pour désigner les organes dont l'individu est doté à la naissance, et d'*instruments exosomatiques* pour ceux qui sont extérieurs à son corps. Il entend ainsi montrer la continuité existant entre le processus économique et le processus biologique, tout en soulignant la spécificité du développement des sociétés humaines qui se fonde sur l'évolution exosomatique (1981 : 307). Cette relation étroite qu'il établit entre les problématiques biologique et économique justifie l'adoption du terme de bioéconomie pour la nouvelle conception de la science économique qu'il propose.

De ce point de vue, le rapport entre le processus économique et la loi de l'entropie est donc semblable à celui qui unit cette dernière et les processus vivants. Le processus économique a pour but de lutter contre la dégradation entropique des organes tant endosomatiques qu'exosomatiques. Il recourt pour cela à la dégradation entropique de son environnement matériel et énergétique. Comme pour le processus vivant, « 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* » (2006 : 67). Georgescu-Roegen reproche à l'économie standard de ne pas avoir perçu cette distinction qualitative entre ce qui entre dans le processus économique et ce qui en ressort. C'est la reconnaissance de celle-ci qui permet de saisir l'influence des activités économiques sur l'environnement. Comme dans le cas des organismes vivants, il ne faut pas se laisser aller à l'illusion que l'homme, de par sa capacité à structurer la matière, parvient à se soustraire à la loi de l'entropie. Pour obtenir une feuille de cuivre, de basse entropie, à partir du minerai, de haute entropie, il lui faut nécessairement dégrader de grandes quantités d'énergie, de sorte que la diminution d'entropie pour le cuivre est plus que compensée par la hausse d'entropie liée à cette dégradation d'énergie (1981 : 279).

Par ailleurs, la reconnaissance de la continuité du processus économique vis-à-vis du processus biologique permet de superposer les réflexions précédemment menées quant aux rapports avec la loi de l'entropie. Ainsi les structures matérielles dont dépend le mode de vie moderne, tels que les habitations ou les véhicules, sont des structures dissipatives qui ne peuvent être maintenues en état de fonctionnement qu'à la condition d'un échange continue de

matière et d'énergie avec l'environnement, ce qui entraîne une dégradation entropique de celui-ci. Mais cette évolution entropique reste dans une large mesure indéterminée. En dernier ressort, il revient aux hommes de choisir qu'elle sera la trajectoire exacte de cette évolution parmi l'ensemble des futurs possibles. Selon les choix qui sont faits, la vitesse de la dégradation entropique peut être plus ou moins grande. Ces quelques éléments fournissent donc une grille de lecture des rapports entre les structures sociales qui affectent les choix individuels et collectifs, les fondements matériels du processus économique et l'évolution de l'environnement naturel.

On peut encore faire deux remarques. Tout d'abord, il convient de noter la circularité du chemin qui a été suivi jusqu'ici. Partant, avec Carnot, d'une interrogation sur la machine à vapeur, dont nous avons montré la dimension économique, nous sommes passés à une loi décrivant l'évolution du monde matériel inanimé. De là, on a dépassé l'antinomie apparente du vivant et de l'entropie, pour montrer l'importance de cette dernière pour le premier. Et pour finir, nous avons considéré le lien de continuité unissant les processus biologiques et le processus économique, pour conclure à la nature entropique de celui-ci. La loi de l'entropie semble donc nous mener de l'économique à l'économique. Il ne faudrait pas en conclure qu'entre Carnot et Georgescu-Roegen, il n'y a pas eu de nouveauté sensible. Entre temps, la loi de l'entropie a étendu son domaine de pertinence dans l'espace (de la machine à vapeur à l'univers), dans le temps (du temps de la production au devenir lointain) et dans les phénomènes (de la diffusion de la chaleur à celle de la matière). Mais surtout, en considérant les rapports qu'entretient la loi de l'entropie avec le processus économique dans la continuité de ceux qui l'unissent aux processus biologiques, Georgescu-Roegen suggère que celle-ci conditionne la préservation de l'espèce humaine (1981 : 277).

Ce choix de la thermodynamique et de la biologie comme nouveaux référents scientifiques pour le renouvellement de la pensée économique est caractéristique de la position épistémologique adoptée par Georgescu-Roegen. Comme le remarque à juste titre Antoine Missemer, pour Georgescu-Roegen « le choix des référents scientifiques ne doit pas tenir lieu d'arbitraire, mais être la conséquence des observations sur la nature des processus » (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 84). Selon Georgescu-Roegen, l'épistémologie mécaniste a été adoptée comme référent par la théorie néoclassique du fait du prestige scientifique dont elle bénéficiait à l'époque. Il propose, à contrario, de se fonder sur la similitude des phénomènes biologiques et économiques pour choisir les nouveaux référents de

sa bioéconomie. Le phénomène étudié doit conditionner le cadre théorique adopté, plutôt qu'être modelé par une théorie qui lui est étrangère. A nouveau, on perçoit l'influence du phénoménisme de Mach, qui suggère la priorité du phénomène sur la théorie.

II.4 L'épuisement des ressources énergétiques

La conception bioéconomique des activités humaines proposée par Georgescu-Roegen apparaît dans ce qui précède comme un nouveau cadre pré-analytique (Cleveland et Ruth 1997 : 204). On entend par là qu'elle constitue avant tout un nouveau schéma permettant de se représenter globalement les relations entre l'homme et son environnement. Il s'agit de nouvelles « lunettes » permettant de poser un regard différent sur les activités économiques. La réflexion épistémologique a reconnu, à la suite des premières intuitions de Pierre Duhem, l'importance de ce type de schéma intellectuel, qui imprègne les faits que l'on se propose d'observer. Si le phénomène doit suggérer le cadre théorique approprié, il est clair qu'en retour ce cadre façonne notre perception du phénomène. En ce qui nous concerne, les rapports entre l'entropie et le processus économique dessinent une perspective de coévolution des sociétés humaines et de leur environnement matériel. Ils suggèrent ainsi un renouvellement des interrogations sur les conditions de la prospérité à long terme de ces sociétés. Dans le même temps, il importe de circonscrire la portée de ce cadre théorique. Par son éclairage très général, il ne permet certainement pas de rendre compte dans le moindre détail des problèmes qu'il suggère.

On se propose dans la suite d'explorer plus en détail l'une des questions centrales du cadre bioéconomique, à savoir celle du possible épuisement des ressources matérielles et énergétiques sur lesquelles se fondent les sociétés industrielles développées. La question n'est assurément pas neuve. Dès le milieu du XIX^e siècle, la dépendance nouvelle aux énergies fossiles questionnait les économistes, tels que Jevons dans son ouvrage *The Coal Question*. Mais la loi de l'entropie révèle de manière plus absolue, selon Georgescu-Roegen, les limites physiques auxquelles fait face le développement économique. Pour évaluer la pertinence de cette analyse, il convient néanmoins de distinguer les enjeux qui portent sur la matière et ceux qui portent sur l'énergie. Jusqu'à maintenant, on a eu tendance à perdre de vue cette distinction, et dans les premiers travaux de Georgescu-Roegen celle-ci n'est pas claire. C'est à partir de ce flou qui entoure la relation de l'entropie à la matière et à l'énergie qu'il développera sa réflexion sur l'importance de la matière pour l'espèce humaine. Ce point sera

abordé dans la section suivante et on commence par traiter le cas des ressources énergétiques dans la section présente.

Pour Georgescu-Roegen, si la loi de l'entropie est si importante dès lors que l'on s'intéresse aux ressources naturelles, c'est parce qu'elle est l'expression la plus rigoureuse de la rareté de ces dernières. Celle-ci s'exprime par le fait que l'accroissement de l'entropie est irréversible, c'est-à-dire qu'une « quantité donnée de basse entropie ne peut être utilisée par nous qu'une seule fois » (1981 : 278). Il convient, selon lui, de distinguer cette forme de rareté de celle qui est associée à la terre ricardienne. Cette dernière est rare au sens où elle est limitée, mais sa surface reste constante¹². A l'inverse, une fois qu'un morceau de charbon a été consommé, l'énergie chimique utilisable qu'il contenait a été irréversiblement transformée en énergie thermique inutilisable. Une transformation qualitative du milieu matériel dans lequel est ancré le processus économique a donc bien eu lieu.

Cette dégradation irréversible de l'énergie, qui est une facette de la loi de l'entropie, semble donc indiquer qu'à long terme toutes les ressources énergétiques sur lesquelles se fondent les sociétés humaines sont destinées à s'épuiser. Mais ce verdict est trop général pour avoir une portée analytique précise, il est donc nécessaire d'étudier plus en détail les différents aspects de ce processus de dégradation. Pour cela, il convient de distinguer les énergies qui se présentent sous la forme de stocks terrestres, tels que le pétrole ou l'uranium, et celles qui proviennent du flux solaire qui atteint la surface de la Terre. La question de l'épuisement se pose avant tout pour les stocks car il dépend directement de l'activité humaine de les transformer plus ou moins vite en des formes inutilisables d'énergie. Au contraire, la quantité d'énergie reçue sur Terre via le flux solaire ne dépend aucunement de cette activité.

Pour traiter de la question de l'épuisement des stocks terrestres d'énergie, Georgescu-Roegen s'appuie sur un formalisme relativement simple. Il suggère de noter S le stock actuel de basse entropie terrestre et r le taux d'épuisement annuel moyen. Il en conclut qu'après $\frac{S}{r}$ années le stock terrestre sera épuisé et que « tel sera aussi le nombre d'années au bout desquelles la phase industrielle de l'évolution de l'humanité prendra forcément fin » (1981 : 304, 2006 : 79). La sévérité du verdict semble quelque peu inappropriée à la simplicité apparente du formalisme¹³. Outre ce manque de précaution avec l'interprétation de ces

12 La terre est ici associée à la surface qu'elle recouvre et il est fait abstraction de sa capacité à supporter des végétaux. On ne tient donc pas compte de l'épuisement rapide des terres arables, qui du point de vue théorique n'est pas irréversible au même sens que la dégradation de l'énergie.

13 Les systèmes dynamiques à plusieurs centaines d'équations du rapport du Club de Rome de 1972 sembleraient bien superflus, pour arriver à une conclusion semblable.

quelques équations, le formalisme de Georgescu-Roegen semble inexact sur un plan plus conceptuel.

La définition du stock S de basse entropie pose en effet plusieurs problèmes. Tout d'abord le symbole S est inadapté car il laisse penser que Georgescu-Roegen désigne par-là l'entropie du système terrestre. C'est ce qui justifie la critique de Beard et Lozada selon laquelle, d'après les réflexions de Georgescu-Roegen lui-même, il n'y a pas de sens à définir l'entropie dans un sens absolu (Beard et Lozada 1999 : 101-102). En effet, l'entropie d'un système est une variable ordinale qui n'est toujours définie qu'à une constante près. Mais Beard et Lozada sont trompés par l'adoption du symbole S . Georgescu-Roegen n'entend pas définir l'entropie terrestre, mais le *stock de basse entropie terrestre*. D'un point de vue intuitif, ces deux variables ne peuvent être les mêmes puisque la première croît tandis que la seconde décroît. Cette remarque n'est qu'intuitive, car la notion de stock de basse entropie terrestre ne semble pas se prêter à une quantification. Dans la section précédente, on a explicité le sens du concept de basse entropie comme une structure qui est éloignée de l'équilibre thermodynamique. Elle n'est donc basse que *relativement* aux états ultérieurs qui pourraient l'acheminer vers l'équilibre thermodynamique. Mais si l'on entend quantifier la basse entropie il convient de définir un seuil strict et absolu, ce qui n'aurait pas de sens.

On peut soulever deux autres objections à l'égard de la définition d'un stock absolu des ressources terrestres. Tout d'abord, des quantités importantes d'énergie utilisable se trouvent dans de nombreuses matières présentes en grande quantité à la surface de la Terre. Le problème de la mobilisation de ces énergies à des fins économiques dépend des possibilités techniques. Ainsi, Georgescu-Roegen note lui-même que si la fusion nucléaire de type deutérium-deutérium pouvait être maîtrisée, elle rendrait mobilisable des quantités astronomiques d'énergie utilisable (2006 : 133, 158). Si on en tenait compte dans l'évaluation de S , en supposant qu'on puisse donner un sens à cette quantité, on aboutirait nécessairement à une valeur de $\frac{S}{r}$ qui ne rendrait pas du tout compte des contraintes énergétiques qui s'exercent sur l'économie. Néanmoins il ne faudrait pas en conclure que ce déterminisme technologique est une conséquence du caractère anthropomorphique de la notion d'énergie utilisable, comme le suggèrent certaines critiques des travaux de Georgescu-Roegen (Young 1991 : 177). Le caractère anthropomorphique se situe à la jonction des préoccupations économiques et naturelles (I.3). Elle ne repose donc pas sur le niveau technique d'une société. Ici l'adjectif « utilisable » entraîne une confusion qui nécessiterait l'introduction d'un concept nouveau pour désigner l'énergie *techniquement utilisable*.

Mais même ce dernier concept serait encore inadapté pour décrire le plus précisément possible les ressources que l'économie peut espérer mobiliser. Une nouvelle distinction est suggérée par les travaux ultérieurs de Georgescu-Roegen (2006 : 100). Il distingue les énergies accessibles des énergies utilisables, et on pourrait préciser : techniquement utilisables. Cette distinction se fonde sur le fait qu'il est nécessaire de dépenser une certaine quantité d'énergie pour pouvoir extraire de la croûte terrestre les matières énergétiques. Sur le plan économique une telle opération n'a de sens que si la quantité d'énergie obtenue par ce procédé est plus grande que celle qui a été dépensée. Dans ce cas, on parle d'énergie accessible. Précisons que cette définition dépend à nouveau du niveau technologique d'une société. Elle est donc une mesure relative de la contrainte énergétique qui s'exerce sur le processus économique. Néanmoins elle semble plus pertinente pour envisager le problème de l'épuisement des ressources terrestres. Georgescu-Roegen lui-même modifie par la suite la définition de S en posant : « soit S la quantité réelle des ressources accessibles de la croûte terrestre » (2006 : 126). Cependant, il ne tient pas compte du caractère relatif de S puisqu'il le considère constant dans le temps, pour conclure à nouveau à la détermination d'une « durée maximale de l'espèce humaine ».

L'ambition initiale de Georgescu-Roegen, de proposer une mesure absolue de la dot énergétique terrestre de l'espèce humaine et d'en inférer un principe d'épuisement en un temps fini, semble donc problématique. On peut penser qu'il surestime ici les capacités analytiques de sa conception entropique du processus économique. Ceci conforte notre analyse selon laquelle cette conception représente avant tout un cadre pré-analytique pour penser les fondements matériels des sociétés humaines. Tout en restant dans ce cadre, il convient de développer des outils analytiques plus précis pour pouvoir se représenter les conditions actuelles et futures de la prospérité. Cette démarche n'est d'ailleurs pas étrangère à celle qu'adopte Georgescu-Roegen par endroits. Ainsi le concept d'énergie accessible débouche naturellement sur le celui de Retour sur Investissement Énergétique (EROI en anglais), c'est-à-dire le rapport de la quantité d'énergie obtenue sur celle dépensée pour une technique donnée d'extraction. Celui-ci constitue un indicateur intéressant pour comparer les différentes techniques actuellement utilisées, ainsi que pour envisager les évolutions futures des contraintes énergétiques qui s'exercent sur le processus économique (Fizaine et Court 2015). De même, Georgescu-Roegen proposera des tableaux flux/fonds comme outils d'analyse globale des technologies (Georgescu-Roegen 1979).

Derrière la question de la finitude des ressources terrestres de basse entropie, Georgescu-Roegen entendait montrer l'asymétrie importante entre celles-ci et le flux d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre. A l'inverse des énergies terrestres, l'énergie solaire lui apparaît comme une source pérenne d'approvisionnement, même si elle aussi s'épuisera à l'échelle de quelques milliards d'années. Il insiste donc en général sur la nécessité de la substituer aux énergies terrestres dans tous les cas où cela est possible (2006 : 81, 147). Néanmoins il se montrera toujours critique de ceux qui pensent que l'énergie solaire est une alternative qui ne pose aucun problème. L'une des raisons de cette posture est son sentiment d'une insuffisance des technologies disponibles qui ne permettent pas de fournir plus d'énergie que leur production n'en consomme. L'autre raison est le caractère intensif en matière de la captation de l'énergie solaire. Or, pour Georgescu-Roegen, la matière est une ressource cruciale pour l'espèce humaine.

II.5 Entropie et matière

La réflexion de Georgescu-Roegen sur les liens entre l'entropie et la matière a beaucoup évolué au cours de son œuvre. Dans un premier temps, il considère avant tout la loi de l'entropie comme synonyme de la dégradation de l'énergie et la question de la matière n'apparaît pas (1981 : 129). Par la suite, malgré son refus de la mécanique statistique il adopte une conception de l'entropie en tant que tendance au désordre. C'est dans ce cadre qu'il envisage le vivant et l'économique comme des processus luttant contre cette tendance. La matière et l'énergie apparaissent alors toutes les deux sujets à une dégradation dont rend compte la loi de l'entropie (1981 : 279, 2006 : 67, 96). Sous cette forme rien n'empêche de penser que la dégradation d'une quantité importante d'énergie permette de restituer toute la matière sous sa forme ordonnée. C'est pour s'opposer à cette idée que Georgescu-Roegen va ensuite distinguer l'entropie de la matière de l'entropie de l'énergie, et ainsi proposer une 4^{ème} loi de la thermodynamique¹⁴ qui affirme la dissipation irréversible de la matière (2006 : 183, 203-204 ; Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 114).

Il a lui-même conscience de cette évolution dans ses travaux :

« Dans mes premiers écrits je pensais que la thermodynamique avait prêté attention à ce qui arrive non seulement à la qualité de l'énergie dans le cours des choses mais aussi à celle de la matière (la matière grossière par opposition à la matière microscopique). Je pensais aussi qu'ils

14 Outre les deux premiers principes, il existe aussi un principe zéro et un 3^{ème} principe de la thermodynamique. Ils ne sont pas nécessaires au présent exposé.

avaient vu que la friction ne dégradait pas seulement l'énergie mais aussi la matière.

Par la suite, cependant, j'ai vu que je me trompais. La thermodynamique s'était arrêtée avant de considérer les effets de la friction. » (1986 : 7).

L'absence de considération pour les phénomènes de friction est présente dès les débuts de la thermodynamique. La démarche de Carnot consiste justement à faire abstraction de tous les phénomènes conçus comme des écarts à l'idéal. Ce faisant, elle met de côté un phénomène présent dans toutes les transformations réelles. Les développements subséquents n'y ont pas attaché plus d'importance. Selon Georgescu-Roegen, il s'agit d'une conséquence de la difficulté à rendre compte théoriquement des phénomènes de friction. Il n'existe pas de loi générale permettant d'évaluer la chaleur dissipée par la friction, et encore moins l'impact de celle-ci sur la matière (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 109). Pour autant, l'observation élémentaire tend à montrer que partout la matière s'use et se détériore, non seulement sous l'effet des frictions, mais aussi des réactions chimiques et du mélange avec d'autres corps. Pour Georgescu-Roegen, d'un point de vue économique, on ne saurait négliger ce phénomène :

« A long terme ou à l'échelle de la « machine monde » la dissipation de matière atteint des proportions sensibles. Autour de nous, toute chose s'oxyde, se casse, se disperse, s'efface, etc. Il n'y a pas de structures matérielles immuables, parce que la matière tout comme l'énergie se dissipe continuellement et irrévocablement. » (2006 : 177)

Il faut comprendre ce caractère irrévocable dans un sens bien particulier : quelque quantité d'énergie que l'on dépense, on ne pourra parvenir à réunir de nouveau toute la matière dissipée. Georgescu-Roegen entend par là contredire ce qu'il nomme le « dogme énergétique », selon lequel l'énergie seule constitue une ressource critique pour le processus économique (1979 : 1025). Cette affirmation est l'une de ses plus controversées et a fait l'objet de nombreux commentaires. Pour en présenter une analyse critique, il convient de distinguer deux types d'arguments avancés par Georgescu-Roegen pour défendre sa thèse, et que nous considérerons successivement.

Dans sa première acceptation, la thèse de Georgescu-Roegen consiste à affirmer que, comme dans le cas de l'énergie, on peut distinguer différentes qualités de matière. On parlerait de matière *utilisable* lorsqu'elle peut être utilisée dans des manipulations physico-chimiques et de matière *non-utilisable* lorsque les particules en sont dispersées sans possibilité de les rassembler. Une quatrième loi pourrait alors être formulée de la manière suivante : « Dans

tout système clos, la matière utilisable se dégrade irrévocablement en matière non-utilisable. » (2006 : 203). Cependant, cette affirmation repose avant tout sur une série d'exemples tels que le caoutchouc dispersé sur les routes par le frottement des pneus ou la rupture d'un collier de perle dans Paris (2006 : 199-200). La situation la plus excentrique qu'il ait proposée est sûrement la suivante :

« Mais imaginons que les mêmes perles soient dissoutes dans un acide et la solution soit répandue sur la terre et dans les mers (ce qui en effet serait aussi le résultat de l'usure complète du collier). [...] Tout comme un système qui se meut assez lentement pour ne pas produire de friction, le recyclage des perles prendra (pour tous buts pratiques) un temps infini. En d'autres mots, la matière non disponible ne peut pas être recyclée. » (Missemer et Georgescu-Roegen 2013 : 113).

Cette conception de la dégradation entropique de la matière se place donc dans la continuité de la perspective phénoméniste adoptée par Georgescu-Roegen à l'égard de la thermodynamique (I.6). Il entend appuyer sa thèse sur la supposée évidence du phénomène à l'œuvre. Tout comme pour la dégradation de l'énergie on s'appuyait sur l'évidence que « la chaleur ne peut passer d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud », il s'agirait ici d'accepter l'évidence du passage à un état indisponible de la matière. Le problème de cette conception phénoméniste est qu'elle échoue ensuite à passer à un stade quantifié qui puisse donner un sens aux transformations qui lui sont apparemment contradictoires. Pour ce qui est de l'énergie, la définition de l'entropie sert justement à mettre en évidence que la transformation artificielle de la chaleur en travail mécanique se paie d'un transfert de chaleur du corps chaud au corps froid. Dans le cas de la matière, les procédés d'extraction ou de recyclage permettent d'obtenir des matériaux raffinés à partir de matières mélangées les unes aux autres. Pour affirmer que la dégradation de la matière n'est pas évitée par ces procédés, il faudrait mettre en évidence qu'une dégradation de matière équivalente a eu lieu dans le même temps. Georgescu-Roegen ne peut donc pas faire l'économie d'une quantification de la dégradation de la matière s'il souhaite donner une assise théorique à sa thèse. Or, il reconnaît lui-même qu'une telle quantification semble impossible, ce qu'il attribue au caractère hétérogène de la matière (1979 : 1038, 2006 : 204).

Cet écueil fournit aussi une occasion de réfléchir aux limites de la conception phénoméniste de la science. On perçoit bien ici que le phénomène en lui-même peut être ambigu et se prêter à une multiplicité d'interprétations. Pour la doctrine énergétiste, les éléments matériels dispersés à la surface de la Terre représentent uniquement la nécessité

d'une importante dépense d'énergie pour les rassembler. Georgescu-Roegen considère quant à lui que ces éléments ont connu une transformation qualitative irréversible qui ne peut être résolue par quelque dépense d'énergie que ce soit. Dans les deux cas, la posture finale dépend non du phénomène lui-même mais du cadre théorique par le prisme duquel il est observé. Il n'y a donc pas d'observation pure mais des faits imprégnés de théorie. L'acceptation de l'une ou l'autre des interprétations dépendra alors de sa capacité à formaliser le phénomène pour lui donner un caractère général, indépendant des contingences de l'observation. Georgescu-Roegen échoue à cette étape. A l'inverse, le cadre énergétique rend compte de manière cohérente des processus qui recyclent les matières que ce soit au niveau moléculaire ou des cycles biogéochimiques (Cleveland et Ruth 1997 : 211). En l'état, il semble que ce soit cette dernière perspective qui soit privilégiée dans l'analyse des transformations de la matière. La 4^{ème} loi de la thermodynamique proposée par Georgescu-Roegen apparaît largement mise en doute.

Mais il y a une forme plus faible de la thèse de Georgescu-Roegen selon laquelle la matière est rendue de moins en moins disponible par le processus économique. Il n'est plus question ici d'une transformation qualitative de la matière qui empêcherait tout retour en arrière. Il s'agit plutôt d'un problème de coordination entre le processus de recyclage des matières et le reste du processus économique. Georgescu-Roegen remarque que tout procédé de recyclage nécessite des structures matérielles qui vont s'user lors de ce procédé. Le recyclage va donc lui-même engendrer des déchets qu'il faudra recycler pour maintenir le procédé en état de marche. Cela mène selon lui à une régression à l'infini qui empêche un recyclage intégral de la matière.

« Le dogme énergétique prétend que la dissipation peut être complètement renversée à la condition que l'on dispose d'assez d'énergie utilisable. Mais l'opération implique nécessairement certains instruments matériels. Étant donné qu'il n'y pas de structure matérielle durable ces instruments s'useront. Ils devront être remplacés par d'autres produits par d'autres instruments, qui s'useront aussi et devront être remplacé, et ainsi de suite, dans une régression à l'infini. Cette régression est suffisante pour nier toute possibilité d'un recyclage intégral... » (1979 : 1034)

Il juge cet argument assez important pour le répéter à diverses reprises (1986 : 7, 2006 : 200 ; Missemmer et Georgescu-Roegen 2013 : 111). Cependant il ne cherche pas à

rendre son argument plus précis par un modèle mathématique simple, alors qu'intuitivement le problème semble se prêter à ce type d'analyse. Par ailleurs, il persiste une ambiguïté sur ce qu'il entend par l'impossibilité du recyclage. Cela signifie-t-il qu'il existe toujours une certaine quantité de matière à l'état de déchets ? Ou souhaite-t-il affirmer en plus que cette quantité ne peut que croître ?

L'enjeu de ces questions est en fin de compte de savoir s'il est possible d'atteindre un état stable dans lequel l'économie s'appuie sur un stock fini de matière et un flux constant d'énergie. En fait, plutôt que de considérer que le processus de recyclage entraîne une régression à l'infini on peut considérer qu'il entre dans un cycle d'activité avec les autres activités productives. Pendant que le processus de recyclage est en cours, les équipements nécessaires pour le maintenir en état sont produits par la chaîne de production. Cette dernière reçoit un flux de matière issu du procédé de recyclage, et tous deux produisent des déchets matériels. Robert Ayres a suggéré un tel modèle d'état stable dans un article où il examine la pertinence des arguments de Georgescu-Roegen (Ayres 1999). Ayres juge lui aussi que les lois de la thermodynamique sont l'essence de la rareté économique, cependant il conteste l'idée d'une dégradation irréversible de la matière avancée par Georgescu-Roegen. D'après le modèle qu'il propose, il juge que la conclusion exacte des arguments de Georgescu-Roegen est qu'il est possible d'atteindre un état stable, mais que dans celui-ci il y aura une quantité constante de matière qui sera à l'état de déchet.

Il semble que ce ne soit pas la conclusion à laquelle Georgescu-Roegen s'attendait. Il a en effet dévoué beaucoup d'énergie à contester les arguments en faveur d'un état stable, en s'appuyant en particulier sur l'importance de la matière (1986 : 8, 2006 : 208 ; Missemmer et Georgescu-Roegen 2013 : 115). L'erreur logique sous-jacente à son affirmation d'une régression infinie est d'autant plus étrange que, tout en critiquant l'usage abusif des mathématiques, il en reconnaît l'intérêt lorsqu'il s'agit de détecter des erreurs dans un raisonnement (1981 : 79).

L'ensemble des faiblesses théoriques de cette thèse de Georgescu-Roegen induit qu'aucun des auteurs qui s'inspirent de lui ne cherchent à défendre celle-ci (Beard et Lozada 1999 ; Daly 1992 ; Mayumi 2001). Néanmoins tous reconnaissent qu'il a ainsi contribué à soulever un enjeu de première importance à long terme. S'ils doutent de la validité théorique, ils ont donc tendance à supposer une certaine validité pratique de cette thèse. Cependant, il convient de dire que Georgescu-Roegen lui-même ne s'est pas placé dans cette perspective. Il apporte

ainsi très rarement des données empiriques qui puissent étayer ses affirmations. Le seul chiffre qui apparaisse est le suivant : la quantité de fer aux USA en 1950 représente seulement la moitié de ce qui a été extrait entre 1870 et 1950, sous-entendant que le reste est passé à un état inutilisable (1979 : 1039). Ce déficit d'éléments empiriques dans son exposé est sûrement dû à un manque de données sur la question. Néanmoins, en leur absence, le lecteur est toujours tenté de se demander si les phénomènes de diffusion de la matière représentent un enjeu si important.

L'importance de ce phénomène semble en fait attesté par les travaux récents de Antonio et Alicia Valero (2014). Bien qu'ils reconnaissent l'influence des travaux de Georgescu-Roegen sur l'orientation de leur recherche, ces derniers contestent la validité théorique de son 4^{ème} principe. Pour eux, le second principe suffit à rendre compte des contraintes qui s'exercent sur le processus économique. Ils construisent alors un indice de la dispersion de la matière qui évalue la quantité d'énergie utilisable nécessaire pour restaurer la matière sous une forme utilisable. Ils montrent ainsi que l'intuition de Georgescu-Roegen quant à l'importance de la matière est pleinement justifiée et qu'à long terme celle-ci sera une ressource cruciale pour la soutenabilité des sociétés industrielles.

Conclusion

La question qui a guidé le présent mémoire consistait à s'interroger sur le rôle joué par la loi de l'entropie dans le basculement théorique de Georgescu-Roegen à partir de la fin des années 60. Pour l'envisager dans de bonnes conditions, il convenait tout d'abord de préciser la position de Georgescu-Roegen à l'égard de cette loi sujet à diverses interprétations. L'histoire classique de la thermodynamique et les intuitions épistémologiques de Georgescu-Roegen s'avèrent alors complémentaires. La nature profondément économique du second principe est confirmée par son origine et ses développements ultérieurs. Par son rapport subtil à des propriétés naturelles, elle concourt à donner son caractère anthropomorphique à l'entropie. Par ailleurs, le système d'opposition épistémique mis en avant par Georgescu-Roegen se révèle une clef de lecture pertinente de l'incompatibilité entre la mécanique et la thermodynamique. La première est une science déterministe des phénomènes réversibles et dénués d'aspects qualitatifs, tandis que la seconde se préoccupe de transformations qualitatives et irréversibles, le tout en laissant place à une relative indétermination. Cette analyse donne sa cohérence et sa justesse au rejet de la mécanique statistique par Georgescu-Roegen, et à sa préférence pour une conception phénoméniste de la science.

Elle donne aussi des bases solides à son tournant théorique, dont la loi de l'entropie représente une pierre angulaire. Par la rupture épistémologique qu'elle représente vis-à-vis de la mécanique, elle a lui a inspiré sa critique de l'économie standard conçue comme un décalque de la mécanique rationnelle. Dans cette critique, on perçoit bien le glissement qui s'opère depuis les préoccupations initialement épistémologiques vers les questionnements écologiques. La grille de lecture qui structure l'opposition entre la mécanique et la thermodynamique est alors projetée par Georgescu-Roegen sur toutes les limites qu'il perçoit dans la théorie néoclassique. L'épistémologie mécaniste devient la source de tous les maux de la science économique. Pourtant, les arguments avancés à cet égard manquent de fondements solides. Ils s'appuient sur une similitude des terminologies qui masque des divergences conceptuelles. On est conforté dans le constat de cette faiblesse par l'ouvrage de Mirowski (Mirowski 2001b). Bien qu'il y poursuive l'étude des rapports entre la théorie néoclassique et la mécanique rationnelle, il développe une autre perspective critique qui ne fait pas référence aux arguments de Georgescu-Roegen. Ceux-ci restent néanmoins populaires au sein de l'économie écologique (Ould Boye 2014 : 173).

Le versant constructif du tournant théorique de Georgescu-Roegen offre quant à lui une

plus grande cohérence. La relation de continuité et de spécificité entre les activités biologiques et économiques éclaire le fondement matériel des sociétés humaines. Les ressources de basse entropie apparaissent clairement comme la source de toute prospérité et la loi de l'entropie précise les liens qui unissent le processus économique et l'environnement naturel dans lequel il s'inscrit. Elle propose une perspective nouvelle sur l'évolution conjointe de ces deux sphères, où le développement dans la première n'est que l'autre facette de la détérioration dans la seconde. En même temps, par l'indétermination qui lui est inhérente, elle place au cœur de cette perspective bioéconomique l'intentionnalité des activités humaines. La thermodynamique et la biologie représentent donc des références pertinentes pour l'économie, de par la similitude des phénomènes. Elles permettent de constituer l'architecture élémentaire de la bioéconomie, son cadre pré-analytique. En même temps, elles invitent naturellement à intégrer l'analyse des institutions, qui structurent la société, et les choix individuels et collectifs, ou une histoire environnementale. Des domaines dans lesquels les travaux de Georgescu-Roegen sont restés peu nombreux, bien qu'il y invite régulièrement (1981 : 359).

Il consacrera l'essentiel de son attention à des problèmes touchant plutôt à la portée analytique de la thermodynamique. Les problèmes que posent ses travaux sur l'épuisement des ressources énergétiques ou la dissipation de la matière montrent la difficulté à dépasser le stade pré-analytique de la bioéconomie. Une fois que les schèmes de pensée qui guident l'investigation ont été reformulés, il convient de fournir des outils pour appréhender avec précision les conditions d'une économie matériellement soutenable. Si les travaux de Georgescu-Roegen sur la théorie de la production peuvent être un des fondements de cette analyse, l'utilisation qu'il fait de la loi de l'entropie dans ce cadre présente des défaillances. Ces dernières ne remettent pas en cause le cadre général, mais elles appellent à une réflexion plus poussée sur les outils et les méthodes de la bioéconomie.

Bibliographie

- Ayres, Robert U. 1999. « The second law, the fourth law, recycling and limits to growth », *Ecological Economics*, vol. 29, n° 3, p. 473-483.
- Beard, Thomas R. et Lozada, Gabriel A. 1999. *Economics, entropy and the environment: the extraordinary economics of Nicholas Georgescu-Roegen*, Northampton (Mass.) : E. Elgar.
- Borel, Émile. 1948. *Le Hasard*, Paris : Presses universitaires de France.
- Brunhes, Bernard. 1927. *La dégradation de l'énergie*, Paris : E. Flammarion.
- Cleveland, Cutler J et Ruth, Matthias. 1997. « When, where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process?: A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics1 », *Ecological Economics*, vol. 22, n° 3, p. 203-223.
- Daly, Herman E. 1992. « Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity?— yes, of course it is! », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 23, n° 1, p. 91-95.
- Fizaine, Florian et Court, Victor. 2015. « Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI », *Ecological Economics*, vol. 110, p. 106-118.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 2006. *La décroissance: entropie, écologie, économie*, 3e éd. revue et augmentée, Paris : Ellébore-Sang de la terre.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1986. « The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect », *Eastern Economic Journal*, vol. 12, n° 1, p. 3-25.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1981. *The entropy law and the economic process*, Cambridge (Mass.) : Harvard university press.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1979. « Energy Analysis and Economic Valuation », *Southern Economic Journal*, vol. 45, n° 4, p. 1023-1058.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1977. « What thermodynamics and biology can teach economists », *Atlantic Economic Journal*, vol. 5, n° 1, p. 13-21.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. 1966. *Analytical economics , issues and problems*, Cambridge (Mass.) : Harvard university press.
- Grinevald, Jacques. 1976. « La révolution carnotienne thermodynamique, économie et idéologie », *Revue européenne des sciences sociales*, vol. 14, n° 36, p. 39-79.
- Iglesias, Samuel L. 2009. *The Miscommunications and Misunderstandings of Nicholas Georgescu-Roegen*, Duke University Durham.
- Khalil, Elias L. 1991. « Entropy law and Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm: A reply »,

Ecological Economics, vol. 3, n° 2, p. 161-163.

Khalil, Elias L. 1990. « Entropy law and exhaustion of natural resources : is Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm defensible? », *Ecological Economics*, vol. 2, n° 2, p. 163-178.

Levallois, Clément. 2010. « Can de-growth be considered a policy option? A historical note on Nicholas Georgescu-Roegen and the Club of Rome », *Ecological Economics*, vol. 69, n° 11, p. 2271-2278.

Locqueneux, Robert. 2009. *Histoire de la thermodynamique classique : de Sadi Carnot à Gibbs*, Paris : Belin.

Lozada, Gabriel A. 1991. « A defense of Nicholas Georgescu-Roegen's paradigm », *Ecological Economics*, vol. 3, n° 2, p. 157-160.

Martinez-Alier, Juan. 1990. *Ecological economics: energy, environment and society*, Cambridge (Mass.) : Basil Blackwell.

Mayumi, Kōzō. 2001. *The origins of ecological economics: the bioeconomics of Georgescu-Roegen*, New York : Routledge.

Mirowski, Philip. 2001a. « Review : Economics, entropy and the environment: The extraordinary economics of Nicholas Georgescu-Roegen. », *The Economic Journal*, vol. 111, n° 472, p. F474-F476.

Mirowski, Philip. 2001b. *Plus de chaleur que de lumière: l'économie comme physique sociale, la physique comme économie de la nature*, Paris : Économica.

Missemer, Antoine et Georgescu-Roegen, Nicholas. 2013. *Nicholas Georgescu-Roegen, pour une révolution bioéconomique*, Lyon : ENS Éditions.

Mouchot, Claude. 1998. « A Comment on Philip Mirowski's Analysis of Utility Theory », *Journal of the History of Economic Thought*, vol. 20, n° 3, p. 299-309.

Ould Boye, Isselmou. 2014. *Quelques traits caractéristiques de l'émergence d'une « hétérodoxie » : le cas de l'économie écologique*, Paris 1.

Pottier, Antonin. 2014. *L'économie dans l'impasse climatique. Développement matériel, théorie immatérielle et utopie auto-stabilisatrice*, EHESS.

Prigogine, Ilya. 1996. *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Paris : J. Gabay.

Prigogine, Ilya. 1972. « La thermodynamique de la vie », *La Recherche*, vol. 3, n° 24, p. 547-562.

Prigogine, Ilya et Stengers, Isabelle. 1993. *La nouvelle alliance: métamorphose de la science*, Paris : Gallimard.

Schrödinger, Erwin. 1993. *Qu'est-ce que la vie ? : de la physique à la biologie*, Paris : Seuil.

Soler, Léna. 2000. *Introduction à l'épistémologie*, Paris : Ellipses.

Stengers, Isabelle. 2003. *Cosmopolitiques*, Paris : la Découverte.

Valero, Antonio et Valero, Alicia. 2014. *Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources : A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment*, New Jersey : World Scientific Publishing Company.

Vatin, François. 1993. *Le travail: économie et physique, 1780-1830*, Paris : Presses universitaires de France.

Vieille Blanchard, Elodie. 2011. *Les limites à la croissance dans un monde global : modélisations, perspectives, réfutations*, EHESS.

Vivien, Franck Domin. 1991. *Sadi carnot, économiste. Enquête sur un paradigme perdu : économie - thermodynamique - écologie*, Paris 1.

Young, Jeffrey T. 1991. « Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity? », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 21, n° 2, p. 169-179.

Table des matières

Sommaire.....	3
Introduction.....	4
Sujet du présent mémoire et état de la question.....	4
Méthode adoptée pour traiter la question.....	7
Structure du mémoire.....	11
Chapitre I La loi de l'entropie : une rupture épistémologique dans la physique du XIXe siècle	16
I.1 L'émergence du second principe de la thermodynamique.....	17
I.2 L'invention du concept d'entropie.....	22
I.3 L'extension du champ d'interprétation du second principe.....	26
I.4 Les interprétations physiques du second principe.....	32
I.5 L'incompatibilité de la mécanique et de la thermodynamique.....	36
I.6 Georgescu-Roegen et la loi de l'entropie.....	40
Conclusion du premier chapitre.....	46
Chapitre II La loi de l'entropie et la science économique.....	48
II.1 La critique de l'économie standard : enjeux épistémologiques.....	50
II.2 La critique de l'économie standard : enjeux environnementaux.....	55
II.3 La loi de l'entropie : du vivant à l'économique.....	58
II.4 L'épuisement des ressources énergétiques.....	66
II.5 Entropie et matière.....	70
Conclusion.....	76
Bibliographie.....	78