



HAL
open science

Ressources naturelles, thermodynamique et théorie économique de la production : une perspective historique et méthodologique

Quentin Couix

► **To cite this version:**

Quentin Couix. Ressources naturelles, thermodynamique et théorie économique de la production : une perspective historique et méthodologique. Economies et finances. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2020. Français. NNT : 2020PA01E010 . tel-03131424

HAL Id: tel-03131424

<https://theses.hal.science/tel-03131424>

Submitted on 4 Feb 2021

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 1 PANTHÉON SORBONNE

THÈSE

pour obtenir le titre de

Docteur ès Sciences économiques

Présentée et soutenue par

Quentin COUX

le 11 juin 2020

Ressources naturelles, thermodynamique et théorie économique de la production Une perspective historique et méthodologique

Thèse dirigée par Jérôme LALLEMENT

Membres du jury :

Annie L. COT	Université Paris 1 Panthéon Sorbonne	Présidente
Muriel DAL PONT LEGRAND	Université Côte d'Azur	Rapporteuse
Christophe GOUPIL	Université de Paris	Examineur
Jean-Charles HOURCADE	CNRS, EHESS, CIRED	Rapporteur
Jérôme LALLEMENT	Université Paris 1 Panthéon Sorbonne	Directeur de thèse
Antoine MISSEMER	CNRS, CIRED	Examineur
Antonin POTTIER	EHESS, CIRED	Examineur

L'université Paris 1 Panthéon Sorbonne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Sommaire

Introduction générale	1
1 La conception thermodynamique de l'économie	45
2 La controverse Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz	85
3 L'énergie et les fonctions de production agrégées	121
4 Georgescu-Roegen et la méthodologie de l'économie mathématique	169
5 La théorie flux-fonds de la production	205
Conclusion générale	251
Annexes	267
A Introduction à la thermodynamique	267
B Les fonctions de production	275
C Modèle flux-fonds de transition énergétique	293
Bibliographie	305
Table des figures	337
Liste des tableaux	339
Table des matières	344
Remerciements	345
Résumés	349

Introduction générale

DEPUIS le milieu des années 1960, les questions liées aux ressources naturelles ont suscité un intérêt continu dans la discipline économique. Certes, des contributions antérieures avaient ouvert la voie, mais depuis soixante ans, ces questions ont pris une ampleur plus marquée. Dans un premier temps, ce sont l'épuisement des ressources, notamment des énergies fossiles, et les effets macroéconomiques des chocs pétroliers qui retiennent l'attention. Progressivement, la question du réchauffement climatique devient plus centrale, et pose la question d'une transition vers un système économique décarboné, impliquant notamment l'abandon des énergies fossiles. Enfin, on devine déjà à l'horizon les problèmes de disponibilité de certains métaux que pourrait engendrer une telle transition énergétique, ainsi que le développement des technologies numériques. Bien que différents sous certains aspects, ces problèmes ont en commun de remettre sur le devant de la scène la dimension « physique » du processus économique, c'est-à-dire les flux de matière et d'énergie sur lesquels repose ce processus. La question qui traverse cette thèse est de savoir dans quelle mesure cette dimension physique peut être intégrée dans la théorie économique, et quels enjeux méthodologiques soulève une telle démarche.

Pour aborder cette question, cette thèse s'intéresse à un courant économique en particulier. Le courant en question est certainement celui qui a poussé le plus loin l'idée que le processus économique repose sur un processus physique de transformation de l'énergie et de la matière. Pour appréhender cette dimension du processus économique, ce courant propose de s'appuyer sur la thermodynamique. Dit autrement, pour ce courant, les principes de la thermodynamique constituent une condition minimale de réalisme de la théorie économique. Dans cette thèse, je parlerai de « conception thermodynamique de l'économie » pour désigner ce courant. Cette conception est initiée par Nicholas Georgescu-Roegen (1966a, 1971), et elle est partagée par des auteurs tels que Herman Daly et Robert Ayres. L'introduction des principes de la thermodynamique dans la théorie économique soulève ainsi des questions importantes quant à la nature et aux frontières de la discipline économique. Cette thèse s'intéresse en particulier à la manière dont cette approche thermodynamique se confronte aux représentations formelles de la production, telles que les fonctions de production agrégées ou d'autres représentations désagrégées. La théorie de la production est certainement la partie de la discipline économique qui est la plus directement en contact avec les questions liées aux ressources naturelles. Il paraît donc important d'interroger sa compatibilité avec les principes physiques auxquels ces ressources naturelles sont soumises. Cette thèse propose un éclairage historique et méthodologique de cette question.

Afin de cerner plus précisément les enjeux de ce travail, l'introduction générale fournit une définition élémentaire de la conception thermodynamique de l'économie (sous-section 0.1.1) et situe ce courant dans la discipline économique (sous-section 0.1.2). Je montre ensuite qu'une mise en perspective historique permet de reconstruire au mieux

les enjeux méthodologiques soulevés par la conception thermodynamique de l'économie (sous-section 0.2.1). Cette reconstruction s'appuie sur une double grille de lecture, qui croise les enjeux liés à la modélisation économique (sous-section 0.2.2), et les enjeux liés à l'interdisciplinarité (sous-section 0.2.3). Enfin, je reformule la problématique à l'aide de ces outils conceptuels (section 0.3) et je présente la structure de la thèse (section 0.4).

0.1 Objet de la thèse

0.1.1 Définition et caractérisation élémentaire

Afin de fournir une première caractérisation des travaux considérés dans cette thèse, il est utile de présenter brièvement les principes de la thermodynamique¹. La thermodynamique peut être définie au sens large comme la science des transformations de l'énergie. Elle est essentiellement constituée de deux principes. Le premier principe indique que l'énergie se conserve lorsqu'elle change de forme. Par exemple, l'énergie mécanique se transforme en énergie thermique par friction, sans qu'il y ait de perte d'énergie. Cependant, le second principe de la thermodynamique montre que toutes les transformations qui conservent l'énergie ne sont pas possibles. En particulier, l'énergie thermique ne peut pas être totalement transformée en énergie mécanique. Plus généralement, le second principe indique que les transformations vont dans le sens d'une « dégradation qualitative » de l'énergie. Pour en rendre compte, la thermodynamique introduit une nouvelle variable, nommée « entropie », telle que lorsque la qualité de l'énergie diminue, l'entropie augmente. Le second principe de la thermodynamique prend alors le nom de loi de l'entropie. Il stipule que l'entropie d'un système isolé augmente vers un maximum.

Les deux principes qui précèdent concernent avant tout les propriétés de l'énergie. Cependant, les principes de la thermodynamique sont fréquemment associés également à la matière. On considère par exemple que le premier principe concerne la conservation de l'énergie et de la matière, séparément l'un de l'autre. Cette interprétation ne pose pas de problème. À l'inverse, l'idée que la matière est soumise à une forme de dégradation qualitative fait l'objet de nombreuses discussions². Quoi qu'il en soit, dans cette introduction, les principes de la thermodynamique sont interprétés dans un sens large, incluant l'énergie et à la matière.

Voyons maintenant comment ces principes sont utilisés dans la conception thermodynamique de l'économie. Georgescu-Roegen est le premier à discuter de manière approfondie les relations entre ressources naturelles, thermodynamique et économie, à partir du milieu des années 1960. Ainsi, son principal ouvrage s'intitule *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Georgescu-Roegen insiste sur la dimension physique du processus économique, dont il rend compte à l'aide des concepts de la thermodynamique :

Even if only the physical facet of the economic process is taken into consideration, this process is not circular, but *unidirectional*. As far as this facet

1. Une présentation plus détaillée est proposée dans le chapitre 1^{er} et dans l'annexe A.

2. Cette question est abordée dans le chapitre 1^{er}.

alone is concerned, the economic process consists of a continuous transformation of low entropy into high entropy, that is , into *irrevocable waste* or, with a topical term, into pollution. [...]

The conclusion is that, from the purely physical viewpoint, the economic process is entropic: it neither creates nor consumes matter or energy, but only transforms low into high entropy. (Georgescu-Roegen, 1971, 281, italique dans l'original)

Cette conception du processus économique attire donc l'attention sur les flux de matière et d'énergie qui constituent la base physique des activités économiques. Elle propose une double relation entre les ressources naturelles qui entrent dans le processus et les déchets qui en ressortent. D'un côté, ressources naturelles et déchets se trouvent dans une égalité quantitative du fait des principes de conservation de la matière et de l'énergie, c'est-à-dire du premier principe de la thermodynamique. De l'autre, les déchets constituent une forme qualitativement dégradée de la matière et de l'énergie qui constituaient les ressources naturelles initiales. Cette dégradation apparaît pour Georgescu-Roegen comme une contrepartie nécessaire à la production de valeur à l'intérieur du processus économique. Cela justifie selon lui que la théorie économique prête plus attention aux principes de la thermodynamique :

By improving and broadening our understanding of the economic process, [the Entropy Law] may teach to anyone willing to listen what aims are better for the economy of mankind. (Georgescu-Roegen, 1971, 18)

La manière dont les principes de la thermodynamique permettent de mieux appréhender la dimension physique du processus économique reste ici assez générale. Georgescu-Roegen approfondit cette question tout au long des années 1970 et 1980. Il ouvre ainsi la voie à une nouvelle façon d'envisager la place des ressources naturelles en économie. Parmi les auteurs qui s'inscrivent dans cette même perspective, Robert Ayres est une figure importante. Son intérêt pour les rapports entre économie et environnement débute en parallèle et indépendamment des contributions de Georgescu-Roegen. En collaboration avec Allen Kneese, Ayres propose de revoir la notion d'externalité à la lueur du principe de conservation de la matière (Ayres et Kneese, 1969; Kneese *et al.*, 1970; Ayres, 1978). Puis, dans les années 1980, Ayres envisage de manière plus systématique les relations entre l'économie et la thermodynamique (Ayres et Miller, 1980; Ayres et Nair, 1984). Il s'inscrit alors explicitement dans la continuité de Georgescu-Roegen, bien qu'il critique ce dernier sur certains points. La citation suivante offre ainsi une bonne illustration de la vision générale qui guide la conception thermodynamique de l'économie :

While physical sciences deal with the interactions of matter and energy, economics can be said to deal with the production and exchange of goods and services. Because goods and services incorporate matter and energy, the physical sciences are clearly relevant to economics. In particular, one can expect the laws of thermodynamics to impose constraints on economic processes as they do on physical processes (figure 1). It is clear that the laws of conservation—of matter and energy, for example—have implications for the use

of resources and for the generation and treatment of wastes. The law of the increase of entropy—the second law of thermodynamics—constrains economic processes to those that reduce available work, increasing the entropy of the Universe. (Ayres et Nair, 1984, 62)

Les citations de Georgescu-Roegen et d’Ayres permettent de saisir la logique générale de la conception thermodynamique de l’économie. Cette logique peut-être résumée ici sous la forme de trois propositions « thermo-économiques ». Cette formulation constitue une idéalisation des positions exprimées ci-dessus, et ailleurs dans la littérature. Mais elle a l’avantage de fournir un cadre de référence pour discuter les caractéristiques de la conception thermodynamique de l’économie.

Propositions thermo-économiques :

- La production de biens et services repose sur la transformation de flux de matière et d’énergie.
- La matière et l’énergie sont soumises aux principes de la thermodynamique.
- La théorie économique doit prendre en compte les principes de la thermodynamique.

Ces trois propositions sont chacune de nature différente³. La première touche à l’ontologie de la discipline économique, au sens où elle renvoie à sa définition et à ses frontières. Cette proposition s’inscrit dans une conception *substantielle* de l’économie, qui suppose qu’il préexiste des objets dont la théorie économique doit rendre compte. Cette perspective s’oppose à une conception *formelle* de l’économie, qui consiste à définir la théorie économique comme l’étude des propriétés abstraites du comportement rationnel (Polanyi, 1975). Dans la conception substantielle de l’économie, l’objet de la théorie économique est la production, la distribution et la consommation de biens et services. Mais la définition de cet objet est en général imprégnée de présupposés théoriques qui participent à circonscrire les frontières de la discipline (Cot et Lallement, 1996). En l’occurrence, la conception thermodynamique de l’économie met l’accent sur la nature physique des activités économiques de production et de consommation. Sans être tout à fait étrangère à la discipline, cette perspective modifie néanmoins partiellement la conception traditionnelle de l’objet de l’économie. Il s’avère alors nécessaire d’examiner les conséquences de cette position et en particulier la manière dont elle déplace les frontières de l’économie.

La deuxième proposition est d’ordre épistémologique. Elle suggère que la thermodynamique est une source de connaissance nécessaire pour rendre compte des phénomènes liés à la matière et à l’énergie. Cette formule est en partie circulaire, puisque la notion même d’énergie ne prend réellement son sens qu’à l’intérieur du cadre conceptuel de la thermodynamique. La thermodynamique n’est en fait pas la seule branche des sciences naturelles mobilisée par la conception thermodynamique de l’économie. La biologie sert également de référent scientifique pour penser l’évolution du processus économique. Néan-

3. Dans la suite, les termes d’ontologie, d’épistémologie et de méthodologie renvoient plutôt à la tradition anglo-saxonne. Celle-ci a notamment l’avantage de faire une distinction plus nette entre l’épistémologie, comme nature de la connaissance, et méthodologie, comment moyens pour l’atteindre. Ces distinctions sont également discutées dans la sous-section 0.2.2.

moins, la thermodynamique occupe clairement une position centrale et prépondérante. Cette position suggère que la thermodynamique dispose d'une spécificité épistémique à l'égard de la matière et de l'énergie. La thermodynamique constituerait un socle de connaissance à la fois élémentaire et fondamentale, qui la rend incontournable si l'on souhaite appréhender les propriétés macroscopiques de la matière et de l'énergie. Cette caractéristique rendrait la thermodynamique particulièrement pertinente pour la théorie économique. L'un des enjeux de la thèse consiste à élucider cette spécificité, en examinant comment les principes de la thermodynamique sont mobilisés dans les travaux en question.

Pour finir, la troisième proposition est méthodologique dans la mesure où elle indique une démarche particulière dans l'élaboration scientifique. Selon cette démarche, la prise en compte de la thermodynamique est une condition du réalisme physique de la théorie économique. La thermodynamique doit donc mener à des modifications conceptuelles et analytiques de la théorie existante. Plus précisément, la théorie économique de la production apparaît comme l'une des principales cibles de la conception thermodynamique de l'économie. Sa démarche méthodologique consiste à introduire les flux de matière et d'énergie dans la représentation de la production, d'une manière qui soit compatible avec les principes de la thermodynamique. Les flux physiques s'ajoutent ainsi aux facteurs de production traditionnels que sont le capital, le travail ou la terre. Ces facteurs traditionnels sont eux-mêmes repensés à la lueur de cette conception nouvelle de la production. L'analyse de la valeur, de la croissance, ou encore du changement technique est également affectée par cette perspective. Les outils analytiques mobilisés pour mener à bien cette démarche, ainsi que ses implications et les difficultés qu'elle rencontre, constituent l'objet central de cette thèse. En ce sens, je m'intéresse ici à la manière dont la conception thermodynamique de l'économie s'opérationnalise à travers diverses représentations formelles de la production. Ce point de vue invite notamment à s'interroger sur les fonctions attribuées aux modèles mathématiques dans ce cadre.

Pour cela, il est nécessaire d'adopter une démarche historique visant à restituer de manière suffisamment détaillée l'évolution de la conception thermodynamique de l'économie et les débats qui l'entourent. La période considérée dans cette thèse s'étend du milieu des années 1960, jusqu'à la fin des années 2000. La perspective adoptée est principalement « internaliste ». C'est-à-dire qu'elle accorde peu de place au contexte social et politique dans lequel émerge la conception thermodynamique de l'économie, si ce n'est comme toile de fond des débats théoriques. L'accent est mis sur les enjeux méthodologiques, et en particulier sur les relations entre la thermodynamique et les représentations formelles de la production. La thèse ne prétend donc pas *expliquer* l'évolution historique de la conception thermodynamique de l'économie, mais plutôt mettre en évidence les questions méthodologiques qu'elle soulève⁴.

Cette perspective est particulièrement appropriée pour comprendre comment deux représentations formelles de la production radicalement différentes peuvent se revendiquer d'une même conception thermodynamique de l'économie. D'un côté, Georgescu-Roegen

4. Davantage de précisions sur la démarche historiographique adoptée dans cette thèse sont fournies dans la sous-section 0.2.1.

développe sa « théorie flux-fonds » de la production à partir d'une critique radicale des fonctions de production agrégées, utilisées notamment dans les modèles néoclassiques de croissance. De l'autre, Ayres cherche plutôt à introduire la dimension physique du processus économique dans le cadre des fonctions de production agrégées. Dans cette thèse, je propose de qualifier de « théorie néo-thermodynamique » de la production cette deuxième approche. Pour saisir les divergences entre ces deux perspectives, j'adopte un cadre d'analyse centré sur deux principaux enjeux. Premièrement, je m'intéresse à la diversité des conceptions de la modélisation sous-jacentes à ces travaux. Deuxièmement, j'interroge les relations interdisciplinaires entre la thermodynamique et l'économie qui sont à l'œuvre. La combinaison de ces deux angles d'analyse permet d'appréhender les enjeux méthodologiques associés à la prise en compte de la dimension physique du processus économique.

0.1.2 Position dans la discipline économique

Thermodynamique et économie depuis le 19^e siècle

La conception thermodynamique de l'économie à laquelle s'intéresse cette thèse apparaît réellement à partir du milieu des années 1960. Cependant, il en existe des précurseurs dès la deuxième moitié du 19^e siècle, c'est-à-dire depuis que la thermodynamique existe. Ces précurseurs peuvent être regroupés sous le nom d'« énergétisme social »⁵. Dès les années 1880, un socialiste d'origine ukrainienne vivant en France, Sergueï Podolinsky (1850-1891), publie une série d'articles portant sur « le travail humain et l'unité des forces de la physique » dans divers journaux européens (Podolinsky, 1880, 2008). Dans ces articles, Podolinsky s'intéresse aux activités agricoles sous un angle thermodynamique. Il considère que la fonction principale de l'agriculture est de capter l'énergie du Soleil et de la mettre sous une forme utile à la société. Il étudie l'efficacité de ce processus pour diverses activités agricoles. Pour chaque activité, il compare, d'une part, la quantité d'énergie consommée par le travail humain et animal nécessaire, et d'autre part, la quantité d'énergie solaire accumulée dans les produits agricoles (foins, blé, etc.). Il est ainsi l'un des précurseurs des calculs de rendements énergétiques dans l'agriculture. De manière plus générale, Podolinsky entend ainsi donner des fondements physiques à la théorie de la valeur travail. Il fait d'ailleurs part de ses recherches à Marx et Engels, mais ces derniers y voient un intérêt limité. De ce fait, la contribution de Podolinsky a eu peu d'influence à son époque, et elle n'a été redécouverte que dans les années 1980.

Au début du 20^e siècle, le prix Nobel de chimie Wilhelm Ostwald (1853-1932) développe une philosophie « énergétiste » qui entend faire des principes de la thermodynamique les fondements de l'ensemble des sciences (Ostwald, 1907, 1911). Dans ce cadre, il considère que le développement économique repose nécessairement sur un accroissement des flux d'énergie contrôlés par la société. Cela l'amène à proposer une conception de la valeur fondée sur la thermodynamique. Quelques années plus tard, un autre prix Nobel de

5. Le but n'est pas ici de faire un exposé exhaustif des antécédents de la conception thermodynamique de l'économie. Il s'agit simplement d'en présenter quelques contributions importantes. Pour une présentation plus complète, voir par exemple Martinez-Alier (1987), Cleveland (1987) et Franco (2018).

chimie, Frederick Soddy (1877-1956), développe de manière plus approfondie une critique de la théorie économique à partir des principes de la thermodynamique (Soddy, 1922). Son principal ouvrage économique est issu d'un cours donné à la London School of Economics, et il adresse sa critique aux économistes de son temps, en particulier à Keynes. Pour Soddy, les catégories fondamentales de la théorie économique sont trompeuses et tendent à masquer les bases physiques sur lesquelles repose le processus économique. Les notions de richesse, de capital ou d'investissement sont conçues d'un point de vue strictement financier qui ne rend pas compte des contreparties matérielles et énergétiques qui leur sont associées. Il en découle selon lui un déséquilibre structurel entre l'intérêt que les investisseurs perçoivent et la croissance réelle de la production à laquelle donne lieu leurs investissements. D'après Soddy, les crises financières et fiscales seraient donc le produit d'une antinomie entre les institutions financières des sociétés capitalistes et les réalités physiques de la production de richesse. Dans l'ensemble, ces approches thermodynamiques de l'économie demeurent des initiatives relativement isolées et ne donnent pas lieu à la création d'un réel courant à l'intérieur de la pensée économique.

Certains économistes mènent à la même époque des travaux sur les ressources naturelles. Les plus connus sont certainement l'ouvrage de William Stanley Jevons, intitulé *The Coal Question* (1865), et l'article de Harold Hotelling « The Economics of Exhaustible Resources » (1931). Cependant, ces travaux ne s'appuient pas explicitement sur la thermodynamique. Par conséquent, ils ne peuvent pas être considérés comme des précurseurs de la conception thermodynamique de l'économie. Les préoccupations de Jevons concernant l'épuisement des ressources fossiles font néanmoins écho à l'accent mis sur les bases physiques du développement économique dans les approches thermodynamiques. La contribution de Hotelling relève d'une conception plus réductionniste des ressources naturelles, comme un type d'actifs particuliers et non comme un facteur indispensable à la croissance. Par ailleurs, dans la littérature économique de cette époque, on trouve quelques travaux qui se rapprochent davantage de la conception thermodynamique de l'économie. C'est le cas des travaux de Frederick G. Tryon (1927), qui construit le premier indice agrégé de la quantité d'énergie utilisée dans l'économie aux États-Unis. Tryon étudie la corrélation entre cet indice énergétique et un indice de la production agrégée, dans l'intention de montrer que l'énergie est un facteur de production primordial⁶. Néanmoins, dans l'ensemble, les premières réflexions sur la dimension physique du processus économique viennent de l'extérieur de la discipline.

De ce point de vue, la contribution de Georgescu-Roegen au début des années 1970 marque un tournant, car elle provient d'un auteur pleinement intégré parmi les économistes. Pour le voir, il est utile de rappeler quelques éléments de sa trajectoire personnelle⁷. Après des études de mathématiques en Roumanie, et une thèse de statistique en France, Georgescu-Roegen est formé à l'économie par Joseph Schumpeter à Harvard dans les années 1930. Il fournit alors rapidement des contributions importantes à

6. Pour un examen approfondi des contributions de Jevons, Hotelling et Tryon, voir par exemple Missemer (2012, 2017a) et Missemer et Nadaud (2020).

7. La trajectoire de Georgescu-Roegen au sein de l'économie fait l'objet d'une attention plus poussée dans le chapitre 4, car elle est particulièrement importante pour comprendre ses rapports avec l'économie mathématique.

la formalisation de la théorie néoclassique, notamment de la théorie du consommateur (Georgescu-Roegen, 1936). Il retourne en Roumanie en 1937, où il est professeur de statistique à l'université de Bucharest. Il y occupe également des responsabilités politiques et administratives, qui l'obligeront à fuir le pays en 1948 pour revenir aux États-Unis. Georgescu-Roegen retrouve rapidement une place parmi les économistes mathématiciens. Il obtient ainsi une position permanente de professeur à l'Université de Vanderbilt, où il passera l'ensemble de sa carrière. Il devient également membre de la Société d'économétrie et éditeur associé à *Econometrica*.

Cependant, au cours des années 60, Georgescu-Roegen devient de plus en plus critique envers l'orientation de ce qu'il nomme l'« économie standard », c'est-à-dire principalement de la théorie néoclassique⁸. L'ampleur de ce revirement doit être nuancée par le fait que Georgescu-Roegen avait déjà un point de vue relativement original dans ses contributions antérieures à la théorie économique standard (Gowdy et Mesner, 1998). Néanmoins, il est clair que sa position critique à l'égard de l'orientation générale de la discipline économique se fait plus explicite dans les années 1960. Fondamentalement, la critique de Georgescu-Roegen est d'ordre méthodologique. Elle s'attaque au manque de réalisme de la théorie économique standard et au rôle des outils mathématiques dans ce dévoiement de la discipline (Georgescu-Roegen, 1971). Pour Georgescu-Roegen, l'absence de considérations pour les ressources naturelles illustre ce manque de réalisme de la théorie économique standard. Cette absence traduit l'omission d'une dimension importante du processus économique, à savoir sa dimension physique. Georgescu-Roegen propose ainsi de s'appuyer sur les principes de la thermodynamique pour mieux rendre compte du rôle des ressources naturelles dans le processus économique. Il développe cette perspective tout au long des années 1970 et 1980 (Georgescu-Roegen, 1975, 1977a, 1978a, 1982). Notons que Georgescu-Roegen n'a initialement pas connaissance des contributions antérieures allant dans le même sens. Ce n'est que plus tard qu'il les découvre, grâce notamment au travail historique de Martinez-Alier (1987).

Cependant, la critique que Georgescu-Roegen adresse à la théorie économique standard ne se limite pas aux problèmes de ressources naturelles et à la place des principes de la thermodynamique. Sa critique s'inscrit dans une réflexion méthodologique plus large, dans laquelle la question du rôle des modèles mathématiques en économie occupe également une position centrale. Georgescu-Roegen admet que les modèles peuvent être utiles pour clarifier un raisonnement et en valider la cohérence logique. Mais il considère qu'une part importante de l'économie mathématique se préoccupe davantage de raffinements techniques que de la signification économique des modèles. C'est ce qui l'amène à développer sa théorie flux-fonds de la production (Georgescu-Roegen, 1969, 1970). Cette dernière se veut une alternative à la fonction de production néoclassique, à la fois sous sa forme microéconomique et sous sa forme agrégée. Par la suite, Georgescu-Roegen utilise ce cadre pour analyser la place des flux de matière et d'énergie dans la production

8. La notion de « théorie néoclassique » n'est pas toujours clairement délimitée. Ici, ce terme désigne la théorie du consommateur, centrée autour du concept d'« utilité », la théorie de la production, construite à partir de la « fonction de production », et la théorie de l'équilibre générale. Il inclut également la théorie de la croissance initiée par Solow (1956), dont les développements concernant les ressources naturelles occupent une place importante dans cette thèse.

(Georgescu-Roegen, 1978b, 1979c). Ainsi, sa conception thermodynamique de l'économie et sa réflexion sur la représentation formelle du processus de production deviennent progressivement étroitement liées l'une à l'autre.

La position méthodologique de Georgescu-Roegen sur l'économie mathématique s'inspire de sa propre expérience dans ce domaine, qui lui confère une certaine légitimité dans la discipline. Cette position relativement favorable contribue à ouvrir une « brèche » (Ould Boye, 2014), qui va permettre l'émergence d'un courant de pensée mettant l'accent sur les aspects physiques du processus économique. Georgescu-Roegen n'est cependant pas seul dans cette démarche. Kenneth Boulding joue également un rôle important. Il a en commun avec Georgescu-Roegen de bénéficier d'une certaine reconnaissance dans la discipline, qui lui vaut notamment d'être président de l'American Economic Association en 1968. Néanmoins, il se montre également critique de l'orientation prise par la discipline (Boulding, 1950). La diversité de ses intérêts théoriques et sa préoccupation pour les questions éthiques l'amènent à proposer l'analogie entre la terre et un « vaisseau spatial », dans lequel les ressources limitées doivent être gérées de manière responsable (Boulding, 1966). Boulding s'intéresse également à la thermodynamique, mais sa contribution en la matière reste limitée en comparaison de celle que Georgescu-Roegen développe durant les années 1970 et 1980. Boulding explore plutôt d'autres domaines, allant de la résolution des conflits aux enjeux fiscaux et redistributifs. Collectivement, Georgescu-Roegen et Boulding mettent néanmoins en mouvement une dynamique interne à la discipline économique, sur laquelle d'autres économistes s'appuient ensuite. C'est le cas de Herman Daly, un ancien étudiant de Georgescu-Roegen. Daly s'intéresse très tôt aux enjeux environnementaux (Daly, 1968), et il défend l'idée d'« état stationnaire » comme objectif de politique économique plutôt que la recherche de la croissance (Daly, 1974). Ces différents auteurs vont ainsi permettre à la conception thermodynamique de l'économie de se développer.

Cette dynamique interne à la discipline économique se conjugue également à des contributions d'auteurs venus de la physique et des sciences naturelles, comme c'est le cas d'Ayres. Ce dernier suit d'abord des études de physique aux États-Unis et obtient un doctorat de physique mathématique au King's College de Londres. Comme l'illustre la citation ci-dessous, ce sont ses travaux avec Allen Kneese au sein de l'organisation Resources For the Future (RFF) qui l'amènent réellement à l'économie :

However, the author's learning experience during a year at Resources for the Future, Inc. (RFF) during 1967-8 was crucial. In particular, it was a line of research initiated by Allen V. Kneese at RFF that has led us finally to this point. It was during that period that the senior author began to see that the economy is truly a physical system that converts raw materials into goods and services, subject to the laws of thermodynamics. It has taken most of the rest of the time since 1968 to understand how and why our conceptualization is inconsistent with standard neoclassical economic theory. (Ayres et Warr, 2009)

Le programme de recherche entamé avec Kneese occupe une partie importante des publications d'Ayres dans les années 1970 (Ayres et Kneese, 1969; Kneese *et al.*, 1970;

Ayres, 1978). Puis, il consacre les années 1980 essentiellement à l'étude du changement technologique dans une perspective plus proche des sciences de l'ingénieur. Le retour aux questions environnementales se fait principalement par ce qui prendra ensuite le nom d'« écologie industrielle ». Ce domaine s'intéresse à l'optimisation des flux interindustriels de matière et d'énergie, et Ayres en est considéré comme l'un des fondateurs (Ayres, 1989; Ayres et Simonis, 1994; Ayres et Ayres, 1996). Ce n'est donc réellement qu'au milieu des années 1990 qu'il revient à des questions plus générales sur les rapports entre thermodynamique et économie (Ayres, 1994, 1998, 1999). Ayres s'intéresse en particulier à la théorie de la croissance et cherche à montrer que l'énergie joue un rôle crucial dans la croissance. Pour ce faire, il s'appuie sur des travaux théoriques et empiriques entrepris dès les années 1980 par un autre physicien, Reiner Kümmel (Kümmel, 1982). Leur approche commune consiste à introduire l'énergie dans les fonctions de production agrégées pour démontrer empiriquement le rôle de l'énergie dans la croissance. La renommée d'Ayres permet à ce programme de recherche d'attirer rapidement une attention significative et de donner un second souffle à la conception thermodynamique de l'économie.

Sur le plan conceptuel, ce renouveau s'inscrit clairement dans la continuité de Georgescu-Roegen. Cependant, il convient de préciser que cet héritage est surtout intellectuel. Ayres et Kümmel n'entretiennent pas de liens étroits avec Georgescu-Roegen ou Daly. Ils partagent néanmoins une vision commune de l'économie comme processus physique de transformation de la matière et de l'énergie. La principale divergence d'Ayres et Kümmel par rapport à Georgescu-Roegen se situe au niveau de la représentation formelle de la production qui sert de support analytique à cette conception thermodynamique de l'économie. En effet, Ayres et Kümmel privilégient le recours à la fonction de production néoclassique, et plus particulièrement à sa version agrégée. Ils tentent de faire entrer l'approche thermodynamique dans ce cadre en ajoutant une variable d'énergie et en adoptant une conception physique des autres variables. La finalité de leur démarche est d'estimer leur fonction de production agrégée sur des données empiriques, et ainsi de démontrer le rôle crucial joué par l'énergie dans la production et la croissance. La principale critique d'Ayres et Kümmel envers l'approche standard concerne les méthodes d'estimation traditionnelles. En-dehors de ça, ils conservent autrement une part importante du formalisme néoclassique. Cette théorie néo-thermodynamique de la production s'écarte ainsi de la critique radicale des fonctions de production agrégées formulée par Georgescu-Roegen. L'objectif de cette thèse est donc de cerner les continuités et les ruptures qui caractérisent les relations entre ces deux perspectives.

L'économie de l'environnement dans la deuxième moitié du 20^e siècle

L'influence de la conception thermodynamique de l'économie s'étend au-delà du cercle restreint de travaux mentionnés ci-dessus. Elle constitue en effet l'un des piliers de l'« économie écologique », courant apparu à la fin des années 1980 et qui est rapidement parvenu à une certaine popularité. L'histoire de ce courant ne se comprend bien qu'en la mettant en perspective avec l'évolution plus générale des questions environnementales en économie dans la deuxième moitié du 20^e siècle (Spash, 1999). Les prémisses de l'économie de l'environnement moderne émergent après la Seconde Guerre mondiale. Aux États-Unis,

un premier rapport gouvernemental sur les ressources naturelles est publié dans les années 1950 (Paley *et al.*, 1952). Dans la continuité, RFF est créé en 1952 à Washington pour poursuivre les recherches et influencer les politiques publiques sur le sujet. C'est dans le cadre de cette organisation que seront notamment menés les travaux de Barnett et Morse (1963), puis ceux d'Ayres et Kneese évoqués plus haut.

Cependant, c'est le rapport « The Limits to Growth » (Meadows *et al.*, 1972) qui va réellement pousser davantage d'économistes à s'intéresser aux questions environnementales. Ce rapport est rédigé par une équipe d'ingénieurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) à la demande du Club de Rome. Le Club de Rome réunit des industriels, tels que le dirigeant de Fiat Aurelio Peccei, et des scientifiques, tels qu'Alexander King, responsable du département « éducation et science » de l'OCDE⁹. Les membres du Club de Rome ont en commun des préoccupations vis-à-vis de la pérennité du mode de développement occidental. Le rapport qu'ils commandent à l'équipe Meadows du MIT vise à donner une assise scientifique à ces préoccupations, à l'aide notamment des outils de modélisation de la dynamique des systèmes. Les résultats du rapport suggèrent que la poursuite de la croissance pourrait conduire à un effondrement écologique, démographique et économique, dû à l'épuisement des ressources naturelles et à l'accumulation de pollutions. Face à cette conclusion, les économistes de la croissance, tels que Robert Solow (1973, 1974a,b) et Joseph Stiglitz (1974b, 1979), réagissent en critiquant vivement le rapport sur le plan méthodologique et théorique. En parallèle, ces économistes proposent d'étudier le problème dans le cadre de la théorie néoclassique de la croissance initiée par Solow (1956). En s'appuyant sur les notions de « substituabilité » et de « progrès technique », ils formulent un avis beaucoup plus optimiste que le scénario du Club de Rome. Leurs contributions ont posé les bases de ce que j'appellerai ici la « théorie néoclassique des ressources ».

C'est dans ce contexte qu'est créé le *Journal of Environmental Economics and Management* (JEEM) en 1974. Les premiers rédacteurs en chef sont Allen Kneese et Ralph d'Arge, et Ayres participe au comité éditorial. Puis, en 1979, l'Association of Environmental and Resource Economists (AERE) voit le jour, avec pour premiers présidents William Baumol, puis Allen Kneese à nouveau. Les liens entre l'AERE et RFF sont donc très étroits. Ces organisations, et le JEEM, adoptent le cadre théorique et méthodologique de l'approche néoclassique et se donnent pour objectif de l'adapter aux questions environnementales. Ils créent ainsi une sous-discipline connue sous le nom d'« économie de l'environnement néoclassique ». La théorie néoclassique des ressources constitue une composante de cette sous-discipline. On y trouve également des approches qui s'intéressent aux problèmes de pollution en terme d'« externalités », et des méthodes d'analyse coût-bénéfice des politiques environnementales. Les travaux sur la valorisation des services rendus par la nature, tels que ceux de David Pearce (1992), jouent un rôle central dans ce cadre. De manière plus générale, Pearce est un acteur important de la diffusion de ces approches dans les sphères académiques et politiques, notamment au travers de plusieurs ouvrages de synthèse (Pearce *et al.*, 1989; Pearce et Turner, 1990). L'économie de l'environnement néoclassique acquiert ainsi rapidement une certaine légitimité. Mais les

9. Pour plus de détails sur le Club de Rome et ce rapport, voir Vieille Blanchard (2011).

restrictions imposées par le cadre théorique et méthodologique suscitent progressivement un mécontentement. Certains économistes souhaiteraient adopter une conception plus physique du processus économique ou s'intéresser à des problématiques plus directement en lien avec les enjeux des politiques environnementales (Spash, 1999).

À la fin des années 1980, ces tensions amènent à l'émergence d'un courant concurrent, l'« économie écologique ». L'International Society for Ecological Economics (ISEE) est créée en 1987, et le journal qui lui est associé, *Ecological Economics* (EE), publie son premier numéro en 1989. Quatre personnes sont particulièrement actives dans la construction de ce nouveau courant : Herman Daly, AnnMari Jansson, Robert Costanza et Joan Martinez-Alier (Ropke, 2004). Cette composition est révélatrice des influences qui se trouvent derrière la constitution initiale de l'économie écologique. D'un côté, Jansson et Costanza sont des écologues. Ils s'inscrivent dans la continuité des travaux de Howard T. Odum, qui proposent une approche des écosystèmes centrée sur les flux d'énergie. De l'autre, Daly et Martinez-Alier viennent de l'économie. Ils sont tous les deux fortement influencés par Georgescu-Roegen et sa conception thermodynamique de l'économie. L'ambition de l'économie écologique est de favoriser les échanges entre les groupes issus de ces deux influences, et de promouvoir ainsi une vraie collaboration entre écologues et économistes.

La construction d'une identité propre à l'économie écologique passe alors par deux aspects : l'étude et la discussion des précurseurs ; et la critique de l'économie de l'environnement néoclassique (Ropke, 2005). Le premier aspect amène à s'intéresser aussi bien aux lointains précurseurs, tels que Podolinsky et Soddy, qu'aux plus récents. Les travaux de Georgescu-Roegen font notamment l'objet de beaucoup d'attention, y compris sous une forme critique¹⁰. Après le décès de Georgescu-Roegen en 1994, un numéro spécial lui est consacré dans EE (Daly, 1997b). Ce numéro illustre par la même occasion le second pilier de la construction de l'économie écologique. Daly (1997a) y publie un article intitulé « Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz ». Dans cet article, il remet en avant les critiques formulées par Georgescu-Roegen dans les années 1970 à l'encontre de la théorie néoclassique des ressources. L'attaque suscite des réponses de Solow (1997) et Stiglitz (1997), ainsi que des contributions d'autres auteurs importants des deux courants, parmi lesquels on retrouve notamment Ayres (1997a). Ce débat reste l'une des confrontations les plus directes entre les deux écoles concurrentes. Il souligne que l'opposition à la théorie néoclassique est une dimension structurante de la conception thermodynamique de l'économie.

À travers une analyse textuelle des résumés d'articles publiés dans EE, Plumecocq (2014) confirme que la première décennie de l'économie écologique est marquée par une prédominance des aspects physiques du processus économique et des références à la thermodynamique. L'influence de Georgescu-Roegen se fait principalement par son ouvrage de 1971. Entre 1989 et 2004, il s'agit du 5^{ème} livre le plus cité dans EE, derrière deux livres

10. Georgescu-Roegen lui-même refuse de prendre part à la société et au journal associés à l'économie écologique, bien qu'il soit sollicité pour cela (Levallois, 2010). Il estime ne pas se reconnaître dans ce courant. De manière plus générale, à la fin de sa carrière, il éprouve une certaine amertume de n'avoir pas été plus largement reconnu (Daly, 1995).

collectifs et deux ouvrages généralistes sur l'économie écologique, tous publiés dans les années 1990 (Costanza *et al.*, 2004). Mais le courant va se transformer considérablement après les années 2000, avec une montée en puissance des évaluations monétaires des services écosystémiques parmi les publications dans EE. Cette réorientation va provoquer un rapprochement thématique avec l'économie de l'environnement néoclassique, telle qu'elle est reflétée par les publications dans le JEEM (Plumecocq, 2014). Ce rapprochement fragilise l'identité spécifique initialement attribuée à l'économie écologique.

Pour rendre compte des tensions qui traversent l'économie écologique depuis les années 2000, Spash (2013) suggère de la concevoir comme un « mouvement » divisé en trois « camps » ayant des perspectives théoriques, méthodologiques et idéologiques différentes. La « nouvelle économie des ressources » (NER) regroupe ceux qui s'appuient dans une large mesure sur la théorie néoclassique, en mettant simplement plus l'accent sur certains aspects écologiques (biodiversité, climat). Ils font face à une opposition frontale de la part de l'« économie écologique et sociale » (EES), qui revendique une position critique vis-à-vis de la théorie néoclassique et privilégie un rapprochement avec les courants hétérodoxes (postkeynésiens, institutionnalistes, marxistes). Enfin, le « nouveau pragmatisme environnemental » (NPE) se caractérise par un désintérêt pour les controverses théoriques au profit d'une approche pragmatique. Il se concentre sur la capacité à attirer l'attention des décideurs politiques sur les enjeux environnementaux. C'est dans ce dernier camp que s'inscrivent les évaluations des services écosystémiques, dans lesquelles l'étalon monétaire est perçu comme un meilleur moyen de convaincre les décideurs politiques de l'importance de la nature que les indicateurs physiques. La montée en puissance de cette thématique parmi les publications dans EE marque ainsi une victoire relative du NPE face aux deux autres camps Plumecocq (2014). De manière plus générale, cette situation fait écho à la domination des analyses quantitatives en économie.

La deuxième phase de développement de la conception thermodynamique de l'économie, suscitée par les travaux d'Ayres et Kümmel au début des années 2000, apparaît ambiguë de ce point de vue. Les travaux qui s'inscrivent dans ce programme de recherche sont majoritairement publiés dans des revues spécialisées sur l'énergie, telles qu'*Energy*, mais une part importante reste néanmoins publiée dans EE. En 2016, un nouveau journal nommé *BioPhysical Economics and Resource Quality* voit le jour. Son comité éditorial réunit plusieurs des auteurs ayant contribué dans les décennies passées à mettre l'accent sur la dimension physique du processus économique, tels qu'Ayres et Kümmel, mais aussi Charles Hall ou Ugo Bardi. Il marque ainsi une volonté de se démarquer de l'orientation prise par le journal EE et de défendre une autre conception de l'économie écologique, voire de fonder un nouveau courant.

La théorie néo-thermodynamique de la production ne se situe cependant pas de manière évidente dans les trois camps proposés par Spash. Ce dernier associe principalement l'intérêt pour les aspects physiques du processus économique à l'EES. Par ailleurs, Ayres et Kümmel partagent avec ce camp un rapport critique à la théorie néoclassique. Mais ils en réutilisent tout de même la notion de fonction de production agrégée. À l'inverse, dans la première période, Georgescu-Roegen, puis Daly, suggèrent de rompre définitivement avec ce formalisme. Cependant, la théorie flux-fonds de la production qu'ils proposent

comme cadre alternatif connaît peu de développements au-delà de la contribution fondatrice de Georgescu-Roegen. Cela laisse donc une place à la théorie néo-thermodynamique de la production, qui gagne en popularité au sein de l'économie écologique. Ce constat invite donc à bien distinguer deux périodes dans la conception thermodynamique de l'économie : du milieu des années 1960 à la fin des années 1990, où le rapport critique à la théorie néoclassique de la production est global ; de la fin des années 1990 à aujourd'hui, où le formalisme des fonctions de production est accepté et les désaccords théoriques se déplacent sur des points plus spécifiques, tels que la rémunération des facteurs à leur productivité marginale.

Ce qui précède a permis de souligner le cadre général dans lequel se situe la conception thermodynamique de l'économie. Des précisions s'avèrent nécessaires quant aux contours du corpus qui sera examiné dans cette thèse. Ces contours procèdent de l'exigence de réunir deux caractéristiques soulignées dans la sous-section 0.1.1 : la référence explicite à la thermodynamique comme ressource épistémique permettant d'appréhender la dimension physique du processus économique ; un intérêt pour les enjeux liés à la représentation formelle de la production en économie. C'est bien l'interaction entre ces deux dimensions qui constitue l'objet central de cette thèse.

Cela exclut donc des approches qui partagent l'une ou l'autre de ces préoccupations, mais non les deux simultanément. D'une part, cela amène à laisser de côté des théories alternatives à la fonction de production néoclassique dont l'objectif principal ne serait pas de mettre l'accent sur les aspects physiques. C'est le cas par exemple de l'approche initiée par Sraffa (1960), même si certains travaux ont tenté de prendre en compte les ressources naturelles dans ce cadre (Verger, 2016). D'autre part, il convient également d'écarter des contributions importantes à l'étude des flux de matière et d'énergie qui ne se préoccupent pas directement de la représentation formelle de la production. Parmi ces dernières, on trouve la tradition qui se situe dans le sillage d'Odum, notamment celle qui s'intéresse au « retour sur investissement énergétique » (Hall *et al.*, 1979; Hall et Cleveland, 1981; Cleveland *et al.*, 1984). On trouve également des programmes de recherches qui se sont inspirés des travaux respectifs de Georgescu-Roegen et Ayres. En ce qui concerne le premier, les développements de sa « bioéconomie » au-delà de la questions de la thermodynamique et de la production sont laissées de côté, ce qui exclut par exemple les contributions de René Passet (1979). C'est également le cas de l'« analyse intégrée multi-échelle du métabolisme sociale et écosystémique » (Giampietro et Mayumi, 2000; Giampietro *et al.*, 2009), une autre approche inspirée de Georgescu-Roegen. S'agissant d'Ayres, l'un des prolongements notoires de son « écologie industrielle » est connu sous le nom d'« analyse des flux de matière et d'énergie » (Fischer-Kowalski et Hüttler, 1998; Fischer-Kowalski, 1998). Cependant, là encore, il n'est pas directement question d'une représentation formelle de la production.

D'autres travaux peuvent également apparaître proches du cadre de cette thèse, dans la mesure où ils conjuguent un intérêt pour les ressources naturelles, en particulier l'énergie, et une représentation formelle de la production. C'est notamment le cas des approches qui se placent dans le cadre input-output pour étudier les questions énergétiques¹¹. Ainsi,

11. Leontief (1970) lui-même s'intéresse assez tôt à la question des pollutions et cherche à en rendre

dans les années 1970, l'Energy Research Group initié par Bruce Hannon complète l'approche input-output standard par une matrice des flux d'énergie (Hannon, 2010). Celle-ci permet d'étudier l'intensité énergétique des différents secteurs d'une économie et sert ainsi de base à diverses recommandations de politiques économiques. Si cette perspective mérite certainement d'être discutée dans le cadre de cette thèse, elle apparaît néanmoins plus distante des approches de Georgescu-Roegen et d'Ayres. En particulier, elle ne fait pas clairement référence à la thermodynamique comme cadre pour appréhender les enjeux liés aux ressources naturelles. Cette raison justifie de ne pas étudier davantage cette approche dans cette thèse.

Il en va de même de l'importante littérature qui s'est développée depuis les années 1980 autour des modèles intégrés énergie-économie, qui sert notamment de base aux travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Traditionnellement, ces modèles ont été répartis en deux approches dites « bottom-up » et « top-down » (Lefèvre, 2016). Les premiers représentent de manière séparée les technologies de l'énergie, leurs contraintes, et l'évolution du marché dans une perspective d'équilibre partiel. Les seconds partent au contraire d'une vision globale de l'économie, soit sous la forme d'une fonction de production agrégée, soit sous la forme d'un modèle input-output désagrégé. Cependant, cette distinction est devenue progressivement moins opérante, au fur et à mesure que des approches « hybrides » se sont développées. Par exemple, le modèle Imacim-R combine une vision globale désagrégée issue de la tradition top-down avec l'approche par les technologies énergétiques caractéristique de la tradition bottom-up (Hourcade *et al.*, 2010). On retrouve là une volonté de représenter formellement les aspects physiques du processus économique, en s'appuyant notamment sur des connaissances issues davantage des sciences de l'ingénieur. Cependant, ces approches ne sont pas examinées dans cette thèse, car elles se situent moins clairement en référence à la thermodynamique.

Ces contours délimitent donc un corpus relativement restreint qu'il est possible d'explorer de manière approfondie. Il convient pour cela de fixer des bornes temporelles adéquates. Comme on l'a vu, le milieu des années 1960 apparaît comme le point de départ le plus pertinent. Il marque un renouveau important des questions environnementales en économie en général, et en particulier les premiers développements des approches thermodynamiques modernes. C'est par exemple de cette période que datent les premières contributions sur ce sujet de Georgescu-Roegen (1966a, 1971), Daly (1968), et Ayres et Kneese (1969). En ce qui concerne la borne temporelle supérieure, le début des années 2010 semble être particulièrement adapté, car il marque une première étape dans le programme de recherche initié par Ayres et Kümmel. Cette étape est symbolisée par deux ouvrages de synthèse : *The Economic Growth Engine* (Ayres et Warr, 2009) et *The Second Law of Economics* (Kümmel, 2011). Ces livres fournissent une vision d'ensemble de leur approche. Ils permettent d'en cerner les principaux enjeux et forment le socle sur lequel les développements se poursuivent depuis lors.

En ce qui concerne la localisation géographique du sujet, l'essentiel des développe-

compte dans le cadre input-output, d'une manière similaire à celle d'Ayres et Kneese (1969). Il considère ainsi les pollutions comme un co-produit nécessaire de certaines activités économiques.

ments étudiés ont lieu en Amérique du Nord et en Europe occidentale. Ainsi, Georgescu-Roegen et Daly passent l'essentiel de leur carrière aux États-Unis, tandis qu'Ayres y commence sa carrière et la termine en France. Kümmel travaille quant à lui en Allemagne, mais ses premières contributions sur le sujet datent d'un séjour aux États-Unis. Davantage que la localisation géographique à proprement parler, c'est la publication dans des revues anglophones qui marque l'ancrage de ces approches dans les réseaux académiques occidentaux.

0.2 Perspectives historiographique et méthodologique

Après avoir identifié plus précisément les théories qui font l'objet de cette thèse, il convient maintenant de présenter le point de vue choisi pour les aborder et les outils conceptuels qui vont permettre de mener cette réflexion. Il n'existe pas une seule manière d'approcher ce sujet. Selon la perspective choisie, on mettra en lumière des aspects différents, qui pourront s'avérer complémentaires avec les résultats d'autres démarches. Dans tous les cas, il est utile de souligner les raisons qui ont guidé les choix effectués, qu'ils soient liés à la nature du sujet lui-même ou à l'état de la littérature. Pour cela, les sous-sections suivantes présentent le cadre historiographique, les enjeux méthodologiques liés à la modélisation économique, et ceux liés à l'interdisciplinarité.

0.2.1 Une historiographie à finalité méthodologique

Pour commencer, afin d'explicitier les choix historiographiques qui structurent cette thèse, il est nécessaire de revenir sur ce qui motive l'intérêt initial pour la conception thermodynamique de l'économie. On peut distinguer schématiquement deux attitudes parmi les historiens de la pensée économique. La première consiste à s'intéresser aux transformations les plus marquantes de la pensée économique, telles que l'émergence de l'économie mathématique (Weintraub, 2002). Ce type de contributions est essentiel pour saisir les dynamiques de la discipline, qu'elles soient liées à des facteurs internes ou externes. Mais, quand bien même elles prennent leurs distances avec une vision « présentiste » qui conduirait à faire de ces transformations une nécessité historique (Goutsmedt, 2017), elles orientent naturellement vers des courants qui ont, à un moment ou un autre, tenu une position dominante dans la discipline.

Ce n'est clairement pas le cas de la conception thermodynamique de l'économie, et ce à trois niveaux. Tout d'abord, mis à part durant la période des années 1970, les questions liées aux ressources naturelles sont relativement marginalisées en économie dans la deuxième moitié du 20^e siècle. Pottier (2014, 136) souligne ainsi que dans une revue de référence comme le *Journal of Economic Growth* aucun article sur le sujet n'a été publié entre sa création en 1996 et 2014. Par ailleurs, au sein de l'économie des ressources naturelles, les approches thermodynamiques ont été principalement influentes en économie écologique durant la période où ce courant était largement dominé par l'économie néoclassique de l'environnement. Enfin, la popularité accrue de l'économie écologique dans les années 2000 est allée de pair avec une marginalisation des thématiques

liées à la thermodynamique.

La conception thermodynamique de l'économie n'est pas dépourvue d'une certaine légitimité dans la discipline, liée notamment au parcours de Georgescu-Roegen et aux contributions importantes d'Ayres en économie de l'environnement. Mais elle n'a jamais été réellement une force motrice comparable à la théorie néoclassique de la croissance ou à sa variante appliquée aux ressources naturelles. L'intérêt pour ce sujet ne peut donc pas venir de l'espoir de mieux comprendre les transformations de la discipline économique ou de l'une de ses branches. Une autre démarche consiste à s'intéresser à des programmes de recherche non « victorieux », mais qui posent néanmoins des questions intéressantes quant au statut du savoir économique. Cette démarche procède de l'idée que l'évolution de la discipline ne s'explique pas d'abord par la mise à l'écart de théories dont les erreurs sont démontrées de manière définitive, mais davantage par des processus d'oubli (Lapidus, 1996; Weintraub, 1999). En l'occurrence, l'oubli n'est pas total puisqu'un programme de recherche est réapparu au début des années 2000 et continue de se développer. Mais même celui-ci met de côté des éléments importants de l'approche initiale de Georgescu-Roegen, notamment sa théorie flux-fonds de la production. Par ailleurs, si la thèse ne prend pas directement pour objet la théorie économique dominante, elle offre néanmoins un point de vue différent sur certains de ses principaux outils. C'est le cas notamment des fonctions de production agrégées, qui sont à la fois l'objet d'une critique radicale de la part de Georgescu-Roegen, et d'une forme de réappropriation par Ayres.

Il existe déjà une littérature historique traitant de manière plus ou moins directe du sujet de cette thèse. Un état des lieux de cette littérature permet de situer mon approche et de préciser ses apports. Je me concentre ici sur les enjeux historiographiques liés à ces travaux historiques, leur contenu ayant été dans une large mesure présenté dans la sous-section 0.1.2. Pour commencer, depuis ses débuts, l'économie écologique a fait l'objet de nombreuses recherches historiques, pour la plupart menées par des auteurs appartenant à ce courant. Celles-ci peuvent être réparties schématiquement en trois groupes. Le premier groupe concerne la recherche de précurseurs ayant eu un intérêt pour les aspects physiques du processus économique à la fin du 19^e et au début du 20^e siècle. Les travaux historiques identifient ces précurseurs soit parmi des auteurs jusque-là peu connus, tels que Podolinsky ou Soddy (Martinez-Alier, 1987; Cleveland, 1987; Franco, 2018), soit dans des courants plus traditionnels de l'histoire de la pensée économique, tels que les physiocrates et les classiques (Cleveland, 1987; Christensen, 1989). Cette partie de la littérature ne présente pas un intérêt direct dans le cadre de cette thèse, car, à partir du milieu des années 1960, la conception thermodynamique de l'économie s'est construite de manière relativement autonome vis-à-vis de ces antécédents.

Le deuxième ensemble de travaux historiques se concentre sur la période de formation des idées associées à l'économie écologique moderne des années 1950 aux années 1980 (Spash, 1999; Ropke, 2004; Ould Boye, 2014). Ces travaux soulignent le rôle central joué par Georgescu-Roegen et Boulding en économie, et par Odum en écologie. L'importance de la contribution de Georgescu-Roegen et les spécificités de sa trajectoire intellectuelle en ont fait un sujet d'investigation particulièrement attractif. On trouve ainsi deux ouvrages de synthèse sur sa contribution à l'économie écologique (Beard et Lozada, 1999; Missemer,

2013), mais également une série d'articles plus spécifiques. Gowdy et Mesner (1998) suggèrent ainsi que la préoccupation pour la question de la valeur constitue le fil rouge de la carrière de Georgescu-Roegen, depuis ses contributions à la théorie néoclassique jusqu'aux enjeux environnementaux. Bobulescu (2012, 2013, 2015) identifie les origines de l'approche de Georgescu-Roegen à travers l'influence de Schumpeter, de Lotka ou de son expérience en Roumanie. Tandis que Missemmer (2017b) nuance son association habituelle au courant de la décroissance, en mettant en avant la dimension évolutionnaire de son approche. Cette perspective rapprocherait plutôt Georgescu-Roegen d'une conception en terme d'« croissance », c'est-à-dire de désintérêt pour l'opposition entre croissance et décroissance.

Il existe par ailleurs une littérature abondante discutant de l'approche thermodynamique de Georgescu-Roegen de manière plus technique, que ce soit pour formuler des critiques à son égard ou pour en proposer des prolongements (Cleveland et Ruth, 1997; Mayumi, 1997; Ayres, 1999; Lozada, 1999). De la même manière, la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen a inspiré des développements formels et fait l'objet de comparaisons avec l'approche de Sraffa (Morrone, 1992; Scazzieri, 1993; Vittucci Marzetti, 2013; Mayumi, 1999; Kurz et Salvadori, 2003). Mais ces travaux manquent d'une mise en perspective historique et méthodologique de la théorie flux-fonds, rendue d'autant plus importante par le regard critique de Georgescu-Roegen envers l'utilisation des mathématiques en économie. Par ailleurs, tant dans les approches historiques que techniques, les relations entre la théorie flux-fonds et l'approche thermodynamique ne sont jamais examinées de manière approfondie. L'une des contributions importantes de ma thèse vise donc précisément à rendre compte des fondements méthodologiques de la théorie flux-fonds et de sa relation avec la conception thermodynamique de l'économie. Pour cela, j'adopte un point de vue intermédiaire, à la fois plus attentif aux enjeux théoriques et analytiques que dans les travaux historiques, et plus sensible à l'évolution historique des concepts et des formalismes que dans les approches techniques.

Enfin, le troisième groupe, au sein des travaux historiques sur l'économie écologique, s'intéresse à l'évolution du courant lui-même depuis son institutionnalisation à la fin des années 1980. Ces travaux insistent sur la permanence des thématiques liées aux aspects physiques du processus économique dans la première décennie. Mais ils notent également sa cohabitation, dès le départ, avec d'autres approches, inspirées par des perspectives marxienne et évolutionniste, ou à l'inverse, par la théorie néoclassique (Spash, 1999; Ropke, 2005). Dans un second temps, ils soulignent la montée en puissance des évaluations monétaires des services écosystémiques, qui renvoie au second plan les débats méthodologiques et théoriques (Spash, 2013; Plumecocq, 2014). Ces travaux offrent une grille de lecture intéressante des transformations récentes du courant, mais la vision qu'ils fournissent demeure très générale. En particulier, alors qu'ils notent la persistance des approches thermodynamiques sous une forme plus marginale dans la deuxième période, ils ne permettent pas de cerner les transformations qui s'opèrent au sein même de ces approches. De ce point de vue, ma thèse analyse comment évoluent les rapports entre les approches thermodynamiques et la théorie de la production. Elle montre que du milieu des années 1960 à la fin des années 1990, les approches thermodynamiques sont globa-

lement critiques de la théorie néoclassique de la production. Tandis que de la fin des années 1990 à aujourd'hui, le formalisme des fonctions de production agrégées retrouve progressivement une place importante au sein des approches thermodynamiques.

Ce point rappelle combien les rapports conflictuels avec la théorie néoclassique des ressources sont constitutifs de l'identité de la conception thermodynamique de l'économie. De manière générale, en histoire des sciences, les controverses sont reconnues comme étant des objets d'étude particulièrement intéressants (Dascal, 1998). Elles constituent des moments d'interrogation profonde sur les fondements, les implications et les limites des théories. Les éléments qui apparaissent comme des évidences pour certains sont remis en question par d'autres et obligent à mettre au jour les présupposés méthodologiques et théoriques sous-jacents. Les controverses entre la conception thermodynamique de l'économie et la théorie néoclassique des ressources n'échappent pas à ces constats. Par conséquent, les confrontations plus ou moins directes entre ces deux approches constituent des ressources importantes, sur lesquelles cette thèse s'appuie abondamment. Pour être fructueuse, cette démarche ne peut pas se contenter d'évoquer de manière générale et imprécise le versant néoclassique de la controverse, alors qu'elle entend précisément procéder de façon plus détaillée concernant les approches thermodynamiques. Il faut faire preuve d'une certaine « symétrie » dans l'analyse des contributions rivales pour pouvoir tirer toutes les leçons de ces débats (Bloor, 1976). De ce point de vue, la littérature centrée sur l'économie écologique, et issue pour une part importante de cette communauté, ne permet pas d'apprécier de manière équilibrée les enjeux en question. D'une part, elle n'approfondit pas autant le point de vue néoclassique qu'elle ne le fait pour l'économie écologique. D'autre part, lorsqu'elle le fait, elle adopte un point de vue critique qui tend à masquer certains aspects importants des débats.

Pour contrebalancer cette position, on pourrait envisager de s'appuyer sur la littérature dédiée à l'histoire de l'économie de l'environnement néoclassique. Cependant, celle-ci est moins abondante et se situe souvent à un niveau de généralité trop élevé (Pearce, 2002; Kula, 2013). En particulier, il existe peu de travaux historiques qui traitent spécifiquement de la théorie néoclassique des ressources naturelles. Erreygers (2009) s'intéresse aux influences des travaux de Hotelling et de John Rawls sur la contribution initiale de Solow (1974b) à la théorie néoclassique des ressources. Mais il se concentre sur les questions de normes de justice intergénérationnelles et non sur les aspects liés à la théorie de la production. Notons par ailleurs que la littérature historique sur l'approche standard des ressources naturelles est plus importante en ce qui concerne la période allant de la fin du 19^e au début du 20^e siècle. En particulier, Missemer (2017a) fournit un examen détaillé, qui met en évidence l'évolution vers une position « réductionniste ». Cette position consiste à considérer les ressources naturelles non pas comme un facteur central pour la croissance, mais comme une marchandise parmi d'autres, sur laquelle il est possible de mettre en œuvre les outils de la théorie microéconomique néoclassique.

En ce qui concerne les développements de la théorie néoclassique des ressources naturelles au 20^e siècle, la contribution la plus intéressante est certainement celle de Pottier (2014, chap. 2). En examinant la manière dont les ressources naturelles ont été appréhendées dans la pensée économique, des classiques jusqu'aux travaux récents, il met en

évidence certaines des transformations importantes dans le traitement de cette question au fil du temps. Il insiste en particulier sur les enjeux méthodologiques et théoriques, et il analyse notamment le rôle joué par les outils mathématiques de la théorie néoclassique de la croissance dans les débats des années 1970. Cependant, étant donné l'étendue de la période historique considérée, la réflexion se concentre sur quelques contributions importantes, mais ne permet pas de saisir certaines caractéristiques qui requièrent un examen plus détaillé de la littérature. Par ailleurs, si Pottier évoque la conception thermodynamique de l'économie dans le cadre des débats qui l'oppose à la théorie néoclassique des ressources, celle-ci ne constitue pas l'objet central de son propos et l'étude des deux camps n'est pas menée de manière symétrique. La perspective proposée dans cette thèse est donc complémentaire de cette contribution. Elle amène à des conclusions convergentes en ce qui concerne les limites des modèles néoclassiques avec ressources épuisables.

Pour résumer l'approche adoptée dans cette thèse, il s'agit donc d'analyser les transformations de la conception thermodynamique de l'économie entre le milieu des années 1960 et la fin des années 2000. La thèse met l'accent sur les enjeux méthodologiques, c'est-à-dire sur les principes qui guident l'élaboration théorique, et en particulier sur les relations entre la thermodynamique et les représentations formelles de la production. Il ne s'agit donc pas de faire l'histoire pour elle-même, mais bien pour réfléchir à la construction du savoir économique. Pour cela, la thèse s'appuie notamment sur les controverses entre la conception thermodynamique de l'économie et la théorie néoclassique des ressources.

De ce point de vue, ma démarche se situe de manière ambiguë par rapport à ce que les réflexions historiographiques en économie qualifient de « reconstruction historique » et de « reconstruction rationnelle » (Blaug, 1990; Cot et Lallement, 1996)¹². Cette thèse s'inscrit dans une perspective de reconstruction historique dans la mesure où elle cherche à appréhender les enjeux à partir du point de vue des auteurs eux-mêmes, en prêtant attention à « ce qu'ils ont dit effectivement » plutôt qu'à « ce qu'ils auraient dû dire ». Mais dans le même temps, la thèse s'appuie sur une grille de lecture méthodologique qui n'est pas neutre par rapport aux éléments sur lesquels j'insiste et la manière dont je les interprète. En ce sens, elle s'apparente davantage à une combinaison de reconstruction historique et rationnelle.

Il faut par ailleurs préciser que la reconstruction historique ne concerne ici que les aspects proprement théorique, et non les dimensions davantage sociales ou institutionnelles. Comme le souligne notamment Backhouse (2001), ces deux approches ne sont pas rivales mais plutôt complémentaires. Ainsi, s'il m'arrive de faire usage d'archives, et notamment de lettres, c'est en général pour éclairer un propos théorique ou méthodologique, et non pour m'intéresser à la relation entre les correspondants. Pour cela, j'ai notamment consulté certains documents disponibles dans les archives de Georgescu-Roegen et de Solow, réunies à la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library de l'Uni-

12. Ces réflexions s'inspirent elles-mêmes de celles de Rorty (1984) en historiographie de la philosophie. Rorty distingue deux catégories en plus de celles mentionnées ici : l'histoire intellectuelle, visant à apprécier l'intégralité de l'œuvre d'un auteur ; et la doxographie, qui compare la position de divers auteurs à différentes époques sur une question qu'elle suppose être la même. La démarche adoptée dans cette thèse a peu à voir avec l'une ou l'autre.

versité de Duke¹³. Ces documents permettent notamment d'étudier la réaction de Solow vis-à-vis de la théorie néo-thermodynamique de la production, et d'examiner les réactions des économistes mathématiciens par rapport au tournant critique de Georgescu-Roegen. Par ailleurs, afin de vérifier certains points historiques et d'obtenir quelques informations supplémentaires, j'ai également posé des questions à plusieurs des auteurs dont je discute les travaux¹⁴. Les informations issues de ces échanges directs sont indiquées sous la forme de « communications personnelles ». Cependant, l'essentiel du matériel analysé dans la thèse est issu de publications dans des revues ou des livres.

0.2.2 Méthodologie économique et modélisation

Pour étudier d'un point de vue méthodologique les transformations de la conception thermodynamique de l'économie, il est nécessaire au préalable de construire un cadre interprétatif adapté à cet objet. L'enjeu ici est d'éviter deux écueils symétriques : utiliser un cadre *ad hoc* totalement déconnecté des préoccupations de cette littérature ; ne faire que reprendre à son compte le cadre, implicite ou explicite, sur lequel elle repose. Ainsi, pour prendre la distance nécessaire, je propose de m'appuyer sur la littérature de philosophie économique, et d'y sélectionner ce qui me paraît pertinent pour traiter le sujet en question. Cette démarche doit permettre de rendre compte de la diversité des approches méthodologiques, tant au sein même de la conception thermodynamique de l'économie que vis-à-vis des théories auxquelles elles s'opposent. La grille de lecture qui en ressort repose sur l'articulation entre théories, modèles et données. Cette sous-section clarifie les moyens qui permettent de penser cette articulation.

Théories, modèles et données

Il convient pour commencer de préciser le sens dans lequel les trois notions centrales de cette grille de lecture sont utilisées. La « théorie » renvoie ici à un ensemble de concepts et de relations entre ces concepts, formulés de manière littéraire. Parmi ceux qui reviennent le plus souvent dans la thèse, on trouve les concepts économiques de production, de capital, de travail, de ressources naturelles, mais également les concepts issus de la thermodynamique tels que l'énergie, l'entropie ou l'exergie. L'un des enjeux porte justement sur l'interaction entre les dimensions physique et économique du discours théorique, et la manière dont elles se transforment au contact l'une de l'autre. Cela invite à s'intéresser au réseau de relations entre ces concepts, ainsi que la relation de ce réseau théorique avec les modèles et les données.

Un modèle est entendu au sens restreint d'un ensemble de signes et de relations

13. Je ne me suis pas rendu personnellement la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library. J'ai sélectionné les éléments qui me semblaient pertinents à partir des documents référencés sur le site dédié à ces archives. Ces éléments m'ont ensuite été transmis par des personnes présentes sur place.

14. Des questions ont été envoyées à Robert Ayres, Ernst Berndt, Herman Daly, Manuel Frondel, Reiner Kümmel, Christoph Schmidt, et Joseph Stiglitz. Ernst Berndt et Joseph Stiglitz n'ont pas répondu à ces questions.

entre ces signes qui constituent un « système logico-mathématique »¹⁵. Les modèles dont il est question dans cette thèse reposent sur des outils élémentaires d’algèbre linéaire, d’analyse réelle et d’équations différentielles. Dans cette thèse, l’adjectif « analytique » est également utilisé pour désigner les modèles mathématiques, par opposition à l’adjectif « conceptuel » qui renvoie à la théorie telle que définie précédemment. Cette distinction est importante pour pouvoir penser les différentes articulations possibles entre théorie et modèle, plutôt que d’admettre leur correspondance *a priori*. Par ailleurs, il y a parfois en économie une tendance à la fusion entre théorie et modèle, qui rend cette distinction difficile en pratique. Néanmoins, cette tendance à la fusion est intéressante en soi d’un point de vue méthodologique, et il est important d’en analyser les implications.

Enfin, les données empiriques correspondent à des éléments numériques produits par des procédures de quantification, c’est-à-dire par la combinaison de conventions et d’outils de mesures (Desrosières, 1993). Cette combinaison souligne que la théorie fournit le cadre conceptuel indispensable pour découper la réalité en une série d’éléments à comptabiliser. On peut dire en ce sens que les données sont imprégnées de la théorie, sans que cela permette de nier le fait qu’elles sont aussi le fruit d’une confrontation avec le réel. Les données considérées dans cette thèse reflètent la dualité conceptuelle de la conception thermodynamique de l’économie : au côté des mesures agrégées de la production, du capital ou du travail, on trouve des indicateurs de la consommation d’énergie inspirées de considérations thermodynamiques. Quant à la relation entre les données et les modèles, elle relève d’une procédure d’association entre certains symboles mathématiques et des éléments numériques particuliers. La théorie joue un rôle important dans cette procédure d’association, car c’est elle qui permet de donner un sens aux symboles du modèle et aux données empiriques. Cependant, cette association est toujours fragile et sujette à des remises en question. La notion de « proxi » est ainsi régulièrement utilisée pour souligner l’existence d’une déviation possible entre la conception idéale que l’on se fait d’une variable et le jeu de données auquel on l’associe. De ce fait, les contraintes de disponibilité des données exercent une influence importante sur la construction même des modèles empiriques.

Notons par ailleurs que la notion de théorie est également utilisée dans un sens large pour désigner les trois composantes ci-dessus. C’est notamment le cas lorsque je parle de la « théorie néoclassique des ressources », de la « théorie flux-fonds » ou de la « théorie néo-thermodynamique ». De ce fait, le terme de « théorie » a un double emploi qui se justifie par la volonté de ne pas utiliser des catégories qui soient trop éloignées des usages habituels. Cela ne doit pas être interprété comme un présupposé selon lequel le pôle théorique serait dominant par rapport aux pôles analytique et empirique. Au contraire, les relations sont de nature plus complexe, comme l’illustre les premiers éléments ci-dessus.

Avant d’aller plus loin dans l’élucidation des relations entre théories, modèles et données, il est d’ores et déjà possible de souligner en quoi cette approche est adaptée pour

15. Une perspective plus large consiste à inclure également des modèles matériels, tels que la machine hydraulique de Phillips (Morgan, 2012). Cependant, dans cette thèse, il est uniquement question de modèles mathématiques.

étudier la conception thermodynamique de l'économie. Le point de départ des approches de Georgescu-Roegen et Ayres est de mieux prendre en compte la dimension physique du processus économique grâce à la thermodynamique. L'enjeu se situe d'abord au niveau conceptuel. Sans masquer les divergences qui peuvent apparaître à sur ce point, on peut affirmer que Georgescu-Roegen et Ayres partagent des bases conceptuelles similaires. C'est ce qui justifie de parler d'une conception thermodynamique de l'économie commune. Il est alors d'autant plus intéressant de voir comment cette base théorique commune se traduit de manière très différente dans les autres pôles, analytique et empirique. Ainsi, dans les années 1970, la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen se veut une alternative conceptuelle et analytique à la fonction de production néoclassique, mais sans perspective empirique. Tandis que dans les années 2000, Ayres accepte le formalisme de la fonction de production agrégée et privilégie la construction de nouvelles méthodes empiriques. Ces deux approches correspondent donc à des conceptions différentes des relations entre théories, modèles et données. L'un des objectifs de cette thèse est de caractériser de manière plus approfondie cette divergence méthodologique et d'analyser ses conséquences.

Il est intéressant de souligner que cette transformation au sein de la conception thermodynamique de l'économie s'inscrit dans des tendances plus générales de la discipline économique. Bien que ses prémisses remontent au 19^e siècle, c'est réellement au cours du 20^e siècle que le recours à la modélisation mathématique s'impose en économie. Plus précisément, on peut distinguer une période d'entre-deux-guerres marquée par une forme de « pluralisme », et une période après la Seconde Guerre mondiale qui voit la constitution d'une « orthodoxie néoclassique » (Morgan et Rutherford, 1998). La quantification et la modélisation mathématique sont employés par d'autres courants économiques que la théorie néoclassique, dont certains qui lui sont antérieurs. Mais c'est vraiment l'ascension de la théorie néoclassique qui va étendre la place des outils analytiques et empiriques au sein de la discipline. D'abord conçus comme les deux faces d'une même démarche, deux programmes de recherche se distinguent progressivement : d'un côté l'économie mathématique, qui se concentre sur la relation entre théorie et modèle ; et de l'autre, l'économétrie, qui se préoccupe davantage de la relation entre les modèles et les données. Bien que les méthodes empiriques connaissent des développements importants dans les années 1950 et 1960, l'économie mathématique est alors dominante. À titre d'illustration, le modèle d'équilibre général d'Arrow et Debreu (1954) est perçu comme l'une des réalisations les plus prestigieuses de la discipline à cette époque (Weintraub, 2002; Blaug, 2003).

Comme on l'a déjà souligné, la trajectoire de Georgescu-Roegen est étroitement liée à ces mutations de la discipline économique. Dans les années 1930, ses compétences mathématiques sont appréciées au sein de l'économie mathématique naissante, et il connaît une ascension rapide. Par la suite, ses critiques de plus en plus fortes à l'égard de l'orientation formaliste de la discipline expliquent en partie sa marginalisation dans les années 1960 et 1970. Pour autant, les critiques formulées par Georgescu-Roegen ne débouchent pas sur un refus de toute pratique de modélisation, mais sur une conception spécifique des rapports entre théories, modèles et données. C'est dans ce cadre qu'il convient d'appréhender sa théorie flux-fonds de la production.

Si la période allant des années 1950 aux années 1970 est « l'âge de l'économie théorique », la fin du 20^e siècle est marquée par un tournant vers ce que Backhouse et Cherrier (2017) nomment « l'âge de l'économie appliquée ». Dans les années 1980, les développements de la théorie des jeux et des modèles avec asymétrie d'information commencent à morceler la théorie néoclassique. Ils donnent la possibilité de choisir le cadre théorique adapté pour traiter un problème donné, et cela amène progressivement à des modifications conséquentes des théories dans leur forme appliquée. Puis, les années 1990 voient l'arrivée de méthodes expérimentales, de nouvelles méthodes empiriques et de données en plus grande quantité. Dans ce cadre, l'idée d'un « âge de l'économie appliquée » invite à nuancer celle d'un « tournant empirique » au sein de la discipline. D'une part, l'économie appliquée regroupe des pratiques très diverses : adaptation d'un modèle général à un cas particulier, élaboration de politiques économiques, ou confrontation avec les données. D'autre part, une proportion importante des travaux empiriques continue d'avoir une assise théorique. Ces transformations signalent donc la fin d'une période de domination de la théorie sur les pratiques de modélisation, mais la théorie n'a pas disparu pour autant. Elle s'accompagne simplement d'un plus grand nombre d'applications. De ce point de vue, la théorie néo-thermodynamique de la production est en phase avec cette évolution. Elle combine des réflexions théoriques quant à la compatibilité des fonctions de productions agrégées avec les principes de la thermodynamique, et des développements empiriques destinés visant à montrer que l'énergie joue un rôle crucial dans la croissance.

La philosophie de l'économie écologique

Pour penser les rapports entre théories, modèles et données, cette thèse adopte un cadre spécifique. Ce cadre est fondé à la fois sur la littérature méthodologique en économie écologique et des perspectives plus générales issues de la philosophie économique. Les questions méthodologiques ont toujours occupé une place relativement importante au sein de l'économie écologique. De fait, elles étaient déjà centrales chez les précurseurs de ce courant, en particulier dans le principal ouvrage de Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Ce livre a eu une influence importante sur l'économie écologique et il a favorisé un intérêt pour les questions méthodologiques. Néanmoins, l'articulation entre théories, modèles et données proposée par Georgescu-Roegen n'a pas fait l'objet d'une discussion approfondie au même titre que son approche thermodynamique du processus économique. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'y revenir en détail dans cette thèse.

Les discussions méthodologiques à l'intérieur de l'économie écologique se sont donc construites sur une base relativement différente de la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen. Ces discussions se sont concentrées sur la comparaison des grands systèmes de pensée issus de la philosophie des sciences, et sur la question du pluralisme méthodologique. Dans le premier numéro de la revue EE, Norgaard (1989) formule ainsi une critique du positivisme logique, présenté comme la philosophie de référence de la théorie néoclassique. Norgaard reproche au positivisme logique de nier le caractère culturellement déterminé et épistémologiquement limité des théories scientifiques. Il conclut sur la nécessité d'un pluralisme méthodologique pour l'économie écologique, dont le po-

sitivisme logique lui-même ne serait pas exclu. Par la suite, Funtowicz et Ravetz (1994) proposent de faire de l'économie écologique une sciences « post-normale » qui replacerait au cœur de sa réflexion les questions éthiques et méthodologiques, en particulier celles liées à l'évaluation de la qualité et des incertitudes. Cette tendance à déconstruire l'idée d'une vérité scientifique universelle et intemporelle est allée jusqu'à des positions constructivistes relativement poussées, telles que celle de Tacconi (1998). Mais elle est depuis quelques années contrebalancée par des contributions davantage en faveur d'une forme de réalisme, comme c'est le cas de Baumgärtner *et al.* (2008).

La contribution la plus élaborée dans cette direction réaliste est certainement celle de Spash (2012). À l'inverse de la littérature antérieure, Spash propose des définitions relativement claires des notions d'ontologie, d'épistémologie, et de méthodologie. Ainsi, l'ontologie désigne « ce qui existe et constitue les entités premières dont se préoccupe un domaine donné, ainsi que leurs caractéristiques et relations les plus générales ». L'épistémologie, quant à elle, concerne « les bases théoriques sur lesquelles nous créons notre compréhension du monde » et en particulier « l'origine et les limites de la connaissance ». Enfin, la méthodologie correspond aux « principes et pratiques qui sous-tendent la recherche dans une discipline » (Spash, 2012, 37). Comme Spash le reconnaît lui-même, ces aspects ne sont pas toujours faciles à distinguer en pratique. Mais ces catégories n'en constituent pas moins des outils conceptuels utiles pour appréhender les caractéristiques philosophiques sous-jacentes aux théories économiques. C'est la raison pour laquelle, dans cette thèse, elles seront utilisées selon les significations précisées ci-dessus. Ces définitions correspondent notamment à la manière dont ces notions ont été utilisées pour fournir un premier examen des propositions thermo-économiques dans la sous-section 0.1.1.

Sur cette base, Spash propose le « réalisme critique » comme fondement philosophique possible pour l'économie écologique. Au niveau ontologique, cette perspective suppose qu'il existe une réalité objective et indépendante de la représentation que l'on s'en donne. Elle s'inscrit donc en contradiction vis-à-vis d'une position constructiviste radicale. Spash (2012, 42) souligne que cette position réaliste est nécessaire en économie écologique, car « l'idée que toute réalité est socialement construite entre en conflit avec le statut donné aux lois de la thermodynamique en tant que représentations scientifiques de la réalité biophysique ». On voit donc que la conception thermodynamique de l'économie occupe une place particulièrement importante dans cette perspective. Au niveau épistémologique, le réalisme critique considère qu'il est impossible de connaître la réalité de manière vraie et définitive. Il suggère au contraire qu'il est possible d'appréhender réalité sous des angles différents. Le réalisme critique tente ainsi de concilier l'existence objective de la réalité et l'incapacité à en avoir une connaissance absolue. Dans ce cadre, il est donc possible d'envisager différentes manières de construire le savoir, c'est-à-dire une forme de pluralisme méthodologique. Néanmoins, Spash s'oppose à un pluralisme trop permissif. Il propose au contraire d'encadrer ce pluralisme par un certain nombre de principes. Spash met notamment l'accent sur la nécessité d'une interdisciplinarité fondée sur des bases ontologiques et épistémologiques communes, et ayant pour but une intégration conceptuelle forte. On reviendra sur l'interdisciplinarité dans la sous-section suivante, mais l'on peut déjà noter que cette approche donne la priorité aux enjeux conceptuels.

Au-delà de cette insistance sur l'intégration conceptuelle, l'approche de Spash ne permet pas vraiment de penser l'articulation entre théories, modèles et données. Il est même nécessaire de s'en distinguer sur plusieurs points. Par exemple, l'utilisation de l'adjectif « pré-analytique », emprunté par Spash à Daly et Schumpeter, est problématique du point de vue des définitions adoptées plus haut. D'une part, il recouvre de manière floue et fluctuante les aspects ontologiques, épistémologiques et méthodologiques. D'autre part, il est utilisé en regard d'une compréhension élargie de l'adjectif « analytique », qui inclut également le pôle théorique. À l'inverse, dans cette thèse, l'adjectif analytique est utilisé uniquement pour désigner les modèles. D'ailleurs, le rôle des modèles est traité de manière superficielle par Spash. Il critique le manque de réalisme des modèles néoclassiques, mais il ne fournit pas réellement de principes pour évaluer le réalisme d'un modèle.

En restant dans la littérature méthodologique propre à l'économie écologique, Baumgärtner *et al.* (2008) proposent une grille de lecture proche de celle adoptée ici. La grille de lecture de Baumgärtner *et al.* repose sur le triptyque : concepts, modèles, études de cas. Dans le cadre de cette thèse, leur approche ne semble cependant pas satisfaisante à deux égards. D'une part, la notion d'étude de cas est plus large et vague que celle de données empiriques. D'autre part, leur conception des modèles mélange une tradition structuraliste et une approche davantage portée sur les fonctions des modèles, alors que celles-ci sont habituellement présentées comme antagonistes. Pour mieux appréhender l'articulation entre théories, modèles et données, il est préférable de s'appuyer sur la littérature de philosophie économique qui traite de la modélisation.

Registre de la représentation et registre des manipulations

L'intérêt de la philosophie des sciences, et notamment de la philosophie économique, pour l'articulation entre théories, modèles et données, a connu un renouveau important à la suite de l'ouvrage *Models as Mediators* (Morgan et Morrison, 1999b). Celui-ci s'inscrit dans une tendance à remettre en cause la conception « sémantique », ou « structuraliste », des modèles. La conception sémantique suggère que les modèles doivent être dans une relation isomorphique avec le système qu'ils entendent décrire¹⁶. Le principal problème soulevé à l'encontre de cette conception est que le réel ne se donne pas d'emblée comme structure et que ce sont davantage les théories et les modèles qui créent cette dernière. L'approche « pragmatique » ouvre alors la voie à la prise en compte des intentions proprement humaines dans le processus de modélisation. Ainsi, Giere (2004) élargit le champ d'investigation en prenant en compte le scientifique lui-même et les buts qu'il poursuit, tandis que Suárez (2004) abandonne l'idée de fonder la notion de représentation pour se concentrer sur la capacité des représentants à produire des informations nouvelles.

Morgan et Morrison (1999a) partagent avec la conception pragmatique un même scepticisme à l'égard de la conception sémantique. Mais elles proposent de concevoir les modèles comme des « médiateurs » entre la théorie et les données¹⁷. Leur approche met

16. Pour une présentation plus détaillée de la conception sémantique, voir par exemple Suppe (1989), French et Ladyman (1999), ou da Costa et French (2000).

17. Morgan et Morrison ne donnent pas de définition précise du sens qu'elles attribuent à ces termes. Elles notent cependant que la théorie n'est pas toujours facile à distinguer des modèles eux-mêmes, si ce

l'accent sur deux propriétés des modèles. Premièrement, Morgan et Morrison soulignent la relative « autonomie » des modèles vis à vis des théories et des données. Cette autonomie provient du fait que la construction d'un modèle implique des simplifications qui tiennent davantage à la logique du modèle lui-même. Cette étape de construction est envisagée comme une forme d'« artisanat ». Elle implique la sélection d'éléments variés qui doivent être rendus compatibles entre eux¹⁸. Cependant, Morgan et Morrison n'abandonnent pas totalement la notion de « représentation ». Elles soulignent au contraire que le modèle doit nécessairement s'appuyer sur des aspects tirés de la théorie et des données pour produire des informations pertinentes à leur égard.

La deuxième dimension sur laquelle Morgan et Morrison mettent l'accent est le fait que les modèles remplissent une diversité de « fonctions ». Elles proposent de répartir schématiquement ces fonctions selon trois groupes. Premièrement, les modèles peuvent servir à explorer une théorie en étudiant les conséquences logiques de ses postulats. Cette démarche peut amener à former de nouveaux concepts ou à modifier la perception de ceux qui préexistaient, et ainsi contribuer à la construction même de la théorie. Deuxièmement, les modèles sont utilisés comme des outils d'investigation empirique. Cette investigation peut viser à tester empiriquement une théorie dont le modèle est l'incarnation, à l'aide notamment d'indicateurs statistiques. Mais elle peut plus simplement servir d'instrument de mesure. À partir de données jugées adéquates, le modèle peut servir à estimer des relations entre les variables, comme c'est le cas dans les modèles macroéconométriques. Il arrive aussi que la relation soit plus directe, lorsque le modèle sert à structurer les données, à l'instar des matrices input-output, ou que la structure du modèle est réduite au minimum, comme dans les modèles VAR. Enfin, les modèles interviennent dans la conception de politiques économiques, par exemple pour le contrôle de l'inflation par les banques centrales. Dans ce cadre, les modèles sont conçus comme des moyens d'anticiper les conséquences de certaines actions.

Plus récemment, cette perspective a été reformulée par Morgan (2012) à travers l'idée que le propre des modèles est de permettre des « manipulations », et non d'être de simples descriptions figées. Selon Morgan, ces possibilités de manipulation constituent le principal intérêt des modèles, et la question de la représentation est secondaire. Morgan s'est néanmoins intéressée au rôle des « histoires » dans la connexion entre les modèles et la réalité (Morgan, 2001). Les histoires en question consistent en une description conjointe du déroulement de certains événements réels ou hypothétiques, et des mécanismes du modèle. Ces histoires permettent ainsi d'évaluer la capacité du modèle à expliquer l'enchaînement causal des événements. Leur position entre abstraction théorique et événements concrets

n'est sous la forme d'un cadre stabilisé ayant fait la preuve de la robustesse des résultats que l'on peut en déduire (Morgan et Morrison, 1999a, 18f, 3). Cette conception des rapports entre théorie et modèle est compatible avec la définition adoptée plus haut.

18. Boumans (2004) insiste particulièrement sur ce point en proposant de concevoir les modèles comme des « recettes » composées de divers ingrédients. Tout en s'inscrivant dans la continuité de Morgan et Morrison, Boumans suggère qu'il faut pour cela élargir le cadre d'analyse au-delà des notions de théories, de modèles et de données, pour inclure également les analogies, les concepts mathématiques, ou encore les faits stylisés. Tout en prêtant attention aux aspects que Boumans met ainsi évidence, je conserve ici le cadre simplifié de l'articulation entre théories, modèles et données.

ferait leur force cognitive. Alors que le modèle est généralement présenté comme une vision simplifiée, les histoires permettraient de reprendre contact avec la complexité du monde, et ainsi de satisfaire une exigence minimale de représentation.

Néanmoins, la littérature ci-dessus tend à remettre en cause l'idée qu'un système de pensée scientifique puisse se fonder sur une cohérence intégrale entre théories, modèles et données. Par conséquent, un ensemble de concepts et de données peut correspondre à une multiplicité de modèles. Inversement, un modèle peut être interprété selon différents cadres théoriques et empiriques¹⁹. Dans la continuité de l'approche pragmatique, la représentation tient alors davantage aux perceptions partagées au sein d'une communauté scientifique, et non plus à des critères absolus. De plus, la représentation est limitée par l'autonomie des modèles, qui est une condition nécessaire pour que les modèles fournissent des possibilités de manipulations. Du point de vue du réalisme critique présenté plus haut, cette perspective met l'accent sur la dimension « critique », c'est-à-dire sur l'idée qu'il existe différentes manières d'appréhender le monde et que celles-ci sont influencées par la culture de la communauté considérée. Cependant, cette conception des modèles éloigne considérablement de la dimension « réaliste », en abandonnant toute ambition de formuler des critères pour évaluer la qualité d'un modèle.

Pour cette raison, il est intéressant de la combiner avec l'approche que Mäki (2009c) présente sous l'acronyme MISS pour « Models as Isolations and Surrogate Systems ». « Isolations » renvoie ici au fait que les modèles fonctionnent sur la base de constructions fictives visant à capturer certaines caractéristiques de la réalité, à l'image des idéaux-types chez Max Weber. Mäki souligne ainsi le caractère idéalisé des entités et des relations causales qui interviennent dans les modèles. Cette partie de son analyse peut donc être traduite par l'idée de « modèles comme idéalizations ». La notion de « système subrogé », quant à elle, désigne une situation dans laquelle le modélisateur cherche sérieusement à étayer les bases de la « ressemblance » entre le modèle et le système qu'il tente d'appréhender. Cette démarche est mise en œuvre à travers ce que Mäki nomme le « commentaire ». Le commentaire pose ainsi la question de la représentation, tout comme les « histoires » dont parle Morgan. Au contraire, un « système de substitution » correspond à une situation dans laquelle le modélisateur abandonne dès le départ la discussion relative aux ressemblances.

Mäki (2011) précise les points sur lesquels doit selon lui porter le commentaire. Il refuse d'adopter une perspective complètement pragmatiste, qui ferait reposer la vérité uniquement sur l'utilité des modèles et la capacité de persuasion du modélisateur. Il propose plutôt d'articuler cette dimension pragmatiste avec la dimension ontologique de la ressemblance entre le modèle et le système visé. Placer cette ressemblance dans les hypothèses et les résultats du modèle ne lui apparaît pas davantage satisfaisant, car

19. Knuuttila (2005) est particulièrement explicite sur ce point lorsqu'elle propose de concevoir les modèles comme des « artefacts » dotés de deux dimensions, matérielle et idéale. La dimension matérielle renvoie au support concret par lequel le modèle existe, ce que Knuuttila qualifie de « véhicule-signe ». La dimension idéale désigne la relation que les utilisateurs du modèle créent entre lui et divers aspects du monde. Cette distinction permet de penser la manière dont un même véhicule-signe peut supporter différentes interprétations. Sans reprendre cette terminologie spécifique, cette idée paraît intéressante pour penser la fragilité des liens qui unissent un modèle mathématique à un cadre conceptuel spécifique.

le propre du modèle est d'en rendre compte de manière idéalisée. Mäki conclut que la ressemblance doit être localisée dans le mécanisme causal identifié par le modèle. Dans ce cadre, il revient au commentaire d'articuler le mécanisme interne au modèle avec les événements qui se déroulent dans la réalité, à l'instar des histoires de Morgan. Cette démarche doit notamment permettre de définir les composantes qui sont particulièrement importantes pour évaluer la qualité du modèle. Mäki qualifie ces composantes d'« hypothèses critiques », car elles jouent un rôle crucial dans le mécanisme causal, tandis que d'autres composantes peuvent s'accommoder d'une idéalisation plus poussée. Ces outils conceptuels fournissent ainsi une grille de lecture intéressante pour discuter de la qualité des modèles.

La récente contribution méthodologique de Dani Rodrik (2015), intitulée *Economics Rules*, apparaît largement convergente avec la perspective de Mäki ci-dessus, tout en soulevant de nouveaux enjeux²⁰. L'une des questions les plus originales, par rapport à la littérature antérieure, est certainement celle qui concerne le pluralisme des modèles. Pour Rodrik, le pluralisme des modèles doit être encouragé, car il permet de fournir un éclairage plus complet de la réalité économique et favorise une certaine réflexivité par rapport à la portée des modèles. À la suite de Rodrik, Mäki (2018) propose de distinguer un pluralisme quantitatif, qui serait le produit de l'application d'un même cadre théorique dans divers contextes, et un pluralisme qualitatif fondé sur une diversité de cadres théoriques. Aydinonat (2018a), quant à lui, fait le lien entre ce pluralisme qualitatif et l'idée que les modèles servent à identifier des mécanismes causaux. En isolant certains éléments sur des bases théoriques, les modèles fournissent chacun une vision partielle, que la diversité théorique peut permettre de compenser. Cette approche ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour traiter de controverses opposant plusieurs modèles, en incitant à mettre l'accent sur les différentes manières de construire et d'utiliser des modèles²¹.

Ces développements en philosophie économique sont par ailleurs cohérents avec le réalisme critique mis en avant plus haut. Mäki (2012) souligne en effet que son approche se fonde sur ce qu'il nomme un « réalisme minimal ». Il suggère que les objets auxquels s'intéresse l'économie sont en général accessibles à une perception relativement directe (« commonsensibles »), à la différence de bien des objets de la physique²². Cela ne signifie pas que les relations qui les lient les uns aux autres sont évidentes. Pour pouvoir appréhender ces relations, il est nécessaire de procéder à des opérations cognitives diverses, qui permettent de construire une représentation mentale simplifiée de la réalité. Ces opérations cognitives déforment donc la réalité sous-jacente, mais elles ne remettent pas

20. Cette publication a notamment donné lieu à un numéro spécial du *Journal of Economic Methodology* (Aydinonat, 2018b).

21. Sergi (2017) propose une perspective de ce genre en ce qui concerne la modélisation macroéconomique. Il met notamment en avant le fait que la controverse entre l'approche des cycles réels et les nouveaux keynésiens s'est résolue par un compromis plutôt que par un consensus. Ce compromis a abouti aux modèles DSGE.

22. Pour illustrer cette idée, Mäki (2012, 8) dresse une longue liste de notions : « Land, labour, and capital. Markets, money, prices. Private good, public good, merit good. Demand and supply. Individuals, households, business firms, central banks, government bureaus. Preferences, expectations, greed and fear. » On peut notamment relever la présence des facteurs de production qui constituent un enjeu important dans le cadre de cette thèse.

en question son existence. La complexité des phénomènes à l'œuvre fait qu'une théorie économique ne peut jamais être considérée comme étant définitivement vraie. Elle doit au contraire être questionnée en permanence. Cette dimension critique fait écho à l'approche pragmatique et souligne les déterminants culturels de la science, tout en refusant un constructivisme radical. Cette position intermédiaire se traduit notamment à travers l'importance accordée par Mäki au commentaire dans l'évaluation de la pertinence d'un modèle.

Par ailleurs, il ne s'agit pas ici d'opposer l'approche réaliste de Mäki à l'idée des modèles comme médiateurs chez Morgan, mais au contraire de s'appuyer sur ces deux cadres conceptuels. Dans cette thèse, ces perspectives sont considérées comme constituant deux « registres » complémentaires pour étudier les modèles. D'une part, le registre de la « représentation » concerne la relation entre le modèle et le monde réel, par l'intermédiaire de la théorie. Dans ce cadre, les outils développés par Mäki permettent d'évaluer la qualité d'un modèle et de discuter son degré de réalisme. D'autre part, le registre des « manipulations » renvoie aux applications auxquelles servent les modèles. L'analyse par Morgan des différentes fonctions épistémiques des modèles est particulièrement utile sur ce point, notamment en ce qui concerne les relations entre modèles et données. La combinaison de ces deux registres pour étudier les modèles économiques permet de souligner les enjeux méthodologiques sous-jacents. Elle amène en particulier à s'interroger sur l'interdépendance entre ces deux registres, c'est-à-dire à la question de savoir dans quelle mesure les fonctions auxquelles l'on destine les modèles influencent leur construction, et réciproquement.

Pour illustrer l'intérêt de cette double perspective dans le cadre de cette thèse, il est utile d'examiner brièvement la position de la fonction de production agrégée par rapport à chacun de ces deux registres. La fonction de production agrégée apparaît d'abord comme un outil conçu à des fins empiriques. En particulier, dans la contribution pionnière de Cobb et Douglas (1928), le recours à la fonction de production agrégée est justifié par la volonté d'analyser la relation entre les indices agrégés de la production, du capital, et du travail. Ce sont donc en quelque sorte les données qui favorisent l'émergence du modèle. Mais la fonction de production agrégée est par la suite utilisée dans des modèles purement théoriques, tels que le modèle de croissance de Solow (1956). La question se pose alors de savoir dans quelle mesure ce formalisme reflète effectivement la structure du processus de production. En particulier, certains travaux s'interrogent sur la possibilité de construire une fonction de production agrégée à partir d'une représentation désagrégée de la production. Les contributions de Sraffa (1960) ou de Fisher (1969) montrent que cette question soulève de nombreuses difficultés qui remettent en cause les fondements théoriques de la fonction de production agrégée. Pourtant, cette représentation de la production perdure, tant dans les modèles théoriques que dans les applications empiriques. La conception thermodynamique de l'économie reflète ces mêmes tensions. D'un côté, Georgescu-Roegen critique la fonction de production agrégée sur le plan théorique et propose d'adopter une représentation désagrégée. De l'autre, Ayres et Kümmel adoptent le formalisme des fonctions de production et s'en servent afin de montrer empiriquement le rôle de l'énergie dans la croissance. Le cadre conceptuel développé dans cette sous-

section permet d’approfondir les enjeux méthodologiques sous-jacents à cette divergence, en s’appuyant sur le registre de la représentation et le registre des manipulations.

0.2.3 L’interdisciplinarité entre économie et thermodynamique

Les rapports entre l’économie et la thermodynamique constituent le second enjeu méthodologique majeur derrière la conception thermodynamique de l’économie. Ces rapports peuvent être pensés comme l’interaction entre deux systèmes de théories, de modèles et de données. Cette manière d’appréhender les relations entre deux disciplines ne serait pas adaptée en toute généralité. Sa pertinence tient ici au fait que la branche de l’économie considérée et la thermodynamique partagent cette même structure. Il est alors utile de s’appuyer sur la philosophie des sciences pour comprendre les différentes manières selon lesquelles ces relations peuvent s’organiser, en l’adaptant à ce cadre spécifique.

Klein (2010) fournit une première taxonomie des relations entre disciplines. Elle définit tout d’abord la multidisciplinarité comme une juxtaposition de connaissances sur un objet. Par exemple, il peut s’agir d’utiliser une discipline pour en contextualiser une autre. De manière générale, la multidisciplinarité se caractérise donc par l’absence d’interaction forte entre les disciplines mobilisées. À l’inverse, l’interdisciplinarité donne lieu à une interaction transformatrice entre les disciplines, qui peut prendre des formes diverses. Klein propose notamment de distinguer l’interdisciplinarité méthodologique et l’interdisciplinarité théorique. La première concerne l’importation d’outils et de méthodes issus d’une autre discipline, mais aussi plus généralement une réorganisation des principes qui guident la recherche. Dans le cadre adopté ici, l’interdisciplinarité méthodologique renvoie donc aux méthodes et aux principes qui structurent les relations entre théories, modèles et données. L’interdisciplinarité théorique, quant à elle, affecte le contenu même d’une discipline, par l’intégration d’éléments issus d’une autre. L’adjectif « théorique » est donc utilisé dans un sens large, qui recouvre théories, modèles et données. Tout en conservant cette terminologie, il s’avère donc utile de préciser si le principal canal d’intégration entre les disciplines est conceptuel, analytique ou empirique.

Enfin, le troisième type de relation entre disciplines est qualifié de transdisciplinarité. Il réunit des perspectives très disparates. Il peut s’agir de la poursuite d’une quête d’unification, par exemple, entre les différentes branches de la physique. La transdisciplinarité peut également désigner la recherche de cadres conceptuels qui transcendent les frontières disciplinaires, comme c’est le cas du structuralisme en sciences sociales. Cependant, le sens le plus courant de la transdisciplinarité renvoie à l’idée que la recherche devrait être davantage structurée par les problèmes auxquels elle tente de répondre et non par des barrières disciplinaires *a priori*. Cette perspective inclut notamment l’idée de « science post-normale » formulée par Funtowicz et Ravetz (1994). Ces derniers insistent sur le fait que la construction de liens entre science et société est nécessaire dans le processus de résolution des problèmes, par exemple, à l’aide de dispositifs participatifs impliquant des acteurs non scientifiques mais directement concernés par le problème. L’idée de science post-normale constitue justement l’une des approches influentes au sein de la littérature méthodologique en économie écologique, et c’est dans cette perspective que la transdisciplinarité y est revendiquée comme un principe central (Max-Neef, 2005; Hirsch Hadorn

et al., 2006; Baumgärtner *et al.*, 2008; Jahn *et al.*, 2012). Dans ce cadre, les problèmes environnementaux sont perçus comme des questions qui nécessitent de faire appel au savoir tacite de différents groupes sociaux, pour cerner les enjeux techniques et éthiques sous-jacents.

L'interdisciplinarité constitue également un principe de référence en économie écologique. Pour Baumgärtner *et al.* (2008), elle découle du sujet même. Selon eux, l'étude des interactions entre l'économie et l'environnement nécessite de s'appuyer sur des sciences naturelles, telles que la physique, la chimie, ou la biologie, et des sciences sociales, telles que l'économie, les sciences politiques ou la sociologie. Plus précisément, en économie écologique, l'interdisciplinarité devrait prendre la forme d'une intégration forte entre les disciplines, portant notamment sur les méthodes et les concepts. L'interdisciplinarité défendue par Baumgärtner *et al.* recouvre donc des aspects méthodologiques et théoriques de l'interdisciplinarité dans la taxonomie de Klein. Néanmoins, Baumgärtner *et al.* suggèrent que l'intégration conceptuelle est une condition préalable au reste de la démarche interdisciplinaire, notamment aux niveaux analytiques et empiriques. Cette intégration conceptuelle nécessite une réflexion sur les congruences, complémentarités et contradictions entre concepts issus de différentes disciplines. Cette réflexion doit déboucher sur une base conceptuelle cohérente via un travail d'ajustement entre les concepts. L'enjeu est à la fois méthodologique, comme condition nécessaire pour construire un savoir interdisciplinaire rigoureux, et pragmatique, car il vise à faciliter la collaboration entre groupes de scientifiques en évitant les malentendus.

Spash (2012) va en quelque sorte plus loin en suggérant que l'intégration entre disciplines se joue au niveau ontologique. Il associe en particulier au réalisme critique une ontologie « hiérarchique » dans laquelle coexistent différentes strates de réalité encastées les unes dans les autres. De ce point de vue, la dimension économique de la réalité est encadrée dans la dimension biologique, elle-même encadrée dans la dimension physique²³. Ces encastements impliquent que les principes qui régissent le fonctionnement d'une strate s'appliquent également aux strates qui sont encadrées dans celle-ci. Suivant cette logique, la relation d'encastrement entre les dimensions économique, biologique et physique implique notamment que les processus économiques et biologiques sont soumis aux lois de la thermodynamique. Contrairement à ce que pourrait laisser penser l'emploi du terme « hiérarchique », ces relations entre strates de la réalité n'impliquent donc pas un ordre à proprement parler. Il ne s'agit pas de dire qu'une strate est plus importante qu'une autre, mais simplement que les propriétés d'une strate se transmettent par la relation d'encastrement.

Par ailleurs, Spash insiste sur le fait que dans le réalisme critique ce type d'encastrement est « anti-réductionniste ». C'est-à-dire que chaque strate est irréductible aux strates dans lesquelles elle est encadrée, tout en étant compatible avec elles. Chaque strate dispose donc de propriétés *sui generis* qui font qu'elle ne peut être étudiée simplement à partir des catégories utilisées pour examiner les autres strates. Dans cette perspective, les comportements économiques, la valeur ou encore les prix constituent des

23. Bien qu'il utilise le concept d'« embeddedness », traduit ici par « encastrement », Spash ne fait pas de référence directe à Karl Polanyi.

objets proprement économique, dont les caractéristiques ne peuvent être réduites aux propriétés physiques des biens échangés et de leur processus de production. En ce sens, un certain découpage disciplinaire en fonction des différentes strates ontologiques fait sens pour permettre de développer des approches à même d'en cerner les spécificités. Mais il ne doit pas non plus masquer les liens existants entre ces différentes strates, ce qui requière une démarche interdisciplinaire pour en tenir compte.

Ces contributions fournissent donc un cadre conceptuel pour penser la manière dont l'interdisciplinarité est mise en œuvre dans la conception thermodynamique de l'économie. Pour cela, j'utilise dans le reste de la thèse la notion de « dimension physique » pour désigner les flux de matière et d'énergie, et les principes de la thermodynamique qui leur sont associés. La « dimension économique » renvoie quant à elle aux propriétés spécifiques de la strate économique, tels que la valeur et les prix. Ces deux dimensions sont celles qui feront l'objet du plus d'attention dans la thèse. Néanmoins, il est important de noter que la « dimension biologique » joue également un certain rôle dans la conception thermodynamique de l'économie. Elle permet de penser le processus économique comme le prolongement du processus biologique, c'est-à-dire comme un processus dont la fonction principale est d'assurer la reproduction des conditions matérielles d'existence. Par ailleurs, comme le processus biologique, le processus économique est conçu comme un processus évolutionnaire, marqué par des changements qualitatifs.

Les éléments qui précèdent fournissent d'ores et déjà des outils pour caractériser la conception thermodynamique de l'économie, telle qu'elle a été définie dans la sous-section 0.1.1. La première proposition thermo-économique, selon laquelle la production et la consommation de biens et services reposent sur la transformation de flux de matière et d'énergie, fait clairement écho à l'idée d'une ontologie hiérarchique. Cette proposition souligne le fait que les activités économiques ont de manière inhérente une dimension physique. La deuxième et la troisième propositions thermo-économiques suggèrent quant à elles que les principes de la thermodynamique sont particulièrement importants pour rendre compte de cette dimension physique, et par conséquent qu'ils doivent être intégrés dans la théorie économique. Sur ce point, la position de Baumgärtner *et al.* (2008) invite à penser que cette intégration entre la thermodynamique et l'économie doit d'abord avoir lieu au niveau conceptuel, avant d'être éventuellement répercutée aux niveaux analytique et empirique. Cette perspective suggère donc que la thermodynamique fournit d'abord et avant tout une grille de lecture conceptuelle pour appréhender la dimension physique du processus économique. Ainsi, on voit qu'il y a potentiellement des liens forts entre les principes adoptés dans la littérature sur la philosophie de l'économie écologique et la conception thermodynamique de l'économie. Cependant, il ne s'agit pas de supposer *a priori* que ces principes sont sous-jacents à la conception thermodynamique de l'économie, mais plutôt de voir en quoi elle suit effectivement ces principes, ou s'en écarte sur certains points.

Néanmoins, on peut d'ores et déjà souligner que la conception thermodynamique de l'économie se distingue de travaux qui envisagent les relations entre l'économie et la physique sous l'angle principalement analytique du transfert de formalismes. Ce type de relations est notamment discuté par Georgescu-Roegen (1971), qui voit dans le margina-

lisme une tentative d'imiter les modèles de la mécanique rationnelle. Georgescu-Roegen considère en particulier que cela amène la théorie néoclassique à ne prendre en compte que des phénomènes réversibles, à l'image de la mécanique. Selon lui, la théorie néoclassique laisse donc de côté les phénomènes irréversibles, dont la thermodynamique a pourtant montré l'importance. Cette interprétation est par la suite développée de manière plus approfondie par Mirowski (1989b), qui analyse la construction de la théorie néoclassique à l'aune de ses rapports avec la mécanique. Par ailleurs, d'autres travaux s'intéressent aux relations formelles entre les modèles économiques et ceux de la thermodynamique (Lichnerowicz et Lichnerowicz, 1971; Baumgärtner, 2005; Sousa et Domingos, 2006b,a). Ces approches ont cependant peu à voir avec la question des ressources naturelles, et les enjeux ontologiques et conceptuels qu'elle soulève. C'est le cas plus généralement de l'ensemble du courant connu sous le nom d'« éconophysique ». Ces aspects n'entrent donc pas dans le cadre de cette thèse.

La littérature méthodologique en économie écologique fournit ainsi des outils conceptuels pour appréhender la conception thermodynamique de l'économie. Cependant, les approches thermodynamiques ayant eu une influence importante sur l'économie écologique, ce cadre peut apparaître comme une rationalisation *a posteriori* de la démarche sous-jacente à ces approches. Bien que cette cohérence supposée nécessite d'être interrogée, elle rend ces catégories *a priori* peu utiles pour penser les rapports avec la théorie néoclassique des ressources. Pour mettre plus l'accent sur la dimension conflictuelle dans les interactions entre disciplines, on peut se tourner vers la littérature sur l'impérialisme scientifique. Mäki (2009a, 2013) propose notamment un cadre conceptuel pour caractériser l'impérialisme scientifique comme une forme spécifique d'interaction interdisciplinaire. Si cette analyse est partie des débats concernant l'impérialisme économique, Mäki la conçoit comme un cadre général pour penser l'impérialisme scientifique. En particulier, on peut s'en servir pour s'intéresser à la situation inverse qui voit la thermodynamique être utilisée pour contester la pertinence de la théorie néoclassique de la production.

La démarche de Mäki consiste à définir l'impérialisme scientifique en le débarrassant de la tonalité péjorative qui lui est initialement attachée pour en faire une catégorie descriptive. Il définit pour cela la « portée » d'une discipline comme l'ensemble des problèmes et des phénomènes auxquels elle entend répondre. Dans ce cadre, l'« expansionnisme » correspond à une tentative d'élargir le territoire des phénomènes expliqués, et l'« impérialisme » est un cas particulier d'expansionnisme où ce territoire est déjà occupé par une autre discipline²⁴. Il peut donc exister un expansionnisme non impérialiste. Ce type d'expansionnisme se manifeste dans le développement de la plupart des théories scientifiques, qui naissent pour expliquer une classe de phénomènes particuliers et se révèlent progressivement aptes à en expliquer de nouveaux.

Dans un second temps, Mäki propose de définir les conditions dans lesquelles

24. La philosophie de l'impérialisme scientifique invite cependant à ne pas associer de dimension normative *a priori* à ces différentes situations. L'expansionnisme est traditionnellement associé à une vision positive en philosophie des sciences, selon laquelle il garantirait une plus grande fiabilité de la théorie en question. Néanmoins, Mäki (2009a) suggère de rester neutre à ce sujet. Par ailleurs, Mäki *et al.* (2018) mettent en avant que l'analyse des interactions impérialistes gagne à ne pas présupposer une conception pluraliste de la science, ni le fait qu'il existe des frontières légitimes pour les disciplines.

une démarche impérialiste peut être jugée satisfaisante à travers ce qu'il nomme des « contraintes ». Pour commencer, la contrainte ontologique repose sur la distinction entre deux types d'expansion : l'une dite « dérivationnelle », dans laquelle le cadre théorique permet de simuler plus de phénomènes, mais sans se préoccuper de la vraisemblance de l'explication qu'il en fournit ; et l'autre dite « ontologique », qui cherche, dans l'élargissement de la portée de la théorie, à identifier une essence commune aux phénomènes. La contrainte épistémologique souligne quant à elle les incertitudes qui doivent être sérieusement prises en compte, tant au niveau du réalisme des hypothèses critiques, que de la confirmation par les données. La contrainte axiologique invite ensuite à considérer les valeurs non épistémiques qui définissent des problèmes comme étant plus ou moins importants. Et enfin, la contrainte institutionnelle concerne l'attitude des acteurs de l'impérialisme vis-à-vis des normes scientifiques qui préexistent sur le territoire colonisé. Il s'agit en particulier de savoir si les acteurs de l'impérialisme font preuve de tolérance et d'une ouverture à la discussion critique sur leur démarche.

Selon Mäki, ces quatre contraintes fournissent des critères sur la base desquels il est possible d'évaluer la pertinence d'une démarche impérialiste. Plutôt que de condamner *a priori* l'impérialisme scientifique, Mäki lui laisse une chance. Mais il définit les conditions d'une démarche satisfaisante. Ces contraintes sont tout à fait compatibles avec le réalisme critique. Elles mettent l'accent sur un objectif ontologique tout en reconnaissant les incertitudes qui pèsent sur la connaissance qui émerge de la démarche impérialiste, et par conséquent la nécessité de tenir compte des aspects pragmatiques. Étant donné la perspective adoptée dans cette thèse, ce sont principalement les contraintes ontologique et épistémologique qui seront utiles. Les contraintes axiologique et institutionnelle renvoient en effet au contexte social dans lequel la démarche impérialiste est mise en œuvre. Cette dimension est volontairement laissée de côté dans la thèse pour se concentrer sur les enjeux méthodologiques.

Pour voir brièvement en quoi ce cadre conceptuel peut être utile dans cette thèse, il est possible de relire les débats des années 1970 au prisme de l'impérialisme scientifique. Ainsi, le rapport du Club de Rome (Meadows *et al.*, 1972) est perçu par les théoriciens de la croissance comme une tentative de se substituer à leur explication des dynamiques de long-terme. Ils y répondent par une contre-attaque (Stiglitz, 1974b; Solow, 1974b) au cours de laquelle ils étendent la portée de leur théorie à la question des ressources naturelles, exclue auparavant de leurs préoccupations. Dans les deux cas, ces actions impérialistes sont menées par des acteurs extérieurs au domaine visé : les ingénieurs de l'équipe Meadows donnent leur vision de l'économie ; et les théoriciens de la croissance proposent leur conception des ressources naturelles. À l'inverse, l'économie écologique émerge grâce à une forme d'impérialisme des sciences naturelles venu de l'intérieur de la discipline économique, notamment à travers les travaux de Georgescu-Roegen (1966a, 1971), Boulding (1966) et Daly (1968). D'autres auteurs, comme Ayres et Kümmel, traversent la frontière des sciences naturelles vers l'économie. En ce sens, l'économie écologique s'apparente à une réaction critique contre l'impérialisme de la théorie néoclassique de la croissance sur les ressources naturelles.

Cependant, la conception thermodynamique de l'économie n'apparaît pas comme une

forme pure d'impérialisme physique sur le territoire de l'économie. L'enjeu n'est pas de substituer la thermodynamique à la théorie de la production ou de se passer de tous les concepts et outils de l'économie. Il s'agit plutôt de trouver une combinaison satisfaisante des deux qui mette l'accent sur une intégration conceptuelle. Les notions de capital, de travail et de production sont conservées, mais l'introduction de concepts issus de la thermodynamique à leurs côtés modifie leur identité et les relations qui les lient. Cela souligne au passage une difficulté inhérente à la définition de l'impérialisme, qui tient à la place laissée à la discipline qui occupe précédemment le territoire visé. Adopter une définition stricte ne tenant compte que des démarches qui font table rase des théories préexistantes mènerait certainement à rendre le concept d'impérialisme inopérant. Mais la limite à laquelle on passe de l'impérialisme à une interdisciplinarité mutuellement consentie n'est pas claire non plus. Davantage que le concept d'impérialisme en lui-même, ce sont donc les contraintes proposées par Mäki qui sont utiles pour étudier les rapports conflictuels entre la conception thermodynamique de l'économie et la théorie néoclassique des ressources.

0.3 Problématique

Il est maintenant possible de reformuler les objectifs de cette thèse à l'aide des développements qui précèdent. La conception thermodynamique de l'économie en constitue l'objet principal. Elle se caractérise pour commencer par une vision commune, résumée par les propositions thermo-économiques ci-dessous.

Propositions thermo-économiques :

- La production de biens et services repose sur la transformation de flux de matière et d'énergie.
- La matière et l'énergie sont soumises aux principes de la thermodynamique.
- La théorie économique doit prendre en compte les principes de la thermodynamique.

Cependant, à l'intérieur de cette même conception, deux approches de la représentation de la production se distinguent. D'un côté, Georgescu-Roegen et Daly, entre autres, rejettent de manière radicale le formalisme des fonctions de production agrégées et suggèrent que la théorie flux-fonds de la production est une alternative pertinente. Cette perspective combine à la fois une critique méthodologique de l'utilisation des modèles mathématiques en économie, et l'insistance sur les aspects physiques du processus économique. De l'autre, Ayres et Kümmel, entre autres, reprennent le formalisme des fonctions de production agrégées et s'en servent pour montrer empiriquement que l'énergie joue un rôle important dans la croissance. Ils remettent en question l'hypothèse de rémunération des facteurs à leur productivité marginale, tout en restant dans un cadre analytique semblable à celui de la théorie de la croissance néoclassique.

Ces deux points de vue correspondent aussi aux deux extrêmes de la période considérée dans cette thèse et soulignent une transformation de la conception thermodynamique de l'économie. Le point de basculement semble se situer dans le courant des années 1990.

Cette époque est marquée par l'émergence de l'économie écologique, au sein de laquelle les idées de Georgescu-Roegen sont particulièrement influentes. Après son décès en 1994, un numéro spécial lui est consacré, dans lequel le débat intitulé « Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz » remet en lumière ses critiques à l'encontre de la théorie néoclassique des ressources (Daly, 1997a; Solow, 1997; Stiglitz, 1997). Mais la même période voit les débuts du programme de recherche d'Ayres (1994, 1998, 2001) après ses premiers travaux avec Kneese et sa contribution fondatrice à l'écologie industrielle. S'appuyant sur les travaux entrepris dès les années 1980 par Kümmel (1982, 1989), Ayres va ainsi donner un second souffle à la conception thermodynamique de l'économie, mais en modifiant considérablement son orientation.

L'objectif de la thèse est donc de *caractériser* ces transformations de la conception thermodynamique de l'économie en mettant l'accent sur les enjeux méthodologiques. Il s'agit de comprendre comment les nombreux points communs à ces approches aboutissent à des choix analytiques divergents. À l'inverse, la thèse ne vise pas principalement à *expliquer* ces transformations, au sens où elle exhiberait une causalité historique. La manière dont cette thèse caractérise les transformations de la conception thermodynamique de l'économie peut néanmoins mettre en lumière certains des facteurs ayant contribué à cette transformation. Autrement dit, il ne s'agit pas de faire l'histoire de ces approches pour elle-même, mais de réfléchir à la construction du savoir économique dans ce contexte là. Les chapitres de cette thèse ne sont par conséquent pas organisés de manière chronologique, mais plutôt de façon thématique.

Cette perspective est justifiée par le fait que la conception thermodynamique de l'économie a toujours occupé une place relativement marginale en économie. L'intérêt pour ce sujet ne provient donc pas de l'espoir de mieux comprendre les transformations de la discipline. Il est plutôt motivé par l'idée qu'il convient de penser les aspects physiques des activités économiques pour répondre aux enjeux de soutenabilité. Or, la conception thermodynamique de l'économie est certainement l'approche qui a poussé le plus loin cette réflexion sur la dimension physique du processus économique. Cette démarche soulève ainsi des enjeux méthodologiques importants. Étant donné la place importante accordée aux modèles mathématiques en économie, il semble particulièrement intéressant d'interroger la manière dont la conception thermodynamique de l'économie s'incarne dans des représentations formelles de la production. Cette perspective amène à étudier à la fois les divergences entre les approches qui s'inscrivent dans ce cadre, et les confrontations plus ou moins directes qui les opposent à la théorie néoclassique des ressources.

Le recours à une approche historique est nécessaire pour saisir le plus finement possible les enjeux méthodologiques sous-jacents. Cela doit permettre, dans une démarche de reconstruction historique, de restituer le point de vue des auteurs eux-mêmes. Mais ce point de vue est analysé à travers une grille de lecture qui structure les questions que je pose et les interprétations que je formule. Cette grille de lecture s'appuie sur une forme de réalisme critique. Ce point de vue suppose qu'il existe une réalité objective, mais que notre connaissance de cette réalité est nécessairement fragile et plurielle. Cette perspective permet notamment de donner un sens à l'existence d'une réalité physique sous-jacente aux activités économiques, tout en soulignant la diversité des moyens permettant

d'appréhender cette dimension physique. Il s'agit alors d'interroger les principes méthodologiques qui guident les diverses constructions théoriques qui tentent de rendre compte de cette dimension physique. Pour cela, je m'intéresse, d'une part, aux conceptions de la modélisation sous-jacentes, et d'autre part, aux relations entre la thermodynamique et l'économie.

En ce qui concerne la modélisation, l'approche adoptée dans cette thèse est fondée sur la distinction entre deux registres. Premièrement, le registre de la représentation concerne la relation entre un modèle et le système dont il entend rendre compte, par l'intermédiaire de la théorie. Tout en reconnaissant le caractère nécessairement idéalisé d'un modèle, il s'agit d'interroger les liens de ressemblance avec le système visé. Cette démarche passe notamment par l'analyse de la manière dont les auteurs relient certaines propriétés analytiques du modèle à des concepts constitutifs de leur cadre théorique. Deuxièmement, le registre des manipulations souligne que les modèles ne sont pas de simples descriptions figées. Les modèles remplissent au contraire des fonctions épistémiques. Leur fonction peut être purement théorique, lorsqu'il s'agit d'explorer les propriétés formelles de certains concepts et de certaines situations. Mais la fonction d'un modèle peut aussi être de confronter la théorie avec les données, et ainsi servir d'instrument de mesure ou de test empirique. Enfin, les modèles peuvent intervenir dans la conception et l'évaluation de politiques économiques.

Les relations entre la thermodynamique et l'économie sont quant à elles analysées sous l'angle de l'interdisciplinarité. L'économie écologique insiste sur la nécessité d'une intégration conceptuelle forte comme condition préalable à une interdisciplinarité aux niveaux analytiques et empiriques. Cela nécessite un travail d'ajustement entre concepts issus de différentes disciplines. L'économie écologique est également associée à une ontologie hiérarchique, dans laquelle coexistent différentes strates de réalité encastrées les unes dans les autres. Pour autant, cette ontologie n'est pas nécessairement réductionniste, chaque strate étant ontologiquement distincte et irréductible aux strates dans lesquelles elle est encastrée. La philosophie de l'impérialisme scientifique permet alors d'inscrire cette perspective dans un cadre plus large en opposant ce point de vue ontologique à un point de vue dérivationalnel, qui ne se préoccupe pas de la vraisemblance de l'explication qu'il fournit.

Il est alors utile de revenir aux propositions thermo-économiques pour mettre en évidence les questions que la grille de lecture qui précède permet de formuler à l'égard de la conception thermodynamique de l'économie. La première proposition invite à considérer la production de biens et services comme une transformation de flux de matière et d'énergie. Cette proposition contribue ainsi à un déplacement de la définition et des frontières de la discipline économique. Il convient alors d'interroger l'ontologie implicite de cette approche, et en particulier la manière dont elle articule les dimensions physique et économique. L'ontologie hiérarchique et anti-réductionniste proposée par Spash (2012) fournit un cadre de référence auquel on peut confronter la conception thermodynamique de l'économie, tout autant que la théorie néoclassique des ressources. En ce qui concerne les représentations formelles de la production, ce cadre invite en particulier à s'intéresser à la relation entre la valeur et les prix d'un côté, et les aspects physiques du processus

de production de l'autre.

La deuxième proposition thermo-économique insiste sur l'importance des principes de la thermodynamique pour appréhender les flux de matière et d'énergie. Elle a une portée épistémologique, dans la mesure où elle présente la thermodynamique comme une source de connaissance élémentaire et fondamentale en ce qui concerne les phénomènes liés à la matière et l'énergie. Il importe alors d'interroger la nature de cette connaissance et la manière dont elle est utilisée dans le cadre de la conception thermodynamique de l'économie. Cette démarche invite notamment à s'intéresser aux divergences qui peuvent apparaître dans l'interprétation des principes de la thermodynamique, et à l'importance relative accordée à la matière et à l'énergie par les différents auteurs. Mais il s'agit également de voir quelles fonctions épistémiques remplit ce point de vue thermodynamique dans l'analyse du processus économique. S'agit-il simplement d'une grille de lecture conceptuelle ou donne-t-il lieu également à la construction de nouveaux outils permettant d'opérationnaliser la conception thermodynamique de l'économie ?

Enfin, la troisième proposition thermo-économique représente le cœur du sujet de la thèse. Cette proposition suggère que l'économie doit prendre en compte les principes de la thermodynamique, ce qui soulève de nombreuses questions méthodologiques. Certaines questions sont étroitement liées aux deux propositions précédentes, notamment en ce qui concerne la mise en œuvre d'une intégration conceptuelle forte entre les deux disciplines. Mais cette proposition pose aussi des questions nouvelles qui portent sur les relations entre cette approche interdisciplinaire et l'articulation entre théories, modèles et données. Il importe notamment de se demander si l'intégration entre les disciplines au niveau conceptuel se répercute nécessairement aux niveaux analytique et empirique. Inversement, il convient d'examiner la manière dont la méthodologie sous-jacente à chaque représentation analytique de la production influence la prise en compte de sa dimension physique. Cette démarche vise notamment à expliquer la divergence entre les théories flux-fonds et néo-thermodynamique de la production, malgré leur référence commune à la conception thermodynamique de l'économie.

Dans l'ensemble, cette thèse analyse donc la manière dont les enjeux méthodologiques liés à l'interdisciplinarité et à la modélisation interagissent au sein de la conception thermodynamique de l'économie, en particulier dans la construction des représentations formelles de la production qui lui sont associées. La conclusion générale est qu'il existe bien une vision commune de l'économie derrière ces différentes approches, mais que des conceptions différentes de la modélisation les amènent à des cadres analytiques radicalement différents, sous la forme de la théorie flux-fonds et de la théorie néo-thermodynamique de la production. Alors que les questions liées à l'interdisciplinarité ont toujours occupé une place importante en économie écologique, celles liées à la méthodologie de la modélisation ont reçu moins d'attention. C'est ce qui explique que cette divergence fondamentale au sein de la conception thermodynamique de l'économie ait été peu reconnue, voire occultée.

0.4 Plan de la thèse

La thèse comprend cinq chapitres, organisés de manière thématique et non chronologique. Le chapitre 1^{er} est consacré à la conception générale des rapports entre la thermodynamique et l'économie, en particulier telle qu'elle est présentée par Georgescu-Roegen, Daly et Ayres. Les deux chapitres suivants s'intéressent à la manière dont les approches thermodynamiques se positionnent vis-à-vis de la fonction de production agrégée. Pour cela, le chapitre 2 retrace l'évolution d'une controverse opposant Georgescu-Roegen et Daly, d'un côté, à Solow et Stiglitz, de l'autre, des années 1970 aux années 1990. Le chapitre 3 examine quant à lui les travaux empiriques sur l'énergie ayant recours à la fonction de production agrégée, à la fois dans l'approche standard et dans le cadre de la théorie néo-thermodynamique de la production. Les deux derniers chapitres reviennent alors sur la théorie flux-fonds de la production développée par Georgescu-Roegen. Ce retour est motivé par le fait que cette théorie est mentionnée comme une alternative possible dans les débats des années 1990, mais qu'elle semble perdre en influence ensuite au profit de la théorie néo-thermodynamique de la production. Pour comprendre la théorie flux-fonds, il importe tout d'abord de revenir dans le chapitre 4 sur la méthodologie de la modélisation défendue par Georgescu-Roegen et sa critique de l'économie mathématique. Le chapitre 5 s'intéresse alors au développement de la théorie flux-fonds dans les années 1970 et 1980, en la resituant dans le cadre plus large de la conception circulaire de la production, qui inclue notamment les modèles de Leontief et de Sraffa.

Cette organisation peut paraître étonnante, dans la mesure où elle amène à discuter la théorie néo-thermodynamique avant la théorie flux-fonds, alors que chronologiquement, elles se situent plutôt dans l'ordre inverse. Ce choix est justifié par le fait que la fonction de production agrégée est l'outil le plus commun pour représenter la production à un niveau macroéconomique. Il apparaît donc prioritaire de s'interroger sur sa capacité à rendre compte de la dimension physique du processus économique. Les chapitres 2 et 3 permettent ainsi de saisir les difficultés méthodologiques associées à la fonction de production agrégée. L'examen détaillé de la méthodologie de Georgescu-Roegen dans le chapitre 4 permet alors de comprendre en quoi sa conception de la modélisation est radicalement différente. Sans avoir saisi au préalable la nature fondamentalement méthodologique du problème posé par l'intégration de la dimension physique de la production, ce détour pourrait apparaître superflu. Par ailleurs, la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen, étudiée dans le chapitre 5, est issue d'une critique de la fonction de production agrégée. Il est donc préférable d'avoir auparavant approfondi les caractéristiques de la fonction de production agrégée, pour pouvoir discuter sa critique en connaissance de cause. À l'inverse, tant dans la théorie néoclassique des ressources que dans la théorie néo-thermodynamique, il n'est jamais directement question d'une critique de la théorie flux-fonds. Il me semble que cette organisation permet donc d'apprécier au mieux les enjeux méthodologiques liés à la prise en compte de la dimension physique de la production dans ces différents modèles. Je reviens sur chacun de ces chapitres plus en détail ci-dessous.

Le chapitre 1^{er} montre ainsi que la conception thermodynamique de l'économie parta-

gée par Georgescu-Roegen, Daly et Ayres constitue bien une vision du monde commune, et que leurs divergences sont marginales. Cette vision du monde relève d'une ontologie hiérarchique, anti-réductionniste et évolutionnaire. La dimension économique de la réalité est encastrée dans la dimension physique, au sens où le processus économique repose sur la transformation de flux de matière et d'énergie sous-jacents. Mais cet encastrement n'est pas réductionniste, dans la mesure où les comportements des agents, la valeur des biens et services, ou encore les phénomènes monétaires, disposent d'une certaine indépendance par rapport aux aspects physiques. Enfin, l'articulation entre les dimensions physique et économique évolue au cours du temps du fait des transformations qualitatives qui affectent à la fois les finalités poursuivies par les agents et les moyens techniques disponibles pour cela. Sur le plan épistémologique, la thermodynamique remplit plusieurs fonctions. Elle fournit d'abord une grille de lecture conceptuelle permettant d'appréhender la dimension physique du processus économique. Cette grille de lecture peut être résumée par l'idée que le processus économique entraîne une dégradation qualitative de l'énergie et de la matière. La thermodynamique permet également de mesurer les ressources naturelles et les performances du processus économique selon une échelle qui prenne en compte cette dimension qualitative. Ce second niveau épistémologique est notamment rendu possible par le concept d'exergie. Pour finir, au niveau méthodologique, la conception thermodynamique de l'économie poursuit l'ambition d'une intégration conceptuelle forte entre la thermodynamique et l'économie. Cette démarche implique la recherche d'une certaine congruence entre les concepts respectifs et vise ainsi une articulation équilibrée entre les disciplines.

Le chapitre 2 s'intéresse à la controverse entre la conception thermodynamique de l'économie et la théorie néoclassique des ressources. Cette controverse s'étale principalement sur deux périodes : les années 1970, durant lesquelles la théorie néoclassique des ressources émerge (Solow, 1974b; Stiglitz, 1974b) et Georgescu-Roegen (1975, 1979a) formule des critiques à son encontre ; et la fin des années 1990, où Daly (1997a) ravive ces critiques et suscite des réactions de la part de Solow (1997) et Stiglitz (1997). Le point central de la controverse concerne l'hypothèse de « productivité illimitée des ressources » introduite dans les fonctions de production des modèles néoclassiques. À cette hypothèse, la conception thermodynamique de l'économie oppose l'existence d'une « limite thermodynamique ». Cette opposition théorique traduit des divergences méthodologiques plus profondes. La théorie néoclassique des ressources met l'accent sur les manipulations des modèles, aux dépens du registre de la représentation. En particulier, il est difficile d'identifier une interprétation claire des notions de « substitution » et de « progrès technique », qui jouent pourtant un rôle central. La conception thermodynamique de l'économie, quant à elle, considère les principes de la thermodynamique comme une condition minimale de réalisme, qui devrait être satisfaite par les modèles néoclassiques. Mais l'interprétation de l'idée de limite thermodynamique se révèle également problématique, et révèle un déficit d'articulation conceptuelle entre les dimensions physique et économique de la production. En définitive, aucun des deux camps n'est réellement en mesure de démontrer la validité de son hypothèse, car la fonction de production agrégée apparaît inappropriée pour appréhender théoriquement la dimension physique de la

production.

Pour approfondir les enjeux méthodologiques liés à la fonction de production agrégée, le chapitre 3 s'intéresse aux travaux empiriques sur l'énergie, dans lesquels s'insère la théorie néo-thermodynamique. Dans le cadre néoclassique standard, de nombreux travaux sur l'énergie se développent dans les années 1970. Ils cherchent notamment à estimer la substituabilité entre le capital et l'énergie (Berndt et Wood, 1975; Griffin et Gregory, 1976). Dans ce cadre, les estimations de fonction de production sont réalisées de manière indirecte, à l'aide de fonctions de coût duales. Des résultats divergents engendrent une controverse durable autour de ces estimations. Or, l'une des explications apportées pour expliquer ces divergences met en cause la méthode d'estimation via les fonctions de coût (Frondel et Schmidt, 2002). Cette explication suggère que les résultats des estimations sont le produit d'un artifice théorique lié à l'hypothèse de dualité. Sans qu'ils ne se soient réellement intéressés à cette controverse, Ayres et Kümmel adoptent une stratégie empirique différente dans le cadre de la théorie néo-thermodynamique. Sur le plan analytique, ils reprennent la fonction de production agrégée, et ils cherchent à en fournir une interprétation physique. Leur principale critique envers la théorie néoclassique consiste à remettre en question l'hypothèse de rémunération des facteurs à leur productivité marginale. Cette critique amène Ayres et Kümmel à utiliser des méthodes d'estimation directe pour leur fonction de production. Cependant, ces méthodes rencontrent des obstacles statistiques qui laissent penser que les résultats obtenus relèvent davantage d'un artifice numérique. Dans l'ensemble, les chapitres 2 et 3 montrent donc que la fonction de production agrégée rencontre des difficultés méthodologiques considérables pour rendre compte de la dimension physique de la production, tant sur le plan théorique qu'empirique.

Ces difficultés invitent à s'intéresser à la théorie flux-fonds, qui est envisagée comme une alternative à la fonction de production agrégée dans la controverse de la fin des années 1990. Cependant, étant donné la nature méthodologique des problèmes rencontrés par la fonction de production agrégée, il importe de revenir au préalable sur la méthodologie de Georgescu-Roegen. Dans cette perspective, le chapitre 4 retrace tout d'abord la trajectoire de Georgescu-Roegen au sein de l'économie mathématique et souligne le peu de réactions suscitées par sa critique méthodologique. Les quelques commentaires sur le sujet, de la part de Samuelson notamment, laissent penser que les économistes mathématiciens n'ont pas compris la critique de Georgescu-Roegen et ses implications pratiques. Un examen attentif montre pourtant que le point de vue général de Georgescu-Roegen est relativement standard. Il consiste à considérer les modèles comme des outils pour clarifier un raisonnement et en valider la cohérence logique. De ce point de vue, la critique de Georgescu-Roegen envers la théorie économique standard est double. Premièrement, il considère que les méthodes économétriques ne fournissent pas un moyen satisfaisant de tester empiriquement les théories économiques. Deuxièmement, il considère qu'il est nécessaire de prêter une attention particulière aux fondements conceptuels des modèles théoriques, seul moyen à même de les relier au monde réel. À cette fin, Georgescu-Roegen fournit un ensemble de principes méthodologiques pour construire des modèles simples, mais néanmoins utiles sur le plan conceptuel. Dit autrement, dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, le registre des manipulations se réduit à une fonction d'exploration

conceptuelle, et l'accent est mis sur le registre de la représentation.

Ce recul méthodologique s'avère utile pour comprendre la construction de la théorie flux-fonds, qui en constitue la principale mise en œuvre pratique. Le chapitre 5 explore le développement de la théorie flux-fonds, d'une première phase centrée sur les questions méthodologiques et conceptuelles, à une deuxième phase où des liens plus étroits avec la conception thermodynamique de l'économie se dessinent. Au sein de la théorie flux-fonds, Georgescu-Roegen propose en particulier un modèle strictement désagrégé représentant plusieurs processus en interaction, dans lequel il introduit les flux de matière et d'énergie. D'un point de vue conceptuel, ce modèle s'avère tout à fait à même de rendre compte de la dimension physique de la production, du fait des fondements méthodologiques sur lesquels il repose. Plus généralement, ce modèle reflète clairement les différentes caractéristiques de la conception thermodynamique de l'économie. Cependant, Georgescu-Roegen utilise le modèle flux-fonds essentiellement comme un outil descriptif. Il ne propose pas d'application réellement développée de son modèle, y compris sur un plan strictement théorique. Cette situation traduit la priorité accordée par Georgescu-Roegen au registre de la représentation, et son intérêt moindre pour le registre des manipulations. Ce manque d'application peut également expliquer le peu d'influence du modèle flux-fonds par la suite, notamment en économie écologique.

Chapitre 1

La conception thermodynamique de l'économie

The law that entropy always increases—the second law of thermodynamics—holds, I think, the supreme position among the laws of Nature. If someone points out to you that your pet theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equations—then so much the worse for Maxwell's equations. If it is found to be contradicted by observation—well, these experimentalists do bungle things sometimes. But if your theory is found to be against the second law of thermodynamics I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.

—Sir Arthur S. Eddington (1928)

CE premier chapitre s'intéresse à la vision générale qui sous-tend la « conception thermodynamique de l'économie ». Il se concentre sur les aspects conceptuels et laisse volontairement de côté les enjeux analytiques liés aux modèles, qui feront l'objet d'un examen approfondi dans les chapitres suivants. Pour cela, je m'appuie principalement sur les travaux de trois auteurs : Nicholas Georgescu-Roegen, Herman Daly, et Robert Ayres. Ce choix se justifie par le fait que tous les trois ont abondamment contribué à l'édification de cette approche et qu'ils occupent des rôles importants dans les chapitres suivants. Il convient néanmoins de souligner dès maintenant que ces auteurs ne forment pas à proprement parler une « communauté » scientifique. Si Georgescu-Roegen et Daly entretiennent des liens étroits, Ayres n'a pas de relation forte avec l'un ou l'autre. Malgré cela, ce premier chapitre fournit l'occasion de revenir sur les aspects communs à ces différents auteurs, ainsi que sur certaines divergences. La conclusion à laquelle j'aboutis est que leurs divergences sont marginales, et que dans l'ensemble ces trois auteurs partagent une vision du monde commune. C'est la raison pour laquelle il est justifié de parler au singulier de la « conception thermodynamique de l'économie ».

Dans ce cadre, les trois auteurs ont joué des rôles différents. Georgescu-Roegen est incontestablement le premier à avoir véritablement posé les fondements de la conception thermodynamique de l'économie. Il entame ce travail dans l'introduction à *Analytical Economics* (1966a), et le développe pleinement dans *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Le titre même de cet ouvrage suggère une relation étroite entre le processus économique et le second principe de la thermodynamique, également appelé loi de l'entropie. Il ouvre ainsi la voie à une nouvelle vision de l'économie et de ses rapports avec l'environnement, faisant écho à la montée des préoccupations sur les ressources naturelles et les pollutions. Georgescu-Roegen (1975, 1977a, 1979c, 1982) lui-même contribue abondamment au développement de cette vision dans les années qui suivent. Elle devient ensuite l'un des piliers du courant de l'économie écologique, qui s'institutionnalise à la fin des années 1980 (Ropke, 2004).

Daly est certainement l'auteur qui a le plus contribué à diffuser l'approche thermodynamique de Georgescu-Roegen au sein de l'économie écologique²⁵. C'est durant ses

25. L'influence de Georgescu-Roegen sur Daly, et sur l'économie écologique, est notamment bien illustrée par l'hommage publié dans *Ecological Economics* après son décès (Daly, 1995).

études à l'université de Vanderbilt que Daly rencontre Georgescu-Roegen, avec qui il gardera longtemps des contacts étroits. Il adopte dès la fin des années 1960 une conception similaire de l'économie en s'appuyant sur l'ébauche présentée dans *Analytical Economics* (Daly, 1968). Par la suite, il en développe en particulier la portée critique à l'égard de la théorie économique « standard »²⁶. Daly (1974, 1979, 1985) est notamment très critique envers ce qu'il nomme la « manie de la croissance », érigée en objectif suprême de la politique économique. Il considère que la croissance est à la fois incompatible avec les contraintes physiques qui s'exercent sur l'économie et incapable d'accroître réellement le bien-être au-delà d'un certain niveau de revenu. C'est dans cette perspective qu'il va contribuer à la fondation de l'économie écologique à la fin des années 1980²⁷. Dans ce contexte, il fournit notamment les bases d'une interprétation contraignante de la notion de « développement soutenable » (1990), alors que celle-ci devient populaire dans les milieux politiques et académiques suite au rapport Brundtland (1987). Dans l'ensemble, Daly a donc principalement développé les conséquences de la conception thermodynamique de l'économie en matière de politiques économiques.

Ayres, quant à lui, est physicien de formation, mais il s'intéresse rapidement à la théorie économique. Ainsi, Ayres et Kneese (1969) élaborent une première analyse empirique des flux de matière qui traversent l'économie des États-Unis²⁸. Ils soulignent ainsi le fait que les externalités ne sont pas un phénomène contingent, mais plutôt une conséquence inévitable des flux physiques. Si cette démarche repose sur le principe de conservation de la masse, les auteurs ne se revendiquent pas d'emblée d'une conception thermodynamique de l'économie. C'est dans les années 1980 qu'Ayres va inscrire plus explicitement son travail dans ce cadre (Ayres et Nair, 1984). Il constitue notamment l'arrière-plan de la notion de « métabolisme industriel » qu'il propose pour penser l'utilisation optimale des flux de matière et d'énergie dans une économie industrialisée (Ayres, 1989)²⁹. À partir de là, il va contribuer à la réflexion sur de nombreux aspects : les limites à la croissance (Ayres, 1993, 1995, 1996) ; la dissipation de la matière et le recyclage (Ayres, 1997b, 1999) ; ou encore le rôle de l'énergie dans l'économie (Ayres, 1998; Ayres *et al.*, 2003). Dans ces travaux, Ayres reconnaît clairement qu'il revient à Georgescu-Roegen d'avoir insisté le premier sur la dimension physique du processus économique, même s'il

26. De manière générale, la théorie standard désigne ici la « théorie néoclassique » et ses principales composantes : théorie du consommateur, théorie de la production, théorie de l'équilibre général, et théorie de la croissance. Cependant, dans ce chapitre, il sera surtout question de la vision globale de l'économie qui sous-tend cette théorie, représentée par des schémas circulaires entre producteurs et consommateurs, ainsi que de la croissance comme objectif principal de la politique économique.

27. La Société internationale pour l'économie écologique est créée en 1988 sous l'impulsion de Daly, AnnMari Jansson, Robert Costanza et Joan Martinez-Alier (Ropke, 2004). Le premier numéro de la revue *Ecological Economics* paraît en 1989.

28. Kneese a été un acteur très important dans l'institutionnalisation de l'économie de l'environnement, du fait de sa position au sein de Resources for the Future. Il a notamment contribué à la création du *Journal of Environmental Economics and Management* en 1974, et il a été le second président de l'Association of Environmental and Resource Economics en 1979 (Spash, 1999).

29. Cet article est reconnu comme une contribution fondatrice de l'« écologie industrielle », qui deviendra par la suite un nouveau champ à part entière. S'il mobilise de nombreuses disciplines, ce champ se situe davantage dans le domaine de l'ingénierie. Il entretient cependant des liens étroits avec l'économie écologique.

se trouve en désaccord sur certains aspects. Par ailleurs, il n'a jamais eu de contacts personnels étroits avec Georgescu-Roegen³⁰. Ses échanges avec Daly ont été plus importants, notamment à la fin des années 1990, lorsque les discussions sur l'héritage de Georgescu-Roegen étaient au centre de l'attention en économie écologique³¹.

Ces trois auteurs ne forment donc pas à proprement parler une communauté scientifique, forgée par des liens interpersonnels étroits ou des collaborations théoriques de long terme. Néanmoins, il me semble que leurs perspectives sont suffisamment proches pour que l'on puisse confronter leurs contributions respectives. En examinant conjointement leurs travaux, il est possible d'avoir une image assez complète de la conception thermodynamique de l'économie. Mais il est également important de prêter attention à leurs divergences. Celles-ci sont illustrées par la critique de Georgescu-Roegen (1977a) à l'égard de la notion d'état stationnaire défendue par Daly. À l'inverse, Ayres (1999) remet en question le quatrième principe de la thermodynamique proposé par Georgescu-Roegen, censé traduire l'impossibilité d'un recyclage intégral de la matière. Il s'agit donc de savoir si ces divergences représentent des désaccords profonds au sein de la conception thermodynamique de l'économie, ou si elles sont au contraire superficielles en comparaison du socle commun partagé par ces auteurs.

Ce chapitre s'inscrit dans la littérature existante sur l'histoire de l'économie écologique, dont les principales contributions ont d'ores et déjà été présentées dans l'introduction générale (cf. sous-section 0.2.1). Il est à noter que les contributions de Daly et d'Ayres n'ont pas pour le moment bénéficié d'une réelle attention rétrospective, à la différence de la littérature abondante qui s'intéresse aux travaux de Georgescu-Roegen. Dans l'ensemble, si les travaux historiques disponibles sont utiles pour saisir la place de la conception thermodynamique de l'économie au sein de l'économie écologique, ils n'en fournissent pas une caractérisation très claire. Par ailleurs, en se concentrant sur les travaux de Georgescu-Roegen, ils ne permettent pas d'évaluer à quel point cette approche est unifiée, ou si elle souffre au contraire de fractures importantes.

Ce chapitre aborde cette question en examinant de manière plus précise les éléments partagés par Georgescu-Roegen, Daly et Ayres, ainsi que leurs divergences. Comme indiqué plus haut, je conclus que les éléments de divergence entre ces auteurs sont marginaux, et que la conception thermodynamique de l'économie dispose d'une certaine cohésion interne. Pour la caractériser plus précisément, je m'appuie sur la littérature relative à l'interdisciplinarité présentée dans l'introduction générale. Je montre ainsi que la conception thermodynamique de l'économie repose tout d'abord sur une ontologie hiérarchique, anti-réductionniste et évolutionnaire. Sur le plan épistémologique, la thermodynamique est mobilisée comme une grille de lecture conceptuelle, et, à un second niveau, comme un outil de quantification. Enfin, au niveau méthodologique, la conception thermodynamique de l'économie poursuit l'ambition d'une intégration conceptuelle forte entre la thermodynamique et l'économie. Elle s'oppose en cela à une relation purement analogique et formelle entre ces disciplines.

30. Ayres a uniquement croisé Georgescu-Roegen lors d'une conférence dans les années 1960, sans qu'ils ne se soient réellement parlé. Ayres, communication personnelle.

31. Daly, communication personnelle.

Afin de développer ces différents aspects, la section 1.1 présente les fondements de la conception thermodynamique de l'économie, ainsi que sa critique de la théorie économique standard. Sur cette base, la section 1.2 examine plus en détails le traitement des ressources énergétiques, de la dissipation de la matière et des limites à la croissance, dans le cadre de la conception thermodynamique de l'économie.

1.1 Fondements de la conception thermodynamique de l'économie

Les fondements de la conception thermodynamique de l'économie ont été principalement développés par Georgescu-Roegen, en particulier dans *The Entropy Law and the Economic Process* Georgescu-Roegen (1971). Cette section se concentre donc sur son approche. Elle tâche d'en saisir les traits essentiels à partir des outils conceptuels fournis par la littérature sur l'interdisciplinarité. Cette perspective montre que Georgescu-Roegen cherche à replacer les activités économiques dans leur environnement physique, sans pour autant les y réduire. Dans ce cadre, il envisage la thermodynamique principalement comme une grille de lecture conceptuelle permettant d'appréhender la dimension physique du processus économique. Les rapports entre l'économie et la thermodynamique ne sont donc pas abordés sous l'angle de possibles analogies formelles. Au contraire, ce type de relations interdisciplinaires dépourvues de fondements ontologiques se trouve au cœur de la critique qu'il adresse à la théorie économique standard. Dans ce cas, ce sont les rapports entre l'économie et la mécanique qui sont en cause. Néanmoins, cette critique reste à un niveau très général, et il s'avère difficile d'en saisir la portée pratique.

1.1.1 De la thermodynamique à l'économie

Avant de présenter la conception thermodynamique de l'économie en tant que telle, il est important de rappeler la signification des deux principes de la thermodynamique auxquels elle fait appel. L'annexe A donne des précisions sur ces principes, qui sont résumés ici de manière très brève. Le premier principe de la thermodynamique porte sur la conservation de l'énergie. L'énergie peut prendre différentes *formes* : thermique, mécanique, électromagnétique, électrique, chimique, etc. Mais pour toute transformation d'une forme d'énergie en une autre, la *quantité* d'énergie est conservée. Pour reformuler ce principe, la thermodynamique distingue trois types de systèmes physiques. Un système est dit *isolé* s'il n'échange ni matière ni énergie avec son environnement. S'il échange uniquement de l'énergie, il s'agit d'un système *clos*. Pour finir, s'il échange de l'énergie et de la matière, le système est dit *ouvert*. Le premier principe de la thermodynamique peut alors être reformulé de la manière suivante : l'énergie totale d'un système isolé se conserve, quelles que soient les transformations physiques qu'il subit.

Le deuxième principe de la thermodynamique montre cependant que toutes les transformations qui conservent la quantité d'énergie ne sont pas possibles. En particulier, l'étude du fonctionnement des machines thermiques montre qu'elles ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie thermique en énergie mécanique. À l'inverse, la trans-

formation de l'énergie mécanique en énergie thermique peut être totale. Il y a donc une forme de hiérarchie entre ces deux formes d'énergie, et l'on considère que l'énergie mécanique est de qualité supérieure. La qualité de l'énergie thermique dépend quant à elle de la température du corps qui l'émet, de sorte qu'il existe en fait un gradient de qualité de l'énergie. Seules les transformations allant dans le sens d'une *dégradation* de la qualité de l'énergie peuvent avoir lieu, qu'il s'agisse de processus naturels ou de transformations suscitées par l'action humaine. L'idée d'une nécessaire dégradation qualitative de l'énergie est l'une des formulations possibles du second principe de la thermodynamique.

Pour en rendre compte analytiquement, la thermodynamique construit une nouvelle variable physique appelée *entropie*. Une définition plus précise de cette variable est donnée dans l'annexe A. Ici, il suffit de mentionner que les variations de l'entropie suivent la dégradation de l'énergie. Ainsi, si la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid, l'entropie du système constitué des deux corps augmente. De manière plus générale, le second principe de la thermodynamique est reformulé et généralisé sous la forme suivante : l'entropie d'un système isolé augmente jusqu'à un maximum. Pour cette raison, il est aussi connu sous le nom de loi de l'entropie. L'état final vers lequel tend le système est appelé *équilibre thermodynamique*.

Pris conjointement, les deux principes de la thermodynamique fournissent une clef de lecture de nombreux processus naturels et industriels. Au-delà de considérations *pratiques* portant sur des phénomènes circonscrits, ils ont aussi rapidement acquis une signification *cosmologique*, c'est-à-dire relative à l'évolution de l'Univers dans son ensemble. L'Univers constituant l'exemple typique d'un système isolé, son énergie est constante et son entropie tend vers un maximum. Il est donc important d'avoir conscience de cette double signification, pratique et cosmologique, associée aux principes de la thermodynamique³².

La place de la matière dans la thermodynamique est plus ambiguë que celle de l'énergie. D'une part, la matière est soumise à un principe de conservation de la masse. Ce principe constitue un analogue au premier principe de la thermodynamique, et il est même parfois considéré comme en faisant partie. D'autre part, l'idée que la matière puisse être soumise à une dégradation qualitative similaire à celle de l'énergie est davantage problématique. Nous verrons dans la sous-section 1.2.2 que cette difficulté à concevoir la dissipation de la matière a suscité un débat au sein de la conception thermodynamique de l'économie. Pour le moment, il convient simplement de souligner que l'insertion de la dissipation de la matière dans le cadre de la thermodynamique est sujette à caution.

Sur la base de cette présentation élémentaire de la thermodynamique, il est maintenant possible d'en venir à la conception thermodynamique de l'économie. Bien qu'il y ait eu des antécédents à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e, Georgescu-Roegen est l'auteur qui a le plus contribué à introduire les principes de la thermodynamique en économie, notamment dans son ouvrage *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). De son propre aveu, Georgescu-Roegen (401) est un « non initié » en matière de thermodynamique, dans la mesure où sa formation et sa carrière universitaire le caractérisent plutôt

32. Cette double signification est présente dans de nombreux domaines de la physique. Par exemple, les lois de la mécanique s'appliquent tout autant aux mouvements des planètes qu'à une balle lancée en l'air.

comme un mathématicien et un économiste. Par la suite, il mentionne deux raisons pouvant expliquer son intérêt initial pour la thermodynamique : « la monographie d'Émile Borel sur la mécanique statistique (alias thermodynamique), que j'ai lu dans les années 1920 alors que j'étais étudiant en statistique, et les problèmes d'une économie agraire surpeuplée, dont j'ai pris pleinement conscience au cours de mon exil roumain » (1992, 146). Il complète cet intérêt initial par la lecture de nombreux ouvrages de références sur la thermodynamique, tels que ceux de Sadi Carnot, Rudolf Clausius et James Clerk Maxwell.

Pour Georgescu-Roegen, les principes de la thermodynamique permettent de rendre compte de la dimension physique du processus économique :

Even if only the physical facet of the economic process is taken into consideration, this process is not circular, but *unidirectional*. As far as this facet alone is concerned, the economic process consists of a continuous transformation of low entropy into high entropy, that is, into *irrevocable waste* or, with a topical term, into pollution. [...]

The conclusion is that, from the purely physical viewpoint, the economic process is entropic: it neither creates nor consumes matter or energy, but only transforms low into high entropy. (Georgescu-Roegen, 1971, 281, italique dans l'original)

Cette perspective attire donc l'attention sur les flux de matière et d'énergie qui traversent du processus économique. Elle amène à le considérer comme un système thermodynamique ouvert. Par là même, elle caractérise de manière thermodynamique les notions de ressources naturelles et de déchets. D'un côté, ressources naturelles et déchets se trouvent dans une égalité quantitative du fait des principes de conservation de la matière et de l'énergie, c'est-à-dire du premier principe de la thermodynamique. De l'autre, les déchets sont une forme qualitativement dégradée de la matière et de l'énergie qui constituent les ressources naturelles initiales. En ce sens, les ressources naturelles ne disparaissent pas réellement, mais elles ne sont plus sous une forme *utilisable*. C'est la raison pour laquelle Georgescu-Roegen (1971, 278) insiste sur le fait que « nous ne pouvons utiliser une quantité donnée de basse entropie qu'une seule fois ».

Outre cette référence à la thermodynamique, Georgescu-Roegen inscrit également sa réflexion dans le prolongement de la biologie. Selon lui, la thermodynamique a amené à concevoir un organisme vivant comme « un processus stable qui maintient sa structure hautement ordonnée en aspirant de la basse entropie de l'environnement afin de compenser la dégradation entropique à laquelle il est soumis en permanence » (1971, 191-192). Ainsi, un organisme vivant est lui aussi un système thermodynamique ouvert, et sa survie dépend des flux de matière et d'énergie qui le traversent³³. Par la suite, Georgescu-Roegen (1978a) reformule cette idée en s'appuyant sur la notion de « structure dissipative » introduite par Ilya Prigogine (1967). Selon cette approche, les flux de matière et d'énergie qui traversent le système permettent de le maintenir éloigné de l'équilibre thermodynamique tout en stabilisant son entropie. Dans cette situation, des

33. Sur ce point, Georgescu-Roegen s'appuie notamment sur l'ouvrage du physicien Erwin Schrödinger intitulé *What is life?* (1944).

formes matérielles structurées peuvent apparaître et perdurer, expliquant ainsi l'origine du vivant.

Pour Georgescu-Roegen, cette même conception s'applique au processus économique. Plus précisément, « le processus économique est une continuation du processus biologique » (1971, 307), au sens où il a également pour finalité la lutte contre une forme de dégradation entropique. Il note cependant une différence significative avec la plupart des autres êtres vivants, à savoir que cette lutte ne concerne pas seulement l'intégrité physique des individus qui composent la société, mais également celle d'un grand nombre d'artefacts. À la suite du biologiste Alfred Lotka, Georgescu-Roegen parle d'« instruments endosomatiques » pour désigner les organes produits par les êtres vivants et inséparables d'eux. Au contraire, il nomme « instruments exosomatiques » les outils qui leur sont extérieurs, c'est-à-dire l'ensemble des biens d'équipement qui sont produits et utilisés dans le processus économique (machines, infrastructures, etc.). De ce point de vue, la particularité de l'espèce humaine est non seulement de produire des outils, mais également de faire produire des outils par les outils eux-mêmes. Tout comme la survie d'un organisme vivant dépend de sa capacité à entretenir ses instruments endosomatiques, la survie d'une société dépend de sa capacité à entretenir ses instruments exosomatiques. Dans les deux cas, la production et l'entretien des instruments nécessitent de prélever de la matière et de l'énergie de basse entropie dans l'environnement. Ainsi, la relation étroite que Georgescu-Roegen établit entre les processus biologique et économique l'amène par la suite à parler de « bioéconomie » pour décrire sa conception de l'économie (1975, 369).

Les linéaments de l'approche de Georgescu-Roegen ayant été présentés, les fondements ontologiques, épistémologiques et méthodologiques peuvent en être examinés plus en détail. Il apparaît tout d'abord que la conception thermodynamique de l'économie est fondée sur une ontologie « hiérarchique », au sens de Spash (2012, 43) (cf. introduction générale). C'est-à-dire qu'elle présente la réalité comme un ensemble de dimensions *encastées* les unes dans les autres³⁴. En l'occurrence, la dimension économique est encadrée dans la dimension biologique, et toutes deux sont encadrées dans la dimension physique. La relation d'encastrement implique qu'une dimension doit nécessairement respecter les principes qui gouvernent les autres dimensions dans lesquelles elle est encadrée. Ainsi, les processus économiques et les organismes vivants ne peuvent pas enfreindre les lois de la physique, et en particulier les lois de la thermodynamique. Pour lutter contre la dégradation entropique de leurs propres structures, ils doivent donc s'appuyer sur des flux d'énergie et de matière issus de leur environnement.

Sur le plan épistémologique, les deux principes de la thermodynamique mobilisés dans cette approche fournissent d'abord une grille de lecture conceptuelle. Ils permettent de décrire de manière globale ce que le processus économique fait à la matière et à l'énergie : il en préserve la quantité, mais il les dégrade qualitativement. Cette propriété est présentée comme étant particulièrement fondamentale, dans la mesure où elle est la source de la rareté et de l'épuisement des ressources naturelles. Par ailleurs, cette approche

34. Comme indiqué dans l'introduction générale, le terme « hiérarchique » n'implique pas l'idée d'un « ordre » à proprement parler. Il ne s'agit pas de dire qu'une dimension est plus importante qu'une autre, mais plutôt que leurs propriétés se transmettent par la relation d'encastrement.

confère à la thermodynamique une légitimité scientifique importante, qui impose aux autres disciplines de se conformer à ses principes. Cette perspective est bien illustrée par la référence de Georgescu-Roegen au physicien et philosophe des sciences Sir Arthur Eddington, qui considère que la loi de l'entropie occupe « la position suprême parmi les lois de la nature », et que, si une théorie s'avère incompatible avec cette loi, « il n'y a d'autre issue pour elle que de s'effondrer dans l'humiliation la plus totale » (Eddington, cité dans Georgescu-Roegen [1982] 2011, 197)³⁵. Si l'affirmation d'Eddington concerne d'abord les autres sciences naturelles, son utilisation par Georgescu-Roegen vise à en étendre la portée à l'économie. Il en va donc là d'une forme d'« impérialisme scientifique » au sens de Mäki (2009a, 2013), c'est-à-dire d'une expansion du domaine d'une discipline qui l'amène dans un champ déjà occupé par une autre. Plus précisément, il s'agit d'une expansion « ontologique », qui se fonde sur l'idée d'une réalité commune aux disciplines, et non d'une expansion « dérivationnelle », dont la portée serait purement analogique.

Par conséquent, au niveau méthodologique, la conception thermodynamique de l'économie promeut une intégration conceptuelle forte entre les disciplines mobilisées. De l'idée d'une réalité commune à ces différentes disciplines découle la nécessité d'une certaine congruence entre leurs concepts respectifs. Si l'on se réfère à la taxonomie des échanges disciplinaires établie par Klein (2010), il s'agit donc d'une « interdisciplinarité théorique ». Celle-ci implique une interaction forte entre les disciplines afin de rendre compatibles leurs fondements conceptuels. À l'inverse, cette perspective ne cherche pas à établir des analogies purement formelles entre les disciplines³⁶. Les contributions récentes à la philosophie de l'économie écologique, telles que celles de Baumgärtner *et al.* (2008) et de Spash (2012), confirment que cette forme d'interdisciplinarité est influente dans ce champ. La contribution de Georgescu-Roegen a joué un rôle important à cet égard.

Ces éléments fournissent une première caractérisation de la conception thermodynamique de l'économie. Cependant, celle-ci pourrait laisser penser que l'économie y est réduite à sa dimension physique. Il est donc important de souligner que la perspective développée par Georgescu-Roegen s'oppose au contraire à un *réductionnisme* physique³⁷. Cet aspect se manifeste d'abord par la relation entre les comportements économiques et l'*indétermination* qui caractérise la loi de l'entropie. Selon Georgescu-Roegen (1971, 12), le second principe « ne détermine ni quand [...] l'entropie d'un système isolé atteindra un certain niveau ni exactement ce qu'il se passera ». En effet, la loi de l'entropie détermine seulement la direction générale des processus, mais pas l'état du système à chaque instant, contrairement aux lois de la mécanique³⁸. Pour Georgescu-Roegen (1971, 194), cet

35. Voir la citation complète en épigraphe de ce chapitre.

36. Comme le montre la sous-section 1.1.2, ce point est crucial pour comprendre la critique adressée par la conception thermodynamique de l'économie à la théorie économique standard.

37. On verra dans la sous-section 1.1.2 que les tenants de la conception thermodynamique reprochent à la théorie standard d'avoir ignoré la dimension physique du processus économique. Il est donc important de souligner qu'eux-mêmes ne tombent pas dans l'écueil inverse qui consisterait à ne considérer que cette dimension.

38. Cette caractéristique se retrouve dans la thermodynamique des structures dissipatives. Pour Prigogine (1972), l'apparition des structures dissipatives est le produit de phénomènes aléatoires au niveau microscopique dont l'effet va être amplifié jusqu'à former une structure macroscopique stable. Il en conclut qu'en la matière, « le hasard et la nécessité coopèrent » (562).

aspect de la loi de l'entropie garantit une forme de liberté, et « c'est par vertu de cette liberté qu'un organisme vivant peut poursuivre le but de sa vie ». Il s'agit d'une différence ontologique fondamentale avec la mécanique, dont le déterminisme semble incompatible avec la diversité du vivant. Au niveau économique, cette perspective souligne que les préférences individuelles et les schémas culturels sont irréductibles à leurs dimensions physiques et biologiques. Ils ont une forme d'autonomie qui demande à être étudiée pour elle-même.

L'autre élément allant à l'encontre d'un réductionnisme physique dans l'approche de Georgescu-Roegen concerne la question de la valeur. Sur ce point, il affirme qu'une « faible entropie [...] est une condition nécessaire pour qu'une chose ait une valeur », mais il ajoute que « cette condition [...] n'est pas pour autant suffisante » (1971, 282). Il illustre cet aspect avec « le cas des champignons vénéneux qui, bien qu'ils contiennent une faible entropie, n'ont aucune valeur économique ». Ainsi, d'un côté, il souligne que le processus économique implique nécessairement un apport d'éléments de haute qualité thermodynamique. De l'autre, il met en garde contre la réduction de toute valeur à cette dimension physique et invite à prendre en compte sa dimension proprement économique. La citation suivante est tout à fait explicite à cet égard :

The economic process, to be sure, is entropic in each of its fibers, but the paths along which it is woven are traced by the category of utility to man. It would therefore be utterly wrong to equate the economic process with a vast thermodynamic system and, as a result, to claim that it can be described by an equally vast number of equations patterned after those of thermodynamics which allow no discrimination between the economic value of an edible mushroom and that of a poisonous one. (Georgescu-Roegen, 1971, 282-283)

La notion de valeur est ici synonyme d'« utilité pour l'homme ». Dans les catégories traditionnelles de la pensée économique, cette conception de la valeur renvoie à la « valeur d'usage », que l'on distingue de la « valeur d'échange ». Alors que la première désigne l'utilité tirée de l'usage concret d'un bien, la seconde concerne sa valeur marchande. La valeur d'usage est une condition nécessaire de la valeur d'échange. Mais elle n'est pas suffisante, dans la mesure où certaines conditions techniques et institutionnelles peuvent empêcher la marchandisation d'un bien donné. Georgescu-Roegen ajoute une dimension physique à cette conception, en soulignant que la basse entropie est une condition nécessaire de la valeur d'usage. Pour autant, il reconnaît que la valeur d'usage comporte également une composante irréductible à des propriétés physiques. Elle dépend également des caractéristiques biologiques et culturelles de l'agent qui en dispose³⁹.

L'analyse de la valeur développée par Georgescu-Roegen conjugue ainsi les déterminants naturels et sociaux de l'utilité. Dans la continuité, il souligne que la focalisation sur la dimension physique du processus économique ne permet pas d'en percevoir la finalité.

39. Gowdy et Mesner (1998) soulignent que la préoccupation pour la valeur constitue un fil conducteur dans la carrière de Georgescu-Roegen. On la retrouve dans sa contribution à la théorie du consommateur, dans sa conception thermodynamique de l'économie, ou encore dans ses travaux sur les économies agraires.

Au contraire, « le véritable “produit” du processus économique n’est pas le flux de déchet qui en ressort, mais *la joie de vivre* » (1971, 282). La notion de « joie de vivre » peut apparaître trop imprécise pour un économiste. Mais pour en comprendre la signification, il faut la mettre en lien avec les contributions de Georgescu-Roegen à la théorie du consommateur et les limites qu’il perçoit dans la notion d’utilité. Il note ainsi que « le spectre dialectique des désirs humains [...] a depuis longtemps été couvert par le concept numérique et terne d’“utilité” » (1971, 52). La « joie de vivre » est en quelque sorte un moyen pour lui de souligner le caractère immatériel et insaisissable de l’épanouissement humain. En ce sens, sa conception des finalités du processus économique est moins réductionniste que celle de la théorie néoclassique.

Dans l’ensemble, les éléments qui précèdent invitent donc à considérer que l’approche de Georgescu-Roegen relève d’une ontologie « hiérarchique » et « anti-réductionniste » au sens de Spash (2012). La dimension économique est ancrée dans la dimension physique, mais elle présente également certaines caractéristiques spécifiques qui doivent être appréhendées pour elles-mêmes. Le dernier aspect ontologique important concerne la notion de « changement qualitatif ». Celle-ci est utilisée par Georgescu-Roegen pour concevoir à la fois les phénomènes biologiques et économiques. Elle dessine ainsi une deuxième forme de continuité entre ces deux domaines. Georgescu-Roegen (1971, 17) considère que, « dans le long terme ou même dans un horizon plus proche, le processus économique (ainsi que le biologique) est inévitablement dominé par un changement qualitatif ». Ce changement qualitatif est selon lui « continuellement produit par l’émergence de nouveauté par combinaison » (355).

Dans le domaine biologique, cette évolution passe par l’apparition de mutations au niveau génétique, et par la sélection des caractéristiques phénotypiques les plus adaptées à l’environnement. Dans le sillage de Schumpeter, Georgescu-Roegen reprend ce schéma pour décrire l’évolution du processus économique. En particulier, il assimile les innovations technologiques à des « mutations exosomatiques » (1978a, 341). Comme dans le cas des mutations biologiques, celles-ci sont selon lui fondamentalement imprévisibles, ce qui l’amène à critiquer une conception linéaire du progrès technique. Par ailleurs, les mutations exosomatiques font aussi l’objet d’une forme de sélection, de sorte que l’évolution biologique et l’évolution économique partagent une même structure générale. Néanmoins, elles diffèrent par certains aspects. Premièrement, Georgescu-Roegen (1971, 359) note que l’évolution économique est plutôt « lamarckienne » que « darwinienne », dans la mesure où elle transmet des caractères acquis et non seulement des caractères hérités. Deuxièmement, l’évolution exosomatique a lieu à un rythme beaucoup plus rapide que l’évolution endosomatique. Les deux derniers siècles ont vu l’apparition d’un grand nombre d’innovations technologiques, transformant en profondeur les conditions matérielles d’existence de l’espèce humaine, alors même que ses caractéristiques biologiques ont peu changé.

Cette perspective amène Georgescu-Roegen à critiquer la définition standard de l’économie, comme étude de l’utilisation des moyens rares à des fins définies. Cette définition, traditionnellement associée à Lionel Robbins, suppose selon Georgescu-Roegen des fins et des moyens donnés. Il considère au contraire qu’il convient également d’étudier « le

processus par lequel de nouveaux moyens économiques, de nouvelles fins économiques et de nouvelles relations économiques sont créés » (1971, 320). C'est la raison pour laquelle il insiste sur la notion de changement qualitatif, comme processus d'émergence d'une nouveauté radicale. Cela souligne la dimension *évolutionnaire* de l'approche de Georgescu-Roegen⁴⁰.

À partir des éléments qui précèdent, l'approche de Georgescu-Roegen peut donc être caractérisée comme relevant d'une ontologie hiérarchique, anti-réductionniste et évolutionnaire. Dans cette approche, les activités économiques reposent nécessairement sur des soubassements physiques, liés aux flux de matière et d'énergie qui traversent le processus. Mais elles impliquent également des aspects proprement sociaux, qui ne sauraient se réduire à cette dimension physique. Ces activités économiques s'inscrivent dans une forme de continuité avec les activités biologiques, dans la mesure où elles luttent contre la dégradation entropique. De même, l'évolution biologique et l'évolution économique sont toutes les deux marquées par des changements qualitatifs qui transforment en profondeur les conditions d'existence.

On retrouve ces différentes facettes de la conception thermodynamique de l'économie à des degrés divers chez Daly et Ayres. Avant même la publication de *The Entropy Law and the Economic Process*, Daly (1968) adopte déjà une perspective similaire à celle de Georgescu-Roegen⁴¹. Il développe notamment l'idée que le processus économique est un prolongement des processus biologiques. Pour Daly, la biologie, l'écologie et l'économie sont toutes les trois des sciences de la vie. La première étudie les processus internes à l'organisme, tandis que les deux autres examinent des processus externes⁴². Dans ce cadre, l'ontologie hiérarchique ressort très clairement. Dans chacun de ces trois domaines, le processus vivant repose sur des bases physiques :

There is also a balance equation of the life process in physical units, based on the law of conservation of matter-energy. But more significant than the physical balance, from an economic viewpoint, is the one-way, non-circular, irreversible nature of the flow of matter-energy through all divisions of the life process. (Daly, 1968, 395)

La première contribution importante d'Ayres à l'économie de l'environnement reflète également cette ontologie hiérarchique. En effet, Ayres et Kneese (1969) remettent en question l'idée selon laquelle le rejet d'éléments nocifs dans l'environnement serait un effet marginal du processus économique, comme le suggère le concept d'externalité. Pour cela, ils s'appuient sur le principe de conservation de la masse. Dans cette perspective, toutes les ressources naturelles qui entrent dans le processus économique doivent soit y

40. Georgescu-Roegen est reconnu comme l'un des précurseurs de l'économie évolutionnaire (Seifert, 1994; Hodgson, 1998). Il n'est cependant qu'un précurseur parmi d'autres, et certainement pas le plus influent. Voir également Heinzl (2013) pour un examen croisé des approches évolutionnaires de Schumpeter et de Georgescu-Roegen.

41. Cela ne remet pas en cause l'attribution à Georgescu-Roegen de la primauté de cette approche, car Daly s'appuie essentiellement sur l'introduction à *Analytical Economics* (1966a).

42. C'est la raison pour laquelle il est question de « processus vivant » plutôt que de « processus économique » dans la citation ci-dessous. Dans cette perspective, le processus vivant inclut le processus économique.

être accumulées dans des biens d'équipement durables, soit en ressortir sous la forme de déchets⁴³. Ayres et Kneese notent en particulier qu'une part importante des rejets se trouve sous la forme de CO₂ du fait de la combustion des énergies fossiles. Déjà à l'époque, ils soulèvent les risques de perturbation climatique associés à ces émissions. Cette approche donne donc une dimension physique à la distinction traditionnelle entre l'accumulation sous la forme de capital et la destruction dans la consommation. Si la thermodynamique n'est pas mentionnée explicitement, il y a néanmoins ici une ontologie hiérarchique dans laquelle le processus économique repose sur des bases physiques. Ce n'est que plus tard qu'Ayres et Nair (1984) font réellement le lien avec la conception thermodynamique de l'économie développée par Georgescu-Roegen :

Because goods and services incorporate matter and energy, the physical sciences are clearly relevant to economics. In particular, one can expect the laws of thermodynamics to impose constraints on economic processes as they do on physical processes. (Ayres et Nair, 1984)

L'idée d'une continuité entre le vivant et l'économique est également sous-jacente dans la notion de « métabolisme industriel » introduite par Ayres (1989). Dans ce cadre, il considère « la biosphère et l'économie industrielle comme des systèmes de transformation des matériaux » (23). Néanmoins, il souligne que la biosphère a réussi à développer un processus de recyclage très performant, qui fait défaut dans le domaine économique. Cette conception intègre également une dimension évolutionnaire fondée sur le rôle des innovations technologiques et de leur impact sur les flux physiques. Ayres met notamment l'accent sur les innovations qui permettent d'accroître l'efficacité d'un procédé industriel, et celles qui permettent de réutiliser des co-produits jusque-là rejetés dans l'environnement. Cependant, il souligne que l'adoption de ces technologies dépend des normes qui guident la prise de décision des différents acteurs économiques, et de ce fait n'est pas garantie. En ce sens, il met également en avant une forme d'irréductibilité du processus économique à sa dimension physique.

L'examen des premières contributions de Daly et Ayres souligne donc que l'ontologie hiérarchique de Georgescu-Roegen est celle qui a eu le plus immédiatement d'influence. Si les dimensions anti-réductionniste et évolutionnaire se retrouvent moins clairement, la suite de ce chapitre montre qu'elles transparaissent néanmoins dans leurs contributions ultérieures. Outre ces enjeux ontologiques, les aspects épistémologiques et méthodologiques sont également partagés par ces différents auteurs. Au niveau épistémologique, la thermodynamique est conçue comme un cadre doté d'une forte légitimité scientifique et permettant d'appréhender la dimension physique du processus économique. Au niveau méthodologique, les auteurs recherchent d'abord une intégration conceptuelle forte fondée sur l'idée d'une réalité commune à l'économie et à la thermodynamique. Comme nous allons le voir, ces caractéristiques expliquent également les critiques qu'ils adressent à la théorie économique standard.

43. Aux Etats-Unis, Ayres et Kneese (1969, 285) estiment que « l'accumulation représente environ 10-15% des intrants annuels de base », le reste étant donc rejeté dans l'environnement.

1.1.2 Une critique de la théorie économique « standard »

Georgescu-Roegen (1971, 318) définit l'« économie standard » comme « l'école de pensée qui a suivi le chemin attrayant ouvert par les premiers mathématiciens marginalistes ». Le point de départ de sa critique se trouve à nouveau dans la thermodynamique, et plus particulièrement dans ce qui la distingue de la mécanique. Pour le comprendre, il faut revenir au choc épistémologique provoqué par l'émergence de la thermodynamique dans la physique du 19^e siècle. Au début du 19^e siècle, la physique est dominée par la mécanique, dont les lois permettent de comprendre le mouvement des corps. L'une des particularités de ces lois est qu'elles sont *réversibles*. Ainsi, si l'on filme le jet d'un projectile et que l'on passe le film à l'envers, le mouvement obtenu sera tout à fait cohérent avec les lois de la mécanique. La thermodynamique entre en contradiction avec ce principe de réversibilité. 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, et cette irréversibilité transparaît dans la loi de l'entropie. De ce fait, il semble impossible de fournir une explication de cette loi qui soit uniquement fondée sur les mouvements sous-jacents des particules. La mécanique et la thermodynamique apparaissent comme deux aspects complémentaires de la réalité physique, et il n'est pas possible de réduire la seconde à la première⁴⁴.

Georgescu-Roegen (1971, 168) insiste sur cette « impossibilité d'expliquer des processus unidirectionnels par des lois qui soient indifférentes à la direction ». Cette opposition entre réversibilité et irréversibilité sert de grille de lecture à sa critique de l'économie standard. La mécanique a selon lui eu une influence décisive sur les travaux des premiers marginalistes, tels que Stanley Jevons, Léon Walras, Vilfredo Pareto ou Irving Fisher. Jevons souhaitait ainsi construire la « mécanique de l'utilité et de l'intérêt individuel » (Jevons 1871, cité dans Georgescu-Roegen 1975, 347). Georgescu-Roegen attribue cette influence à la fascination générale que la mécanique exerçait au 19^e siècle dans tous les champs de la connaissance, notamment à travers les œuvres de Pierre-Simon de Laplace. Selon lui, cette influence a pour conséquence « une conception du processus économique comme un analogue mécanique consistant [...] en un principe de conservation et une règle de maximisation » (1975, 348). Cette idée sera par la suite reprise et développée de manière plus détaillée par Philip Mirowski (1989b)⁴⁵. Ce dernier montre comment le formalisme de la mécanique rationnelle a été transposé aux questions économiques en assimilant l'utilité à l'énergie potentielle, et en réduisant le problème à la maximisation de cette utilité sous la contrainte budgétaire. L'interdisciplinarité dont il est question ici concerne donc un transfert d'outils mathématiques, tels que le calcul différentiel, et ne repose pas sur des liens ontologiques entre les deux disciplines concernées.

Selon Georgescu-Roegen, la principale conséquence de ce formalisme est qu'il introduit une réversibilité complète dans la théorie économique :

44. Voir également l'annexe A pour davantage de précisions sur cette opposition entre réversibilité mécanique et irréversibilité thermodynamique.

45. L'influence de Georgescu-Roegen sur les travaux de Mirowski est rendue très explicite par l'hommage rendu au début de l'ouvrage « aux philosophes de l'économie les plus profonds : Thorstein Veblen et Nicholas Georgescu-Roegen » (Mirowski, 1989b, vi).

The pillar of equilibrium theory is that, if events alter the demand and supply propensities, the economic world always returns to its previous conditions as soon as these events fade out. An inflation, a catastrophic drought, or a stock-exchange crash leaves absolutely no mark on the economy. Complete reversibility is the general rule, just as in mechanics. (Georgescu-Roegen, 1975, 348)

Georgescu-Roegen reproche à la théorie standard d'être en contradiction avec la nature fondamentalement irréversible du processus économique. Néanmoins, cet argument soulève deux difficultés. D'une part, cette critique se situe à un niveau très général, et Georgescu-Roegen n'explique pas de manière plus précise comment se manifeste la réversibilité dans la théorie néoclassique⁴⁶. D'autre part, on peut s'interroger sur ce qui est irréversible dans l'ontologie qu'il attribue au processus économique. Sa conception de l'irréversibilité se fonde en partie sur la thermodynamique elle-même, dans la mesure où la loi de l'entropie est censée traduire une évolution irréversible du monde physique. Mais dans la citation ci-dessus, Georgescu-Roegen mentionne des éléments qui sortent de cette dimension strictement physique du processus économique, tels qu'un « krach financier catastrophique ». Dans ce cas, il n'est plus possible de s'appuyer directement sur la thermodynamique pour affirmer qu'un tel phénomène a un effet irréversible sur le processus économique. Il semblerait donc nécessaire d'expliquer plus en détail la nature de l'irréversibilité en question. En l'état, les conséquences pratiques de la critique formulée par Georgescu-Roegen apparaissent difficile à saisir.

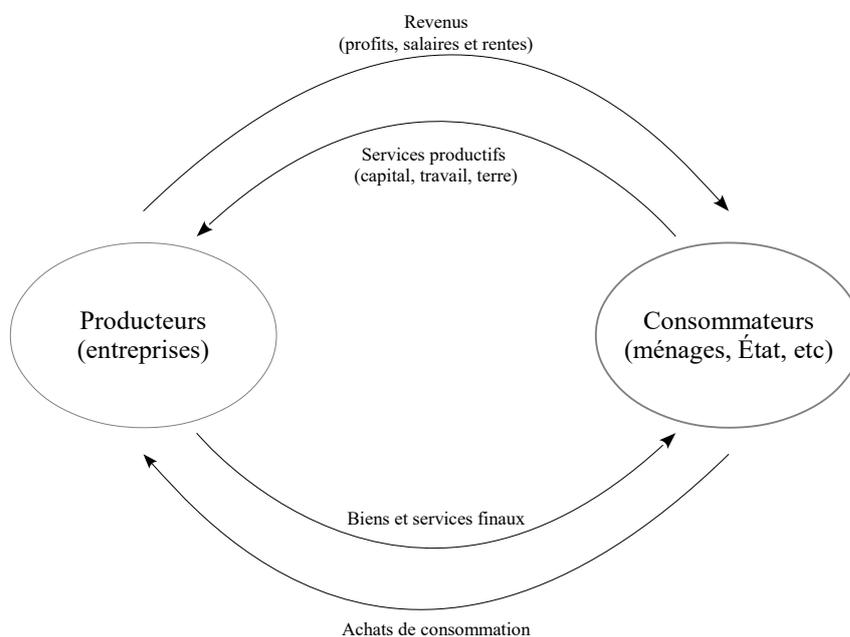
Georgescu-Roegen formule également une autre critique à l'encontre de la théorie économique standard. Il s'agit de l'absence de prise en compte des flux de matière et d'énergie qui traversent le processus économique. Il suggère ainsi qu'assimiler « le processus économique avec un analogue mécanique implique donc le mythe selon lequel le processus économique est un manège circulaire qui ne peut affecter l'environnement matériel et énergétique d'aucune manière » (1975, 350). Sa critique vise en particulier certains schémas illustrant les manuels d'économie standard, dans lesquels la production et la consommation sont reliées l'une à l'autre de manière circulaire. Cette vision est représentée dans la figure 1.1⁴⁷. Selon Georgescu-Roegen, le principal problème est que ces schémas ne font aucune place aux ressources naturelles. Ils imprègnent dans l'esprit des étudiants en économie une vision du monde dans laquelle l'économie fonctionne indépendamment de tout substrat physique. Georgescu-Roegen (1977b, 15) en conclut que « l'épistémologie mécaniste est responsable [...] de la complète ignorance du rôle des ressources naturelles dans le processus économique ».

S'il est évident qu'une telle représentation circulaire de l'économie n'est pas favorable à une prise en compte des ressources naturelles, l'origine mécaniste que Georgescu-Roegen attribue à ce type de schémas est moins claire. En effet, d'après ce qui précède, l'influence

46. Une discussion plus approfondie de cette question nécessite de revenir à son article intitulé « The Theory of Choice and the Constancy of Economic Laws » (1950b). Dans celui-ci, il propose une formalisation des changements de préférence à travers un effet d'hystérèse. Il conclut que l'« irréversibilité [...] apparaît avec ce modèle comme étant le cas normal, tandis que la réversibilité est exceptionnelle » (134).

47. Ce schéma est inspiré de ceux que l'on peut trouver dans les différentes éditions du manuel *Economics* de Samuelson (1948, 226 ; 1968, 694 ; Samuelson et Nordhaus 2009, 388).

FIGURE 1.1 – Schéma circulaire de l'économie dans la vision standard



supposée de la mécanique sur l'économie se situe principalement dans le domaine de la théorie du consommateur. L'utilité d'un agent aurait été assimilée à l'énergie, et son comportement au principe d'optimisation qui détermine le mouvement en mécanique rationnelle. Si l'on perçoit bien là le processus de mise en relation analogique terme à terme entre l'économie et la mécanique, on peine à voir le lien avec le schéma circulaire ci-dessus. Le principal problème est que celui-ci ne concerne plus seulement le consommateur, mais l'interaction entre le consommateur et le producteur. Ce changement d'échelle rend la relation avec l'analogie mécaniste plus distante.

Georgescu-Roegen fournit par ailleurs une autre explication possible de l'origine de ce type de schémas, qui paraît plus convaincante. Il suggère que, « 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 » (1978a, 351). Cette suggestion fournit d'emblée davantage de prise sur le schéma ci-dessus. Celui-ci procéderait d'une forme de réductionnisme monétaire qui consisterait à ne considérer comme relevant du champ de l'économie que les flux monétaires et leurs contreparties en marchandises. Ainsi, tous les éléments qui n'ont pas de valeur d'échange seraient laissés hors de l'analyse, quand bien même ils interviennent physiquement dans le processus économique. Cela inclurait nombre de ressources naturelles

prélevées dans l'environnement et de déchets rejetés qui y sont rejetés. Malgré cela, la critique de Georgescu-Roegen reste très générale et il est difficile d'en saisir la portée exacte.

Dans l'ensemble, Georgescu-Roegen a tenté de renvoyer tous les défauts de l'économie standard à l'influence originelle de la mécanique sur cette dernière⁴⁸. Il entend ainsi rendre d'autant plus nécessaire la référence à la thermodynamique. Au 19^e siècle, cette dernière avait remis en question la prétention de la mécanique à fournir une explication exhaustive du monde physique. De la même manière, selon Georgescu-Roegen, elle montrerait de manière éclatante les failles de la théorie néoclassique. Cependant, les liens entre l'influence mécaniste, d'une part, et la réversibilité ou la conception circulaire de l'économie, d'autre part, restent à un niveau très général. Dans cette situation, il est difficile de cerner la portée pratique de la critique de Georgescu-Roegen.

Malgré cela, la critique de la représentation circulaire de l'économie a été reprise par la suite. Ainsi, Ayres et Nair (1984) considèrent que le modèle d'équilibre général représente un système isolé et circulaire dans lequel les bases physiques de la production des biens et services ne sont pas représentées explicitement. À la différence de Georgescu-Roegen, ils n'attribuent pas cette caractéristique à une vision mécaniste du monde. Mais, comme lui, ils suggèrent de la remplacer par une conception alternative, où « les flux physiques sous-jacents de matière-énergie sont ajoutés à la représentation » (63). Outre cet aspect, Ayres et Nair insistent sur le fait que les notions d'équilibre et d'efficacité diffèrent entre la thermodynamique et l'économie. Ils mettent ainsi en garde contre la tentation d'établir une analogie formelle entre les deux disciplines sur ce point.

Daly (1985) développe l'idée selon laquelle la conception circulaire de l'économie contribue à occulter les flux physiques sous-jacents au processus économique. Selon lui, cela est notamment illustré par le « modèle du flux circulaire de valeur d'échange que l'on trouve dans les premières pages de presque tout manuel d'économie » (279). Pour expliquer l'origine de cette représentation de l'économie, il privilégie l'hypothèse d'un réductionnisme monétaire :

Perhaps the standard example of misplaced concreteness in economics is “money fetishism;” applying the characteristics of money, the token and measure of wealth, to concrete wealth itself. Thus if money can grow forever at compound interest, then, presumably, so can wealth; if money flows in a circle, then, presumably, so does output. (Daly, 1985, 282)

Daly ne remet pas en cause l'importance d'étudier la circulation de la monnaie, ni le fait que celle-ci soit intégrée à toute représentation élémentaire de l'économie. Il insiste plutôt sur le fait que cette dimension ne doit pas masquer le flux physique linéaire qui traverse le processus économique. Dit autrement, « le flux monétaire circulaire et le flux physique linéaire sont tous deux importants, et, bien que reliés, ne sont pas réductibles

48. Cet aspect est également souligné par Mirowski. Il note que 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. » (2001, F475)

l'un à l'autre » (1985, 280)⁴⁹. Le caractère anti-réductionniste de la conception thermodynamique de l'économie transparait donc ici. La dimension économique est encadrée dans la dimension physique, mais des phénomènes éminemment sociaux tels que la circulation monétaire ne peuvent être réduits à des déterminants physiques.

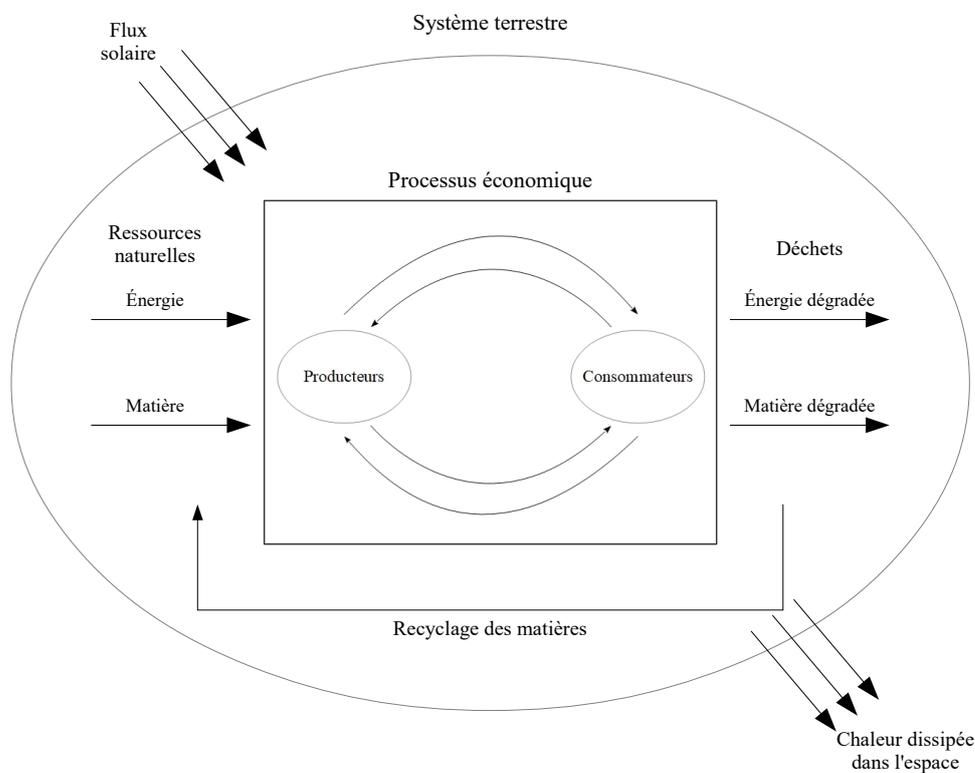
Par ailleurs, Daly ajoute à cela une liste d'implications plus concrètes de cette critique, là où Georgescu-Roegen était resté à un niveau très général. Deux implications apparaissent particulièrement importantes ici. La première implication est que les enjeux liés à l'efficacité d'allocation dominent la réflexion économique aux dépens de ceux relatifs à la taille du processus économique. Daly (1985, 287) souligne que « quelle que soit la taille du flux physique, le système de prix peut l'allouer de manière optimale parmi les finalités possibles », mais rien ne permet « au système de prix de déterminer la meilleure taille du flux en fonction du critère écologique de soutenabilité ». Dit autrement, l'efficacité économique et la soutenabilité écologique sont deux critères normatifs indépendants. Pour illustrer son propos, Daly (1985, 287) utilise la métaphore d'un bateau sur lequel un mécanisme de prix permettrait d'allouer des charges de manière optimale, c'est-à-dire en répartissant le poids de manière à éviter un déséquilibre. Il note que ce mécanisme ne permettrait en aucun cas de déterminer le poids limite à partir duquel le bateau risque de couler. Seule une analyse physique complémentaire peut établir une telle limite. L'allocation efficace des biens et services ne dit donc rien de la soutenabilité écologique globale de l'économie. Pour appréhender cette dernière, il est nécessaire de prendre en compte la dimension physique du processus économique.

Le second problème soulevé par Daly tient à la manière dont le revenu national est comptabilisé. Il revient pour cela sur une méthode initialement proposée par Irving Fisher, qui consistait à comptabiliser uniquement les flux de services rendus pendant une période donnée par l'ensemble des biens en état d'usage. Selon Daly, cette approche a été écartée par Arthur C. Pigou, qui la jugeait trop abstraite. Mais il la considère plus pertinente pour mesurer la contribution au bien-être, car elle se concentre sur les services réellement rendus, et non sur les coûts de production et de reproduction des biens qui rendent ces services. Selon Daly (1985, 289), dans le cadre standard, « une grande partie de la production est en réalité le coût de maintenance du stock de capital ; une mesure de l'épuisement, des pollutions et du travail malheureusement nécessaires pour maintenir le stock de capital contre les ravages de la dépréciation physique ». La focalisation sur les flux monétaires, qui servent de base à la mesure agrégée du niveau de production, conduit donc ici à une conception erronée de la finalité du processus économique. Le flux de biens produits chaque année à partir de ressources naturelles sert à entretenir et à accroître un stock. Mais *in fine*, c'est ce stock qui rend des services permettant de satisfaire des besoins. Dit autrement, « les services rendus annuellement par le stock sont un gain, le flux physique requis annuellement pour maintenir le stock est un coût ».

En conclusion, la critique formulée par Georgescu-Roegen à l'égard de la théorie économique standard est intéressante du point de vue méthodologique. Selon lui, les prin-

49. La notion de « *throughput* » utilisée par Daly est traduite, ici et dans la suite, par « flux physique ». Une traduction littérale inviterait plutôt à utiliser le terme de « débit », mais celui-ci ne rend pas compte de la dimension physique qui se trouve derrière le concept utilisé par Daly.

FIGURE 1.2 – Schéma de l'économie écologique



cipaux défauts de la théorie néoclassique proviennent de sa fascination originelle pour la mécanique, qui l'a conduite à imiter son formalisme. Cette critique souligne ainsi son opposition à une forme d'interdisciplinarité fondée sur des analogies formelles et dépourvue de fondements ontologiques. Elle renforce par là même l'orientation diamétralement opposée qui est celle de la conception thermodynamique de l'économie. Cette dernière repose sur le présupposé ontologique que la transformation des flux de matière et d'énergie constitue un élément central du processus économique. Dans cette démarche, la thermodynamique fournit d'abord et avant tout une grille de lecture conceptuelle, et non un formalisme qu'il s'agirait d'imiter.

Malgré cela, sur le plan théorique, il s'avère difficile de donner un sens clair et précis à la critique de Georgescu-Roegen. Qu'il s'agisse de la question de la réversibilité ou de la conception circulaire de la production, le lien avec une influence mécaniste apparaît fou et les conséquences pratiques incertaines. Il n'est donc pas étonnant qu'Ayres et Daly aient abandonné cette interprétation, tout en conservant la critique des représentations

circulaires de l'économie comme forme de réductionnisme monétaire. De manière plus générale, la critique de la conception circulaire de l'économie est très populaire en économie écologique. Pour la contrecarrer, ce courant propose d'illustrer sa propre vision du monde à l'aide d'un schéma alternatif, tel que celui représenté dans la figure 1.2⁵⁰. Ce schéma reflète les principales caractéristiques de la conception thermodynamique de l'économie. La dimension physique y est représentée par les flux de matière et d'énergie, dont la dégradation traduit l'effet de la loi de l'entropie. Mais le fonctionnement interne, et en partie autonome, de l'économie y trouve également sa place. Ce schéma illustre donc l'ontologie hiérarchique et anti-réductionniste propre à la conception thermodynamique de l'économie.

1.2 Ressources naturelles et limites à la croissance

La section précédente a permis de cerner les grands traits de la conception thermodynamique du processus économique, et en particulier de mettre en évidence une ontologie hiérarchique, anti-réductionniste et évolutionnaire. Si elles constituent les fondements de cette approche, ces caractéristiques se situent cependant à un niveau très élevé de généralité. La section présente s'intéresse donc à leurs implications plus concrètes concernant trois enjeux majeurs : les ressources énergétiques, la dissipation de la matière, et les limites physiques à la croissance. Ces aspects sont d'autant plus importants qu'ils sont en apparence sources de certaines divergences entre Georgescu-Roegen, Daly et Ayres. Néanmoins, la section conclut que les divergences effectives sont marginales en comparaison du socle commun partagé par ces auteurs. Elles ne remettent donc pas en question la cohérence interne de la conception thermodynamique de l'économie.

1.2.1 Les ressources énergétiques : stocks terrestres et flux solaire

La question de la disponibilité des ressources énergétiques nécessaires au développement industriel s'est posée dès le 19^e siècle. Ainsi, Jevons (1865) s'inquiétait de l'épuisement des ressources en charbon en Grande-Bretagne. Il craignait que cet épuisement ne mette un terme à l'essor industriel du pays. La conception thermodynamique du processus économique reprend à son compte cette inquiétude et lui donne une portée plus générale en considérant l'ensemble des ressources énergétiques terrestres. Cette généralisation repose sur la distinction entre l'énergie « disponible », qui peut être transformée en travail mécanique, et l'énergie « indisponible », qui ne le peut pas. Lorsque des ressources énergétiques terrestres, telles que le charbon, sont utilisées dans des processus industriels, la quantité d'énergie est conservée, mais elle passe du statut d'énergie disponible au statut d'énergie indisponible. Ainsi, pour Georgescu-Roegen (1975, 353), « la loi de l'entropie est la racine de la rareté économique », au sens où sans elle « nous pourrions utiliser une quantité de charbon encore et encore » (353). Le deuxième principe de la thermodynamique est donc la source d'une rareté spécifique à l'énergie, qui subit une

50. Ce schéma est inspiré de Costanza *et al.* (1997, 15). Voir également Daly (1977b, 181) ou Ruth (1993, 8).

dégradation irréversible d'une forme utilisable vers une forme inutilisable. Cette rareté est différente de celle des terres agricoles, dont la surface est limitée, mais constante.

La conséquence la plus directe de la loi de l'entropie est que les ressources énergétiques disponibles sous la forme de *stocks* terrestres tendent à s'épuiser. Sur ce point, Georgescu-Roegen note que l'intuition de Jevons était bonne, mais que la thermodynamique permet de lui donner une dimension plus systématique qui dépasse le seul cas du charbon :

Had Jevons referred to the reserves of low entropy in the earth's crust instead of coal in speaking of "a certain absolute and inexorable limit, uncertain and indefinable that limit may be," and had he also added that free energy cannot be used more than once, he would have presented us with a clear picture of one side of man's struggle with the limited dowry of mankind's existence on earth. (Georgescu-Roegen, 1971, 296)

Pour Georgescu-Roegen, l'épuisement est donc inéluctable si le processus économique continue de reposer sur des ressources énergétiques terrestres. Il s'appuie pour cela sur un raisonnement élémentaire, mais néanmoins problématique. Selon Georgescu-Roegen (1971, 304), si l'on suppose qu'il existe un stock fini de basse entropie, et que celle-ci est utilisée à un taux constant, alors l'épuisement intervient en un temps fini. Le problème provient ici de l'idée d'un stock fini de basse entropie terrestre. Comme on l'a vu dans la sous-section 1.1.1, les différentes formes d'énergie se répartissent de manière continue le long d'une échelle de qualité. Il n'existe donc pas de critère clair pour dire ce qu'est une basse ou une haute entropie⁵¹. Par conséquent, l'idée d'un stock de basse entropie doit être vue comme une manière approximative de désigner les ressources énergétiques terrestres. Elle ne permet pas de circonscrire précisément ce domaine et encore moins d'en fournir une mesure quantitative.

Cependant, étant donné une ressource particulière, il est toujours possible d'avoir une estimation du stock terrestre disponible. Cette estimation peut être comparée au niveau de consommation d'énergie actuel afin d'en déduire un ordre de grandeur de la durée pendant laquelle la ressource en question pourrait alimenter le processus économique. Concernant les ressources conventionnelles d'énergies fossiles et nucléaires, Georgescu-Roegen (1975, 370) considère que « si l'épuisement continue d'augmenter au rythme actuel, les réserves pourraient soutenir l'activité industrielle humaine seulement pendant encore quelques dizaines d'années ». Il discute également d'autres technologies nucléaires possibles, telles que la surgénération et la fusion, mais il estime qu'elles présentent soit trop de risques soit qu'elles ne sont pas un stade de développement qui permette d'envisager un déploiement à grande échelle. De manière générale, il conclut donc que « les énergies terrestres sur lesquelles nous pouvons effectivement nous appuyer existent en quantités très faibles, tandis que l'utilisation de celles qui existent en quantités plus importantes est entourée de grands risques et d'obstacles techniques redoutables » (371).

À l'inverse, Georgescu-Roegen se montre dans un premier temps plutôt favorable et optimiste quant à l'utilisation de l'énergie solaire. Il note en particulier que le flux

51. Devrait-on par exemple considérer qu'une source de chaleur à 100°C est de basse entropie, et qu'une autre à 50°C est de haute entropie? Un tel choix serait tout à fait arbitraire, et sans aucune justification physique.

solaire est quantitativement bien supérieur à la consommation mondiale d'énergie, et que « l'utilisation directe de l'énergie du soleil n'est pas entourée de risques ou de grandes incertitudes » (1975, 371). Par conséquent, il conclut que « nous devrions diriger tous nos efforts vers l'amélioration de l'utilisation directe de l'énergie solaire » (377). Cependant, Georgescu-Roegen se montre par la suite plus pessimiste quant à la possibilité de faire fonctionner une économie industrialisée sur le seul flux solaire. Il note en particulier que « l'intensité du rayonnement solaire atteignant le niveau du sol étant extrêmement faible, de grandes infrastructures matérielles sont nécessaires pour le collecter » (1978b, 20). Il considère donc que la production et l'entretien des équipements nécessaires pour capter l'énergie solaire consomment eux-mêmes trop d'énergie pour que le rendement global soit intéressant. Néanmoins, dans sa perspective évolutionnaire, les innovations technologiques sont toujours imprévisibles. Il est donc possible que la situation change à l'avenir.

Tout en s'appuyant sur une vision générale semblable, Ayres se positionne de manière critique par rapport à la manière dont Georgescu-Roegen applique les principes de la thermodynamique aux ressources énergétiques. Il considère en particulier que la notion d'entropie n'est pas appropriée dès lors que l'on cherche à évaluer des stocks et des flux d'énergie :

Although the term entropy is commonly used in such discussions as the above, the notion of low/high entropy as applied to materials and energy stocks and flows is confusing, given the way the concept is usually introduced to students in terms of reversible/irreversible thermodynamic processes of change. (Ayres, 1998, 192)

L'entropie sert d'abord à décrire l'évolution d'un système donné. Elle permet donc de comparer différents états d'un même système, mais pas deux systèmes entre eux. Or, pour évaluer les ressources énergétiques dans leur globalité, il est nécessaire de pouvoir comparer, et éventuellement agréger, des ressources très diverses (charbon, pétrole, matières fissiles, flux solaire, chaleur, etc.). De ce point de vue, les notions de basse entropie et de haute entropie utilisées par Georgescu-Roegen permettent uniquement de rendre compte de manière idéalisée de la dégradation qualitative subie par le flux physique qui traverse le processus économique. Elles n'ont pas de portée pratique, qui permette de construire une échelle commune pour mesurer et agréger différentes ressources énergétiques. La mesure traditionnelle en termes d'énergie thermique n'est quant à elle pas plus satisfaisante, car elle ne tient pas compte des différences de qualité entre les différentes ressources.

Pour ces raisons, Ayres privilégie la notion d'« exergie ». Cette dernière désigne la quantité maximale de travail mécanique qu'une ressource énergétique peut produire⁵².

52. En toute généralité, la mesure de l'exergie est toujours relative à un environnement donné. À titre d'exemple, dans l'annexe A, le coefficient de Carnot montre que le rendement maximum d'une machine thermique dépend de la température du puits de chaleur, dont le rôle est en général joué par l'atmosphère environnante. Pour mesurer l'exergie de différentes ressources énergétiques, il convient donc de définir un environnement de référence commun, dont la température est égale à la température moyenne de l'atmosphère.

Elle fournit un outil de mesure qui tient compte de la qualité de la ressource en question. Considérons par exemple deux corps qui émettent une même quantité de chaleur, mais à des températures différentes. L'exergie correspondante sera plus élevée pour le corps le plus chaud. Par ailleurs, Ayres (1998, 192) note que « l'exergie n'est pas une quantité conservée, comme l'énergie ». Au contraire, « elle peut être gagnée ou perdue dans les processus physiques ». En comparant la quantité d'exergie produite par le processus par rapport à la quantité consommée, on obtient ainsi une mesure thermodynamique de l'efficacité du processus⁵³. Cette mesure peut ensuite servir à évaluer le potentiel d'amélioration de l'efficacité d'un système, ou à comparer deux processus. Selon Ayres, cette mesure devrait donc être davantage utilisée pour évaluer les performances environnementales, que ce soit au niveau d'entreprises, de branches industrielles, ou de pays.

L'intérêt de cette approche en termes d'exergie est bien illustré par le travail empirique d'Ayres *et al.* (2003) concernant l'utilisation de l'énergie aux États-Unis au cours du 20^e siècle. Les données mettent d'abord en évidence la forte croissance des ressources fossiles par rapport à l'énergie issue de la biomasse ou d'autres ressources renouvelables. Les auteurs analysent ensuite la manière dont ces ressources fossiles se répartissent entre les trois principaux usages que sont la production de chaleur, d'électricité et de force motrice. Ils montrent ainsi qu'à la fin de la période chaque usage représente environ un tiers du total, alors que la chaleur domine largement au début de la période. Ils étudient ensuite l'évolution de l'efficacité de conversion de l'exergie pour ces trois usages. Dans la production d'électricité, des gains d'efficacité importants ont été permis par des turbines plus performantes et des matériaux résistants à des températures plus élevées⁵⁴. Des améliorations similaires ont eu lieu en ce qui concerne les moteurs utilisés dans l'industrie ou dans les transports pour générer de la force motrice⁵⁵. Au contraire, dans la production de chaleur, les gains d'efficacité ont été modérés, et ils dépendent fortement du type d'utilisation⁵⁶.

Sur le plan épistémologique, l'exergie donne donc à la thermodynamique une fonction nouvelle. Chez Georgescu-Roegen, la thermodynamique fournit principalement une grille de lecture conceptuelle permettant d'appréhender la dimension physique du processus économique. Mais les notions de basse entropie et haute entropie ne permettent pas de comparer et de mesurer différentes ressources énergétiques. Le concept d'exergie répond à cette difficulté. Il permet de rendre compte de manière plus rigoureuse des flux d'énergie qui traversent le processus économique et de l'efficacité avec laquelle ils y sont utilisés. Là où les notions de basse entropie et haute entropie décrivaient de manière générale

53. Ainsi une ampoule de type LED convertit quasiment 100 % de l'exergie électrique en exergie sous forme de lumière. Au contraire, une ampoule classique dissipe une part importante de l'exergie initiale sous forme de chaleur.

54. L'efficacité exergétique moyenne dans ce domaine passe de 3,6 % à 34 %, et elle atteint même 48 % pour les modèles les plus perfectionnés.

55. Par exemple, dans les transports routiers, l'efficacité a considérablement augmenté, mais elle dépend fortement de la catégorie de véhicules. Sur la fin de la période, elle est tout juste de 10 % pour les véhicules particuliers, tandis qu'elle est d'environ 25 % pour les camions.

56. Ainsi, la demande de chaleur à hautes températures (>600°C) dans les industries lourdes représente plus de la moitié de la chaleur totale. Elle a une efficacité d'environ 20 %. L'autre poste de consommation important est la demande de chaleur résidentielle, où l'efficacité est très faible, autour de 5 %.

la dégradation qualitative à l'œuvre dans le processus économique, l'exergie rend cette facette empiriquement mesurable. En ce sens, l'interdisciplinarité implique ici non seulement un transfert conceptuel, mais également le transfert d'outils de mesure. Cela donne une dimension plus opérationnelle à la conception thermodynamique de l'économie. Il ne s'agit pas là d'une démarche antagoniste à celle développée par Georgescu-Roegen, mais plutôt d'un second niveau dans l'intégration entre les disciplines.

À cet égard, il semble qu'Ayres a eu tendance à exagérer l'écart entre sa conception et celle de Georgescu-Roegen :

The first economist to consider the subject in depth, Nicholas Georgescu-Roegen [...], focused on the entropy law as a metaphor of inevitable decline, with some further embellishments that will be considered later. (Ayres, 1998, 195)

Ayres reproche en particulier à Georgescu-Roegen, mais également à Daly, de faire comme si la Terre était un système thermodynamique isolé dans lequel la loi de l'entropie impliquerait à long terme un épuisement de toutes les ressources énergétiques. Il considère au contraire que le flux d'énergie solaire représente une ressource considérable à long terme. Selon lui, « l'énergie solaire qui arrive sur Terre dépasse d'un facteur 10000 la consommation directe d'exergie par l'homme » (1998, 196). Le principal défi est alors de disposer des technologies permettant de transformer cette énergie en une forme utilisable à des fins économiques. Ayres note sur ce point qu'il existe un certain nombre de difficultés, liées notamment au caractère diffus de l'énergie solaire et aux coûts en capital fixe très élevés. Cependant, il conclut qu'il « s'agit là de problèmes techniques et d'ingénierie, et non de limites fondamentales » (197). S'il reconnaît donc que pour le moment les économies industrielles sont fortement dépendantes des stocks terrestres d'énergies fossiles, il n'y a selon lui pas de fatalité à cela⁵⁷.

Contrairement à la manière dont Ayres présente les choses, cette position n'apparaît cependant pas très différente de celle de Georgescu-Roegen, présentée plus haut. Tous deux mettent l'accent sur le fait que le flux solaire représente la ressource énergétique la plus sûre à long terme, mais également qu'il existe des défis techniques sur cette voie. Leurs divergences portent en définitive sur la plus ou moins grande facilité avec laquelle ces obstacles peuvent être surmontés. Georgescu-Roegen se montre plus pessimiste qu'Ayres. La critique de ce dernier à l'égard d'une conception de la Terre comme un système isolé, et d'une application naïve de la loi de l'entropie, est donc un garde-fou utile contre certaines interprétations erronées. Mais en la présentant comme une critique adressée à Georgescu-Roegen, elle crée une division factice. Georgescu-Roegen lui-même n'a jamais explicitement soutenu cette conception⁵⁸. Au contraire, leurs deux approches

57. Par ailleurs, Ayres souligne qu'au-delà de leur caractère intrinsèquement fini et épuisable, le principal problème posé par les énergies fossiles provient des émissions de CO₂ dans l'atmosphère qu'elles impliquent.

58. Il est d'autant plus important de le noter qu'Ayres (2007, 116) mettra à nouveau en avant cette division : « The best-known pessimists (Georgescu-Roegen and Herman Daly) point out that there is a second law of thermodynamics which says that entropy increases in every process and that perpetual motion machines are impossible [...]. They are right about the relevance of the entropy law but wrong to assert that this law implies that our civilization is totally dependent on a finite stock of high quality

s'avèrent tout à fait compatibles. Le principal apport d'Ayres à la conception thermodynamique de l'économie initiée par Georgescu-Roegen réside finalement dans l'introduction du concept d'exergie. Celui-ci permet d'estimer plus rigoureusement les stocks et les flux de ressources énergétiques.

1.2.2 Matière, dissipation et recyclage

La matière constitue un deuxième enjeu fondamental dans la conception thermodynamique de l'économie, et elle fait également l'objet de débats. Ceux-ci portent principalement sur l'idée d'une dissipation irrévocable de la matière et sur la possibilité d'en rendre compte dans le cadre de la thermodynamique. Dans un premier temps, la matière est entendue ici au sens le plus général du terme, englobant à la fois les métaux et les minéraux non métalliques. Par la suite, certaines caractéristiques propres aux métaux seront discutées.

Pour commencer, notons que la position de Georgescu-Roegen sur les liens entre l'entropie et la matière a évolué au cours des années 1970. Dans un premier temps, il applique la notion d'entropie de manière indifférenciée à l'énergie et à la matière. Il estime ainsi que « la loi de l'entropie dans sa forme actuelle stipule que la matière est également sujette à une dissipation irrévocable » (1975, 352). Il conçoit la production de structures matérielles ordonnées comme une diminution de l'entropie ayant pour contrepartie une augmentation plus importante de l'entropie liée à la dissipation de l'énergie utilisée pour cela⁵⁹. Il y a donc une certaine substituabilité entre l'entropie de la matière et de l'énergie. Dans cette perspective, la loi de l'entropie « n'exclut pas (au moins en principe) de séparer les éléments d'une structure matérielle, du moment qu'une quantité suffisante d'énergie est disponible pour remplir cette tâche » (356). En particulier, le recyclage complet de la matière dissipée par le processus économique n'est pas théoriquement impossible. Cependant, Georgescu-Roegen précise déjà qu'il l'est en pratique, car cela nécessiterait « un temps pratiquement infini ».

Par la suite, Georgescu-Roegen affirme que le recyclage complet est également théoriquement impossible. Selon lui, la loi de l'entropie ne rend pas compte de la dissipation de la matière. Pour cette raison, elle nécessite d'être complétée par un quatrième principe, selon lequel, « dans un système clos, l'entropie de la matière tend vers un maximum » (1977a, 269). Il met notamment l'accent sur l'absence de considération pour les phénomènes de friction dans la thermodynamique⁶⁰. Selon lui, cette absence s'explique par la difficulté à rendre compte théoriquement des phénomènes de friction. Il n'existe pas de

(low entropy) resources stored in the earth's crust. »

59. Georgescu-Roegen (1975, 354) prend notamment l'exemple du cuivre : « Also, when we produce a copper sheet from some copper ore we decrease the entropy (the disorder) of the ore, but only at the cost of a much greater increase of the entropy in the rest of the universe. »

60. Georgescu-Roegen (1986a, 6-7) reconnaît que sa position sur le sujet a évolué par rapport à ses premiers travaux : « In my earlier writings I took for granted that thermodynamics had paid attention to what happens not only to the quality of energy as things keep happening but also to that of matter (matter in bulk as distinguished from microscopic matter). I also thought that they had seen that friction does not degrade only energy but matter as well. Subsequently, however, I saw that I was wrong. Thermodynamics have stopped short from considering all effects of friction. »

loi générale permettant d'évaluer la chaleur dissipée par la friction, et encore moins l'impact de celle-ci sur la matière. Pour autant, l'observation élémentaire montre que partout la matière s'use et se détériore, non seulement sous l'effet des frictions, mais aussi des réactions chimiques. Ainsi, Georgescu-Roegen constate que « toutes choses s'oxydent, se cassent, se dispersent, s'effacent, etc. » (268). Il conclut qu'il n'y a pas « de structures matérielles immuables, parce que la matière tout comme l'énergie se dissipe continuellement et irrévocablement »⁶¹. Selon lui, ces phénomènes atteignent une proportion suffisamment importante pour poser un problème au processus économique à long terme.

Georgescu-Roegen souligne donc d'abord une limite épistémologique de la thermodynamique. Dans sa forme standard, la thermodynamique ne permet pas de rendre compte de la dissipation de la matière, alors que celle-ci constitue une dimension importante de l'environnement physique dans lequel évolue le processus économique. À ma connaissance, cette limite est reconnue par les physiciens eux-mêmes, de sorte que le problème soulevé par Georgescu-Roegen est pertinent. Mais, dans un second temps, il prétend pouvoir dépasser cette limite en formulant un quatrième principe de la thermodynamique. La difficulté sous-jacente à cette démarche est que Georgescu-Roegen se fonde sur une intuition issue de l'observation de divers phénomènes, tels que les frottements et l'oxydation. Mais il ne donne pas d'assise analytique à ce principe. En particulier, les processus naturels et industriels de recyclage semblent aller à l'encontre de ce principe. Pour démontrer que la dissipation de la matière n'est pas évitée par ces procédés, il faudrait mettre en évidence qu'une dissipation de matière plus importante a lieu dans le même temps. Une quantification de la dissipation de la matière apparaît donc nécessaire pour donner une assise analytique à ce principe. Or, selon Georgescu-Roegen (1979c, 1038), une telle quantification est rendue impossible par l'hétérogénéité de la matière.

Néanmoins, il existe une forme plus faible de l'affirmation de Georgescu-Roegen selon laquelle le recyclage complet est impossible. Elle repose sur l'idée que tout procédé de recyclage nécessite des instruments qui vont s'user au cours du procédé, et ainsi engendrer eux-mêmes une dissipation de la matière. Selon lui, ces instruments « devront être remplacés par d'autres, eux-mêmes produits par d'autres instruments, qui s'useront aussi et devront être remplacés, et ainsi de suite, dans une régression à l'infini » (1979c, 1034). Il ne s'agit donc plus d'une transformation qualitative irréversible de la matière, mais plutôt d'un problème de coordination entre le processus de recyclage et le reste du processus économique. Georgescu-Roegen suggère que si l'on prend en compte toute la dissipation de matière induite par le procédé de recyclage, alors le résultat net pourrait être négatif. Il ne fournit cependant pas davantage d'arguments analytiques permettant d'étayer cette position.

Ces questions ont été approfondies par Ayres. Il s'inquiète en particulier de ce qu'il nomme les « usages dissipatifs » de la matière, dans lesquels « les matériaux sont dégradés,

61. Pour illustrer son propos, Georgescu-Roegen (1978a, 366) imagine notamment le cas extrême suivant : « 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. »

dispersés et perdus au cours d'une seule utilisation » (1989, 26)⁶². Il note également que « d'autres usages sont en pratique dissipatifs en raison de la difficulté à recycler des éléments tels que les batteries et les appareils électroniques » (27). De ce point de vue, il est clair que Georgescu-Roegen et Ayres partagent une même préoccupation pour la dissipation de la matière. Cependant, le second apparaît dès le départ plus optimiste quant à la possibilité de limiter cette dissipation et d'augmenter le taux de recyclage des matériaux. Il conclut qu'à long terme, il convient de transformer le processus économique en « un métabolisme industriel entraînant une réduction de l'extraction de matériaux vierges, une réduction des pertes de déchets et un recyclage accru des matériaux utiles » (39).

Ayres (1997b) développe cette question en se concentrant sur le recyclage des métaux. Comme dans le cas de l'énergie, sa principale contribution est d'apporter des connaissances techniques et des données empiriques sur le sujet. Il montre ainsi que l'extraction mondiale de métaux a connu une forte croissance depuis la révolution industrielle. La figure 1.3 représente la production annuelle mondiale de métaux, exprimée en milliers de tonnes, entre le milieu du 18^e siècle et la fin du 20^e. À titre d'exemple, la production de cuivre a été multipliée environ par 1000 entre 1800 et 2000. À l'inverse, une faible part de la consommation totale de métaux provient de matériaux recyclés⁶³. À nouveau les usages dissipatifs apparaissent particulièrement préoccupants. Ayres (1997b, 147) note que, « jusqu'à une époque relativement récente, les métaux n'étaient jamais mis au rebut », car « ils étaient trop rares et trop précieux ». La révolution industrielle a marqué une rupture, en particulier après la Seconde Guerre mondiale. Dorénavant, « les usages dissipatifs et les déchets sont pratiquement la norme »⁶⁴.

Selon Ayres, la motivation principale pour réduire l'extraction de métaux provient des nombreuses pollutions qui lui sont associées, et qui « sont très toxiques pour les animaux et les plantes » (1997b, 148). Ces pollutions sont liées à la production de coke dans le cas du fer⁶⁵, aux « boues rouges » en ce qui concerne l'aluminium⁶⁶, au mercure dans le traitement de l'or, ou encore aux émissions de dioxyde de soufre et à l'arsenic

62. Ayres (1989, 26) illustre cette notion d'usage dissipatif de la manière suivante : « In addition to food and fuels (and additives such as preservatives), other materials that fall into this category include packaging materials, lubricants, solvents, flocculants, antifreezes, detergents, soaps, bleaches and cleaning agents, dyes, paints and pigments, most paper, cosmetics, pharmaceuticals, fertilizers, pesticides, herbicides, and germicides. »

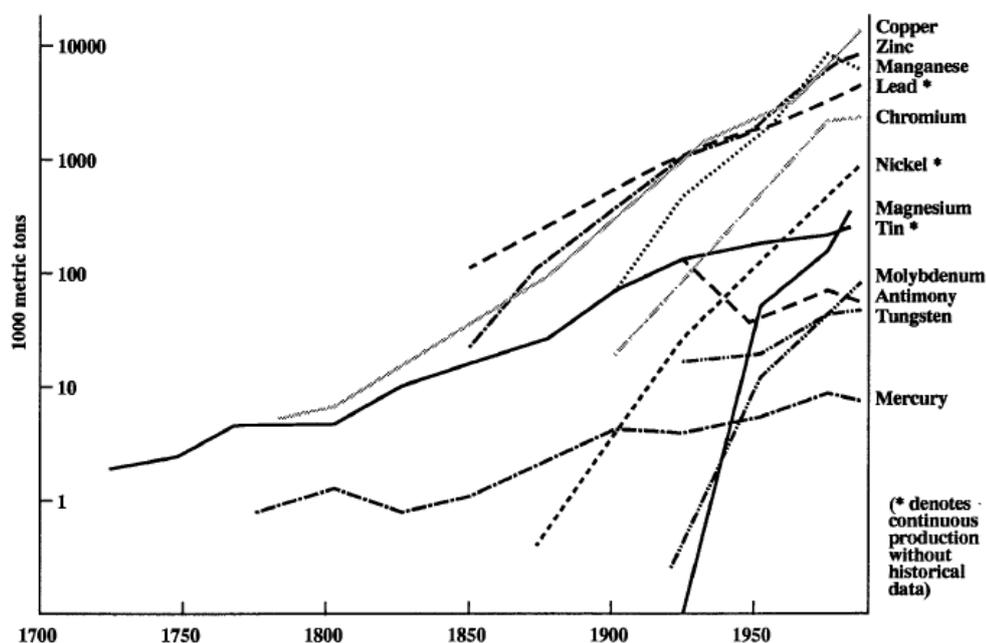
63. Par exemple, aux États-Unis, la part de la consommation totale provenant de matériaux recyclés se situe autour de 30 % pour le nickel, l'étain et le zinc, de 40 % pour l'aluminium et le cuivre, et de 70 % pour le plomb (Ayres, 1997b, 149-150). Ces données ne permettent cependant pas de savoir quelle proportion des déchets est recyclée, car une partie de la consommation totale de métaux est accumulée de manière durable dans les biens produits. Selon les métaux, le rapport entre le flux de consommation et le flux de déchets peut donc varier sensiblement.

64. Ayres (1997b, 148) note cependant que certains secteurs échappent encore à cette tendance : « The only exceptions worth mentioning to the dominance of dissipative uses are in jewelry, coinage and long lived structural materials, especially steel and its alloys, aluminum and copper. »

65. Le coke est un dérivé du charbon obtenu par un procédé très polluant. Il sert ensuite à réduire le minerai de fer pour obtenir de la fonte.

66. Les boues rouges sont issues du traitement de la bauxite qui permet d'obtenir de l'alumine, premier stade vers la production d'aluminium pur.

FIGURE 1.3 – Production annuelle mondiale d'une sélection de métaux



Source : Ayres (1997b, 147)

pour la plupart des autres métaux. Outre ces pollutions, l'extraction des métaux pose un problème économique. Bien que leurs prix aient significativement diminué au 20^e siècle, Ayres (1997b, 158) considère qu'à long terme, ils augmenteront inévitablement, car « le coût de nouveaux gains marginaux d'efficacité dans la découverte, l'extraction et le raffinage des matières premières augmentera ». L'une des raisons principales est que le degré de concentration des minerais ne cesse de diminuer au fur et à mesure que les gisements les plus concentrés s'épuisent⁶⁷. Si les progrès technologiques ont pour le moment permis de compenser ce phénomène, selon lui, ils ne pourront pas le faire indéfiniment.

Pour ces diverses raisons, Ayres (1997b, 159) suggère qu'il est « important d'accélérer la fermeture du cycle des matériaux », c'est-à-dire de réduire la quantité de déchets non recyclés. Cet objectif nécessite de prendre en compte à la fois les aspects techniques et économiques associés à la consommation des métaux. Sur le plan technique, la principale orientation proposée par Ayres repose sur ce qu'il nomme « la stratégie des 4R : réparer, réutiliser, reconditionner et recycler » (161)⁶⁸. Ces quatre variantes impliquent

67. Ayres (1997b, 160) illustre cette tendance dans le cas du cuivre : « In the 19th century, copper was being mined from deposits with 10 % ore grade. Today the world average is about 0.9 % . »

68. Ayres (1997b, 161-162) mentionne également une deuxième stratégie consistant à appliquer les méthodes d'extraction minières aux stocks de déchets, mais il considère qu'elle offre moins de perspectives

des transformations plus ou moins importantes des produits initiaux dans lesquels les métaux sont incorporés. Ils fournissent diverses possibilités pour remettre des métaux usagers en circulation et ainsi limiter l'extraction de minerais vierges, et les pollutions qui l'accompagnent.

Du point de vue économique, la question est de savoir comment faire en sorte que cette stratégie 4R soit privilégiée par les différents agents. Ayres n'écarte pas les possibilités d'interdictions pures et simples, notamment pour éviter certains usages dissipatifs⁶⁹. Il privilégie cependant des régulations qui permettraient de rendre les méthodes 4R plus compétitives par rapport aux activités manufacturières classiques, fondées sur l'utilisation de minerais vierges. À long terme, il pense que l'épuisement des gisements les plus concentrés entraînera une hausse naturelle des prix des minerais vierges et devrait donc inciter à se tourner vers les sources secondaires. Mais cela pourrait être insuffisant et arriver trop tard, notamment en ce qui concerne les niveaux de pollution de l'environnement. Selon Ayres (1997b, 168), le principal obstacle serait que « la réutilisation, la réparation et le reconditionnement sont par nature plus intensifs en travail que les activités manufacturières classiques », car « ils ne peuvent pas exploiter les grandes économies d'échelle et d'expérience ». Il conviendrait donc de modifier la répartition des coûts des entreprises, afin de les inciter à réaliser des économies sur les ressources naturelles plutôt que sur le travail, via notamment la politique fiscale. Par ailleurs, Ayres conclut que les industries extractives et métallurgiques devront certainement décroître et utiliser leurs technologies pour se reconvertir dans le recyclage ou le minage des déchets.

Ces éléments montrent qu'Ayres partage une préoccupation au moins aussi importante que celle de Georgescu-Roegen vis-à-vis de la dissipation de la matière. Les précisions techniques et les données empiriques qu'il apporte donnent à cette question une acuité particulière, là où les arguments très généraux de Georgescu-Roegen pouvaient laisser sceptique quant à l'ampleur du phénomène. Ayres (1997b, 160) reconnaît par ailleurs que les usages dissipatifs rendent le recyclage impossible en pratique, car « les métaux sont dispersés dans l'environnement à de très faibles concentrations, ce qui rend leur récupération ultérieure pour le recyclage impraticable dans la plupart des cas ». Dans l'ensemble, il est donc d'accord avec Georgescu-Roegen pour dire que la dissipation de la matière représente un enjeu crucial pour la soutenabilité de l'économie à long terme.

Cependant, Ayres (1999) s'oppose à l'idée que le recyclage intégral est impossible sur le plan théorique. Tout d'abord, il critique vivement l'idée qu'il puisse y avoir une quatrième loi de la thermodynamique qui rende compte de la dissipation irréversible de la matière. Il note en particulier qu'il « existe des contre-exemples évidents dans la nature : le carbone, l'oxygène et l'azote (ainsi que certains autres éléments) sont évidemment

à court terme : « A second generic technological strategy for closing the materials cycle is "waste mining" or WM. It comprises the use of mining and ore beneficiation technologies to utilization of waste streams from (currently) unreplaceable resources as alternative sources of other needed materials. [...] The WM strategy is potentially important, especially in the context of recovering light metals from coal ash. However, the technology is underdeveloped and the economics are not yet attractive. »

69. Ayres (1997b, 161) mentionne notamment l'exemple de l'essence au plomb et des plastiques contenant du cadmium : « There may be a need to ban certain uses of metals outright (as in the case of tetraethyl lead as a gasoline additive or cadmium as a stabilizer for PVC). »

recyclés par la biosphère, en utilisant l'énergie solaire » (474). Il en conclut que « la “quatrième loi” n'a pas de fondements en physique ». Par ailleurs, selon lui, l'insistance de Georgescu-Roegen sur cette quatrième loi a considérablement affecté sa crédibilité dans les milieux scientifiques⁷⁰.

Ayres critique également la forme plus faible de l'affirmation de Georgescu-Roegen, selon laquelle le recyclage intégral est impossible du fait de l'usure des biens d'équipement qui servent au processus de recyclage. S'il reconnaît que le processus de recyclage lui-même produit une forme de dissipation de la matière, Ayres considère qu'il n'y pas de raison *a priori* pour que cette dissipation soit supérieure à la quantité de matière recyclée⁷¹. Selon Ayres (1999, 475), la seule contrainte théorique liée à la dissipation de la matière est que « tous les matériaux sur Terre [...] ne peuvent être en “service actif” à un même moment, car le stock de déchets ne peut jamais être éliminé complètement ».

Au-delà de cette critique, une question demeure : la thermodynamique permet-elle de rendre compte de la dissipation de la matière ? Contrairement à Georgescu-Roegen, Ayres (1998) estime que la réponse à cette question est positive. La notion d'exergie permet selon lui de mesurer la matière en prenant en compte la qualité liée à son degré de pureté chimique. Il considère que « le contenu exergétique d'un minerai métallique, c'est-à-dire le travail requis pour séparer ce minerai de la croûte terrestre, correspond à la quantité de “basse entropie” naturelle stockée dans le minerai » (193). Par conséquent, « plus la qualité du minerai est élevée, plus son contenu exergétique est élevé ». Ce contenu exergétique est calculé à partir de l'énergie nécessaire à la formation du composé, ainsi que des facteurs associés à chacune de ses composantes⁷². Comme dans le cas des ressources énergétiques, cela permet d'étudier l'efficacité de différents processus. Ainsi, la notion d'exergie fournit un outil d'analyse global permettant de prendre en compte les flux de matière et d'énergie qui traversent le processus économique.

Pour conclure, les divergences concernant la place de la matière dans la conception thermodynamique de l'économie apparaissent marginales. Georgescu-Roegen et Ayres considèrent tous les deux que la dissipation de la matière représente un enjeu crucial à long terme pour le processus économique. Ayres critique l'idée de Georgescu-Roegen selon laquelle il y aurait une impossibilité théorique au recyclage intégral. Mais il reconnaît que pour bon nombre d'usages dissipatifs le recyclage est impossible en pratique. Par

70. Georgescu-Roegen a notamment cherché à prendre contact avec diverses sociétés savantes, telles que la Société Allemande de Physique, pour promouvoir son quatrième principe de la thermodynamique. Il aurait reçu une fin de non recevoir. Reiner Kümmel, communication personnelle.

71. Pour le démontrer, Ayres construit un modèle extrêmement simplifié du cycle de vie d'une ressource matérielle. La dissipation y est représentée par le passage d'une quantité de matière du statut de « masse active » à « masse inactive ». Le processus de recyclage permet quant à lui d'aller dans le sens inverse. Il est alors toujours possible de définir un état stationnaire du système, donné par des quantités constantes de masses active et inactive. Cet état stationnaire est déterminé par le taux de dissipation de la matière et l'efficacité du processus de recyclage.

72. Comme pour l'exergie d'une ressource énergétique, ce calcul nécessite de convenir au préalable d'un environnement de référence qui correspond au stade ultime de dissipation possible. En fait, trois environnements de référence sont définis pour trois milieux : l'atmosphère, les océans et la croûte terrestre. Chaque environnement de référence correspond à un mélange homogène contenant les éléments chimiques dans les mêmes proportions que le milieu auquel il est associé.

ailleurs, Georgescu-Roegen a le premier mis l'accent sur cette question, mais il est resté à un niveau très général. Ayres apporte des précisions techniques et des données empiriques qui permettent de mieux saisir la nature et l'ampleur du problème. En proposant d'utiliser l'exergie pour mesurer la matière, il montre que la thermodynamique est bien en mesure de fournir une compréhension globale des flux physiques sur lesquels reposent le processus économique.

1.2.3 Les limites physiques à la croissance

La discussion relative aux ressources énergétiques et matérielles qui précède se situe à un niveau essentiellement physique. Du point de vue économique, la question est de savoir dans quelle mesure ces ressources peuvent exercer une contrainte sur la production à long terme. Cette question invite à examiner la manière dont Georgescu-Roegen, Daly et Ayres se sont positionnés dans le débat sur les limites à la croissance, en se concentrant sur les aspects physiques⁷³. Dans les années 1970, ce débat cristallise les questions liées aux ressources naturelles et à l'environnement en économie. Il est déclenché par la publication du rapport du Club de Rome intitulé *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972). Fondé sur un modèle dynamique, celui-ci met en garde contre les risques d'effondrement économique et démographique liés à l'épuisement des ressources naturelles et à l'accumulation des pollutions. Il connaît un retentissement important dans les sphères publiques et académiques. Certains économistes, tels que Solow (1973), en contestent les conclusions et critiquent vivement les présupposés méthodologiques et théoriques du rapport. Les tenants de la conception thermodynamique de l'économie s'avèrent au contraire beaucoup plus en phase avec le rapport Meadows et la remise en cause de la croissance économique comme objectif premier des politiques économiques. Cette section analyse leur contribution à ce débat, et ses prolongements à travers la question du développement soutenable.

L'état stationnaire

Daly (1974) est certainement celui qui s'est impliqué le plus directement et avec le plus d'intensité dans le débat sur les limites à la croissance des années 1970. Il critique ce qu'il qualifie de « manie de la croissance » et propose la notion d'« état stationnaire » en guise d'objectif alternatif. Cette position s'inscrit explicitement dans la continuité des discussions sur l'état stationnaire présentes dans la pensée économique classique. Alors que chez David Ricardo l'état stationnaire est perçu comme une conséquence négative du rendement marginal décroissant des terres agricoles, John Stuart Mill donne une signification positive à ce concept. Il y voit l'opportunité d'une société moins préoccupée par l'accroissement des richesses matérielles et davantage par son développement intellectuel et spirituel. Pour Mill, « il s'agirait, dans l'ensemble, d'une amélioration considérable par rapport à notre condition présente » (Mill, 1848, cité par Daly, 1977a, 14). De la même

73. Le débat sur les limites à la croissance a également suscité des réflexions sur la pertinence sociale de la croissance. Daly (1974, 1987) insiste par exemple sur l'idée que, passé un certain niveau de revenu, la croissance n'apporte pas davantage de bien-être et contribue au contraire à l'érosion des liens sociaux.

manière, Daly conçoit l'état stationnaire comme un état à la fois nécessaire sur le plan physique, et souhaitable sur le plan social.

Plus précisément, Daly (1974, 15) définit l'état stationnaire par « des stocks constants de richesses physiques (artefacts) et une population constante, chacun maintenu à un niveau choisi et souhaitable par un faible flux physique ». Cette définition s'insère clairement dans une approche thermodynamique où « les flux physiques, considérés comme le coût de maintenance des stocks, commencent par l'extraction (épuiement) des ressources de basse entropie à l'entrée du processus et s'achèvent avec une quantité égale de déchets de haute entropie (pollution) à la sortie ». Par ailleurs, les « les services fournis par les stocks d'artefacts (et de personnes) constituent le bénéfice ultime de l'activité économique, et le flux physique représente le coût ultime ». On retrouve donc ici la conception des revenus et des coûts déjà mentionnée dans la critique de Daly à l'encontre de la mesure traditionnelle du revenu (cf. sous-section 1.1.2).

Cette approche repose fondamentalement sur les trois catégories que sont les flux physiques, les stocks d'artefacts et de population, et les services. Si les stocks sont par définition constants dans l'état stationnaire, Daly n'exclut pas que les flux physiques diminuent ou que les services augmentent, du fait de variations dans l'efficacité du processus. D'une part, le rapport entre flux et stock peut diminuer si l'efficacité de maintenance s'améliore. D'autre part, le rapport entre service et stock peut augmenter si l'efficacité de service s'améliore. Cependant, Daly se montre relativement pessimiste quant aux possibilités effectives d'améliorer ainsi l'efficacité du système. Concernant le versant des flux physiques, il considère que « les lois de la thermodynamique fournissent une limite théorique à l'amélioration de l'efficacité de maintenance » (1974, 15). Il suggère par ailleurs qu'il pourrait même y avoir une diminution de l'efficacité de maintenance du fait de l'exploitation progressive de ressources de moins bonne qualité. En ce qui concerne les services, Daly considère que l'existence d'une « limite théorique à l'augmentation de l'efficacité des services [...] est moins claire, mais probable » (15-16). De ce fait, l'état stationnaire n'exclut pas que les services fournis continuent de croître. Mais, selon Daly, cette croissance n'a rien à voir avec la croissance habituellement mesurée à l'aide du PIB, qui s'apparenterait davantage à une mesure des flux physiques. D'après ce qui précède, ni l'une ni l'autre de ces formes de croissance ne sont donc complètement incompatibles avec l'état stationnaire de Daly. La seule croissance qui est réellement exclue de l'état stationnaire, par définition, est celle des stocks d'artefacts et de population.

Selon Daly, l'état stationnaire est « nécessaire » pour respecter les contraintes physiques qui s'exercent sur le processus économique. Plus précisément, il considère que l'économie « ne peut pas dépasser les frontières du système [terrestre] global et, pour ne pas perturber le fonctionnement de ce dernier, elle doit atteindre un état stationnaire à un niveau bien antérieur » (1974, 17). Cette remarque concerne principalement les perturbations de l'environnement qu'engendre le processus économique, et donc les enjeux de pollution au sens large. Daly reste cependant très général, et ne donne pas de précisions sur la nature des perturbations en question. Il mentionne également la contrainte liée à l'épuisement des ressources naturelles comme conséquence de la loi de l'entropie. Il affirme ainsi qu'il « n'existe pas de substitut à la basse entropie elle-même, et [que] la

basse entropie est rare, tant dans sa forme terrestre (stocks finis de combustibles fossiles concentrés et de minéraux) que dans sa forme solaire (un flux fixe d'énergie solaire) ». Cet argument porte donc sur les flux physiques qui traversent le processus économique : les flux cumulés de ressources terrestres doivent être finis, et le flux d'énergie solaire ne peut pas dépasser un certain niveau. Or, l'état stationnaire est défini par des stocks d'artefacts et de population constants. Pour faire le lien entre flux physiques et stock, il faut donc faire des hypothèses sur les variations futures de l'efficacité de maintenance. Mais comme on l'a vu plus haut, celles-ci sont difficilement prévisibles et peuvent aller dans un sens ou dans l'autre. Le caractère « nécessaire » attribué à l'état stationnaire ne relève donc pas de la stricte logique, comme Daly semble le reconnaître lui-même :

Thus a steady-state economy, as here defined, does not imply constant throughput, much less static technology, nor does it imply eternal life for the economic system. It is simply a strategy for good stewardship, for maintaining our spaceship and permitting it to die of old age rather than from the cancer of growthmania. (Daly, 1974, 16)

La critique de l'état stationnaire formulée par Georgescu-Roegen (1975) tient en partie à cette difficulté logique. Il affirme ainsi que « l'erreur cruciale consiste à ne pas voir que non seulement la croissance, mais aussi un état de croissance zéro, voire un état en déclin qui ne converge pas vers l'annihilation, ne peut exister éternellement dans un environnement fini » (367). Comme dans la sous-section 1.2.1, cet argument repose sur l'hypothèse d'un stock fini de ressources terrestres. En supposant qu'une quantité minimale de ressources soit nécessaire pour produire une unité de service économique, il est clair qu'une quantité constante de services implique logiquement que le stock de ressources sera épuisé en un temps fini. Par conséquent, pour Georgescu-Roegen, « les partisans du salut par l'état stationnaire doivent admettre qu'un tel état ne peut avoir qu'une durée finie ».

Par la suite, Georgescu-Roegen (1977a) précise sa critique en partant du fait que la Terre est un système clos du point de vue thermodynamique, c'est-à-dire qu'elle échange de l'énergie, mais pas de matière avec le reste de l'univers. Contrairement au cas des systèmes ouverts, cette situation n'a selon lui pas été suffisamment étudiée en thermodynamique⁷⁴. En particulier, l'analyse traditionnelle des systèmes clos omet le fait que, « comme aucune conversion d'énergie n'est réalisée sans support matériel, le frottement dissipe non seulement l'énergie, mais également la matière » (268). C'est donc la préoccupation de Georgescu-Roegen pour la dissipation de la matière qui constitue le fondement de sa critique de l'état stationnaire. L'épuisement du stock fini de matière terrestre de basse entropie rend selon lui impossible le maintien d'un état stationnaire dans le long terme.

La réponse de Daly (1977a) insiste sur le fait que la légitimité de l'état stationnaire ne se situe pas sur le plan de la stricte logique. Il reconnaît que l'état stationnaire n'est pas

⁷⁴. En ce qui concerne les systèmes ouverts, Georgescu-Roegen (1977a, 268) mentionne notamment les travaux d'Onsager et de Prigogine. Mais ceux-ci ne peuvent selon lui être pris comme référence pour penser une solution aux problèmes écologiques, car ils reposent sur l'hypothèse que le système ouvert à un accès constant aux flux de matière et d'énergie.

« un moyen d'atteindre le “salut écologique” et la vie éternelle pour l'espèce humaine » (770). Mais, selon lui, l'état stationnaire est la meilleure « stratégie pour ralentir le rythme auquel nous sommes en train de tout détruire ». Ce débat illustre donc la difficulté à saisir la nature des contraintes physiques qui s'exercent sur le processus économique. D'un côté, Daly cherche à faire de l'état stationnaire une « nécessité », mais *in fine* il se trouve contraint de reconnaître qu'il ne garantit pas davantage la reproduction du système à très long terme. De l'autre, la critique de Georgescu-Roegen repose principalement sur l'idée d'une dissipation irréversible de la matière et l'impossibilité du recyclage intégral. Or, on a vu plus haut que cette thèse n'a pas de fondements théoriques, bien qu'elle souligne un problème important en pratique. Dès lors, il est impossible d'en tenir compte dans un argument qui se situerait sur le plan de la stricte logique, comme tente de le faire Georgescu-Roegen.

Progrès technique et développement soutenable

L'une des difficultés sous-jacentes à la question des limites physiques à la croissance est qu'elle touche à la notion de « progrès technique ». C'est cette notion qui permet de faire le lien entre les flux de matière et d'énergie, d'une part, et les stocks de capital et les flux de services, d'autre part. De manière plus ou moins explicite, Daly et Georgescu-Roegen supposent que le progrès technique est limité et ne permet pas de contrecarrer l'épuisement des ressources. Cette position s'inscrit notamment en contradiction avec l'hypothèse d'un progrès technique exponentiel, telle qu'on la trouve par exemple dans la théorie néoclassique de la croissance. Mais au-delà, c'est une conception complètement différente du changement technique qui imprègne la conception thermodynamique de l'économie. Dans la perspective évolutionnaire de Georgescu-Roegen, le progrès technique correspond à un changement qualitatif imprévisible (cf. sous-section 1.1). Il n'y a donc pas de sens à prolonger de manière linéaire les tendances observées par le passé. Cette approche limite considérablement toute possibilité de prédire l'évolution future du processus économique :

Undoubtedly, the current growth must cease, nay, be reversed. But anyone who believes that he can draw a blueprint for the ecological salvation of the human species does not understand the nature of evolution, or even of history—which is that of a permanent struggle in continuously novel forms, not that of a predictable, controllable physico-chemical process, such as boiling an egg or launching a rocket to the moon. (Georgescu-Roegen, 1975, 369)

Cette perspective réduit donc la portée de toute prospective de très long terme, y compris celle de Georgescu-Roegen lui-même. C'est la raison pour laquelle, selon Missemer (2017b), il convient de nuancer l'association entre Georgescu-Roegen et l'idée de décroissance. Il note en particulier que, dans la citation qui précède, c'est la « croissance actuelle » qui devrait être inversée, c'est-à-dire une croissance fondée sur des ressources et des techniques déterminées. Mais cela ne dit rien de ce qu'il adviendrait en cas de changement qualitatif. Par conséquent, la conception du futur chez Georgescu-Roegen ne peut se résumer à la notion de décroissance. Missemer suggère plutôt qu'elle cor-

respond à une perspective d'« croissance », c'est-à-dire « un simple désintérêt vis-à-vis de la croissance, et une focalisation sur des mesures pratiques relatives aux contraintes écologiques » (503).

Cette interprétation peut paraître difficile à défendre dans un contexte francophone, où un recueil d'articles de Georgescu-Roegen a été publié sous le titre « Demain la décroissance » (1979b). Missemer (2017b, 499) note cependant que c'est l'éditeur de l'ouvrage, Jacques Grinevald, « qui a choisi le mot “décroissance” comme titre pour le livre de Georgescu-Roegen en 1979 ». À l'inverse, il souligne que Georgescu-Roegen n'utilise jamais le terme « *degrowth* » en anglais, mais uniquement des formes plus ambiguës, telles que « *decline* ». Par conséquent, le terme de décroissance apparaît très lié aux spécificités du contexte francophone, et donne une image déformée de la perspective de Georgescu-Roegen. Une lettre adressée par ce dernier à Paul Samuelson en 1992 suggère cependant une raison l'ayant poussé à accepter ce terme comme titre de son ouvrage. Dans cette lettre, il déclare qu'il a « saisi l'opportunité qui [lui] a été donnée de révéler à quel point [il était] un prophète de malheur dans le petit volume au titre scandaleux, Demain la décroissance » (Georgescu-Roegen, archives, box 25, dossier : Samuelson, Paul, 1953-1989). Ce choix prend donc ici une dimension provocatrice, ce qui tend à renforcer l'idée qu'il ne faut pas le prendre au pied de la lettre sur le plan théorique⁷⁵.

La conception évolutionnaire du processus économique se retrouve par ailleurs dans les travaux de Daly (1987, 323). Ce dernier reprend la distinction entre croissance et développement proposée par Georgescu-Roegen, selon laquelle « la croissance est une augmentation quantitative des dimensions physiques ; le développement est une amélioration qualitative des caractéristiques non physiques »⁷⁶. Il précise ainsi que sa critique porte sur cette définition spécifique de la croissance et n'écarte pas la possibilité du développement. Cette distinction sert par la suite de support à sa discussion critique de la notion de « développement soutenable », introduite par le rapport *Our Common Future* de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Brundtland, 1987). Cette notion est définie par le fait de satisfaire « les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins » (6)⁷⁷. Daly (1990)

75. Cela peut paraître contradictoire avec la thèse développée par Levallois (2010), selon laquelle les désaccords entre Georgescu-Roegen et le Club de Rome provenaient de son attachement à la décroissance. Cependant, les deux analyses ne se situent pas sur le même niveau. Levallois utilise la notion de décroissance pour souligner que Georgescu-Roegen avait une vision plus radicale que le Club de Rome en ce qui concerne les changements nécessaires pour faire face aux problèmes écologiques. Ici, on s'intéresse à une caractérisation théorique de l'approche de Georgescu-Roegen, qui n'est pas réductible à la notion de décroissance. Par ailleurs, Lozada lui-même montre que Georgescu-Roegen est très critique de la focalisation du Club de Rome sur les simulations informatiques. Sa critique repose sur le fait que les simulations informatiques sont incapables de prendre en compte les changements qualitatifs qui affectent le processus économique dans le long terme.

76. Georgescu-Roegen lui-même reprend cette distinction à Schumpeter. Ce dernier l'illustre en notant « que l'on peut ajouter les unes aux autres autant de carrioles qu'on le souhaite, cela ne fera jamais un train » (Schumpeter, 1934, cité dans Georgescu-Roegen, 1976a, 243). En France, cette distinction a été popularisée par François Perroux, également inspiré par Schumpeter, et proche de Georgescu-Roegen.

77. Cette définition du développement soutenable est la plus influente, mais elle n'est pas la première. Par exemple, l'Union internationale pour la conservation de la nature avait déjà utilisé cette notion dans son rapport intitulé *World Conservation Strategy* (Allen, 1980).

reconnaît au rapport Brundtland le mérite d'avoir introduit la notion de développement soutenable dans les institutions internationales. Néanmoins, il lui reproche d'avoir adopté une position qui s'apparente davantage à celle d'une « croissance soutenable ». Reprenant la distinction entre une croissance quantitative et un développement qualitatif, il considère au contraire que l'idée de croissance soutenable est un oxymore :

Since the human economy is a subsystem of a finite global ecosystem which does not grow, even though it does develop, it is clear that growth of the economy cannot be sustainable over long periods of time. The term sustainable growth should be rejected as a bad oxymoron. The term sustainable development is much more apt. (Daly, 1990, 1)

Par-delà ce problème conceptuel, Daly estime que le rapport Brundtland ne donne pas réellement de grands principes permettant de poursuivre l'objectif de développement soutenable. Il propose donc de le compléter sur ce plan. Concernant l'utilisation des ressources renouvelables, il considère que « les taux de récolte devraient être égaux aux taux de régénération », et que « les taux d'émission de déchets devraient être égaux aux capacités d'assimilation naturelles des écosystèmes » (1990, 2). Pour les ressources non renouvelables, Daly propose de « limiter leur taux d'épuisement au taux de création de substituts renouvelables » (4). Il suggère également que le progrès technique devrait viser premièrement à réduire la consommation de ressources. Mais dans l'ensemble, il se montre sceptique quant aux possibilités de substitution entre ce qu'il nomme le « capital naturel » et le « capital artificiel ». Cette perspective dite de « soutenabilité forte » est largement partagée au sein de l'économie écologique. Elle s'oppose à la « soutenabilité faible » défendue dans la cadre de la théorie économique standard (Vivien, 2007). Selon cette dernière, le capital artificiel peut au contraire se substituer au capital naturel. La soutenabilité doit donc viser à ce que la somme des deux types de capitaux ne diminue pas, ce qui n'interdit pas que le capital naturel se détériore.

Si ces deux pôles fournissent une grille de lecture intéressante, ils se situent à un niveau très général qui ne permet pas d'appréhender des positions plus nuancées. C'est le cas notamment de celle adoptée par Ayres. Réagissant à une déclaration publiée par un large panel d'économistes et de scientifiques renommés à destination des décideurs politiques (Arrow *et al.*, 1995), Ayres considère que les auteurs ont adopté une position trop modérée quant à l'ampleur des risques environnementaux et des changements nécessaires. Il insiste notamment sur le fait que « la proposition générale selon laquelle la croissance économique est bonne pour l'environnement est une absurdité fautive et pernicieuse » (1995, 97). Il faut au contraire tenir compte selon lui de la nature de la croissance en question. Si la croissance actuelle fondée sur les énergies fossiles est insoutenable du fait de l'épuisement des ressources et des pollutions qu'elle engendre, selon lui, il ne s'agit pas d'une fatalité. Pour cette même raison, il est également réticent à endosser une critique trop générale du développement soutenable :

Many environmentalist and some “ecological” economists have argued [...] that “sustainable development” is an oxymoron. I have disagreed with this conclusion in the past based on the proposition that economic welfare is based

on services, not goods, and that in principle the service-content of goods could be increased more or less without limit. (Ayres, 1995, 98)

Ayres vise implicitement la critique de Daly à l'encontre du rapport Brundtland. Pourtant, leurs positions ne s'avèrent pas fondamentalement contradictoires. Comme Daly, Ayres considère qu'une croissance quantitative qui augmenterait les flux de matière et d'énergie n'est pas soutenable. Dès lors, la production de biens et services doit connaître une transformation qualitative profonde permettant au contraire de réduire autant que possible les flux physiques associés. En ce sens, la distinction qu'opère Ayres (1996, 118) entre « croissance » et « progrès » apparaît très proche de celle faite par Daly entre croissance et développement. Leur désaccord porte donc principalement sur la mesure dans laquelle l'efficacité globale du processus économique peut ainsi être améliorée. Alors que Daly considère qu'il existe une limite, Ayres se montre plus optimiste. À nouveau, la question du progrès technique et de ses potentialités se trouve au cœur du problème. Sa nature qualitative et imprévisible rend difficile toute prise de position générale sur les limites physiques à la croissance.

Il est également important de noter que pour Ayres (1993, 201) les limites à la croissance les plus importantes concernent « la dégradation de la capacité d'assimilation des déchets de la biosphère et l'interférence avec sa capacité à stabiliser le climat et à recycler les nutriments essentiels ». Plutôt que l'épuisement des ressources naturelles, ce sont donc les rejets dans l'environnement qui attirent en priorité son attention⁷⁸. Il conçoit l'environnement terrestre comme un système complexe de processus physiques, « maintenu dans un état stationnaire, loin de l'équilibre chimique ou thermodynamique, par un apport constant d'énergie externe provenant du Soleil » (202)⁷⁹. S'il existe des mécanismes de stabilisation permettant à ce système de compenser certaines perturbations, ces mécanismes sont encore mal connus selon Ayres. De ce fait, des perturbations de grande ampleur pourraient modifier de manière irréversible l'environnement et le rendre inhabitable :

Because we do not know the stabilizing mechanisms for the climate or the various cycles in detail, we cannot know how big a perturbation it would take to move to another quasi-stable state, or even to begin an irreversible slide toward the true equilibrium state which would not sustain life. (Ayres, 1993, 205)

Selon Ayres, le problème le plus urgent est donc différent de ceux envisagés par Daly et Georgescu-Roegen, qui se concentrent davantage sur l'épuisement des ressources naturelles. Pour autant, la solution est similaire et consiste à réduire les flux physiques,

78. Ayres ne remet pas pour autant en cause le fait qu'il existe une forme d'épuisement des ressources naturelles. Au contraire, il affirme que « malgré les débats sur l'ampleur des réserves, il ne fait aucun doute que les ressources naturelles de grande qualité sont en train d'être dissipées » (1993, 199). Mais, selon lui, à moyen terme, la principale conséquence est que les prix de ces ressources devraient croître et ainsi fragiliser la structure actuelle de l'économie, fondée notamment sur la consommation abondante d'énergies fossiles.

79. Les cycles de différents éléments chimiques, tels que le carbone, l'oxygène et l'azote jouent un rôle particulièrement important pour maintenir certaines propriétés de l'environnement terrestre (température, acidité, etc.).

responsables à la fois de l'épuisement des ressources et de la déstabilisation de l'environnement terrestre. Ainsi, pour Ayres (1993, 205), « la seule solution prudente consiste à réduire les interférences anthropiques avec les processus naturels », ce qui passe par le fait « de mettre un terme aux activités les plus susceptibles d'interférer avec les processus climatiques et les cycles des nutriments ». Le principal obstacle sur cette voie provient du fait que la structure actuelle de l'économie conduit les acteurs à augmenter la productivité du travail, plutôt que de réduire l'intensité en ressources naturelles de la production. Inverser cette logique nécessite des politiques économiques ciblées, qui auraient « le double bénéfice de réduire la consommation de matière et d'énergie [...] et d'encourager des activités plus intensive en main-d'œuvre » (1995, 98). Cet objectif peut notamment être poursuivi à l'aide de politiques fiscales qui rendraient le coût des matières premières plus cher relativement à celui du travail. Il pourrait par exemple s'agir d'un impôt supplémentaire prélevé sur la production de matériaux issus de l'extraction. Cela inciterait à réduire les déchets et à augmenter le niveau de recyclage, ce qui nécessite des activités très intensives en main-d'œuvre.

En conclusion, la question des limites physiques à la croissance ne révèle pas de divergences majeures au sein de la conception thermodynamique du processus économique. La principale différence porte sur la contrainte jugée la plus importante. Daly et Georgescu-Roegen mettent l'accent sur l'épuisement des ressources naturelles comme conséquence de la loi de l'entropie en amont du processus économique. Ayres quant à lui est davantage préoccupé par les perturbations de l'environnement terrestre engendrées par les rejets en aval, et en particulier par la déstabilisation du climat. Dans ce second cas, la thermodynamique s'avère moins à même d'appréhender le problème dans sa globalité. Le système terrestre est constitué d'un ensemble complexe de processus dont les capacités d'adaptation sont difficiles à évaluer précisément. La compréhension des phénomènes à l'œuvre nécessite d'aller au-delà de la thermodynamique et de mobiliser bien d'autres disciplines scientifiques. On touche donc là aux limites épistémologiques de ce que l'approche thermodynamique permet de dire concernant les relations entre l'économie et l'environnement.

Que le problème se situe en amont ou en aval du processus économique, la solution proposée est cependant similaire. Elle consiste pour l'essentiel à réduire les flux physiques sur lesquels reposent actuellement l'économie. À cet égard, les auteurs partagent une même conception évolutionnaire fondée sur la distinction entre une croissance purement quantitative et un développement reposant sur des changements qualitatifs. C'est en ce sens qu'il faut comprendre leur critique de la croissance, et l'accent mis sur la nécessité de transformer en profondeur le processus économique. Concernant l'énergie, les auteurs s'accordent sur le fait de privilégier la substitution du flux solaire aux énergies fossiles, tout en soulignant que cela nécessite de dépasser certains obstacles techniques. En ce qui concerne les flux de matière, le désaccord théorique concernant la possibilité d'un recyclage intégral ne doit pas masquer une préoccupation pratique commune. Il en découle en particulier que les usages dissipatifs doivent être réduits au maximum pour limiter l'épuisement des ressources associées ainsi que les pollutions engendrées par leur extraction.

1.3 Conclusion

Bien qu'ils ne forment pas à proprement parler une communauté scientifique, Georgescu-Roegen, Daly et Ayres partagent les éléments essentiels d'une vision du monde commune. Leur conception thermodynamique de l'économie relève d'une ontologie hiérarchique, anti-réductionniste et évolutionnaire. La dimension économique y est encastrée dans la dimension biologique, et toutes deux sont encastrées dans la dimension physique. Cette dernière constitue en dernier ressort le substrat sur lequel les deux autres peuvent se développer. Pour autant, les phénomènes économiques et biologiques disposent également de propriétés qui leur sont propres et ne sauraient être réduites à une détermination physique. Les rapports transversaux entre les différentes dimensions de la réalité sont donc le produit de dispositifs spécifiques. Ils peuvent évoluer sous l'influence de transformations qualitatives qui affectent à la fois les finalités poursuivies et les moyens techniques disponibles pour cela.

Dans ce cadre, la thermodynamique est une ressource épistémologique centrale. Elle fournit une grille de lecture conceptuelle permettant d'appréhender de manière systémique la dimension physique du processus économique. Elle met l'accent sur la dégradation qualitative des flux de matière et d'énergie comme source de la rareté et de l'épuisement des ressources naturelles. À un second niveau, la thermodynamique permet de mesurer les ressources naturelles selon une échelle qui prend en compte leur qualité, à l'aide du concept d'exergie. Cette démarche ouvre la voie à des mesures de la performance fondées sur des indicateurs physiques, complémentaires des instruments habituels d'évaluation utilisés en économie. L'interdisciplinarité est donc créatrice d'outils de mesure qui permettent d'opérationnaliser la vision du monde portée par la conception thermodynamique de l'économie. Pour autant, la thermodynamique ne fournit pas une grille de lecture exhaustive des rapports entre l'économie et son environnement. En particulier, elle s'avère limitée dès lors qu'il s'agit d'appréhender les processus complexes à l'œuvre dans le système terrestre, tels que ceux liés au climat.

La principale difficulté méthodologique rencontrée par cette vision du monde ne se situe pas dans un domaine ou dans l'autre, mais bien à l'intersection des dimensions physique et économique de la réalité. Pour rendre compte de cette dualité fondamentale, la conception thermodynamique de l'économie poursuit l'objectif d'une interdisciplinarité forte, fondée sur une intégration conceptuelle étroite. Les frontières disciplinaires apparaissent alors comme des obstacles institutionnels et cognitifs qu'il convient de dépasser pour parvenir à une compréhension approfondie des interactions entre l'économie et son environnement. La conception thermodynamique de l'économie interroge ainsi la compatibilité entre des corpus de savoirs qui se sont construits jusque-là de manière autonome. Que faut-il conserver des concepts, des méthodes et des outils existants de l'analyse économique ? Comment les transformer pour les rendre plus cohérents avec les enseignements de la thermodynamique ? Notons que ces questions ne doivent pas être interprétées dans un sens purement *formel*, qui viserait à reconstruire la théorie économique en imitant la structure de la thermodynamique. C'est au contraire dans un sens très *substantiel* que la thermodynamique et l'économie partagent une réalité commune dans cette perspective.

Dit autrement, le fondement de cette démarche est proprement ontologique.

Ces questions sont bien illustrées par la discussion sur les limites à la croissance. Celle-ci est inséparable d'une redéfinition du concept même de croissance. Les critiques formulées par Georgescu-Roegen, Daly et Ayres s'adressent à une croissance purement quantitative qui laisserait inchangée les moyens de production. À l'inverse, tous les trois ne voient d'issue aux problèmes écologiques que dans une transformation qualitative des moyens de production, ce qu'ils désignent à l'aide du concept de développement. Cette perspective est antagonique avec la conception traditionnelle du progrès technique dans la théorie de la croissance standard. Elle traduit une certaine incommensurabilité entre une vision agrégée et linéaire du progrès technique, et une conception structurelle, centrée sur l'analyse de systèmes techniques spécifiques. Dans cette dernière, les changements qualitatifs sont par nature imprévisibles et multiples. Il n'est donc pas possible de définir *a priori* une trajectoire précise à suivre, mais seulement de concevoir une direction générale. Dans la conception thermodynamique de l'économie, cette direction est donnée par la réduction maximale des flux physiques terrestres. Elle passe notamment par le recours à l'énergie solaire, la suppression des usages dissipatifs de la matière et le recyclage.

Dans les chapitres suivants, ces caractéristiques ontologiques, épistémologiques et méthodologiques serviront de base pour analyser la manière dont la conception thermodynamique de l'économie s'incarne dans différentes théories de la production. Pour cela, il sera nécessaire d'introduire également des considérations méthodologiques relatives à l'utilisation des modèles mathématiques. L'enjeu sera de comprendre comment, à partir d'une vision du monde commune, différentes représentations analytiques peuvent émerger du fait de conceptions différentes de la modélisation. Il s'agira également de savoir en quoi ces représentations divergentes affectent en retour la manière d'appréhender les relations entre l'économie et son environnement physique.

Chapitre 2

La controverse

Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz

Until the laws of thermodynamics are repealed, I shall continue to relate outputs to inputs—i.e., to believe in production functions.

—Paul A. Samuelson (1966b)

LE débat sur la place des ressources naturelles dans la théorie économique est devenu particulièrement central au début des années 1970⁸⁰. L'intérêt sans précédent des milieux académiques pour les enjeux écologiques est influencé par la montée en puissance des préoccupations environnementales dans la société en générale (Vieille Blanchard, 2011). Mais l'événement qui suscite le plus de réactions des économistes est la publication du rapport *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972) par le Club de Rome. Ce rapport suggère qu'une croissance économique continue pourrait entraîner un effondrement écologique dû à l'épuisement des ressources et à l'accumulation de pollutions. Les économistes de la croissance, tels que Robert Solow (1973, 1974a,b) et Joseph Stiglitz (1974c, 1979), critiquent vivement le rapport sur les plans méthodologique et théorique. Parallèlement, ils proposent leurs propres approches basées sur la théorie de la croissance néoclassique initiée par Solow (1956). Parmi les hypothèses importantes, leurs modèles intègrent l'idée que la productivité des ressources peut augmenter indéfiniment grâce à la substitution du capital aux ressources et au progrès technique. Les contributions de Solow et Stiglitz jettent ainsi les bases d'une nouvelle branche de la théorie de la croissance, que j'appellerai ici « théorie néoclassique des ressources »⁸¹.

Or, cette époque coïncide également avec l'émergence de la conception thermodynamique de l'économie, à travers notamment l'ouvrage de Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Ce dernier prend position dans le débat sur les limites à la croissance. Il propose notamment son appui à l'équipe Meadows pour répondre aux critiques des économistes néoclassiques (1975). Pendant un temps, il est même admis parmi les membres du Club de Rome, avant de prendre ses distances du fait de désaccords méthodologiques et politiques (Levallois, 2010). Il développe ensuite sa critique de la théorie néoclassique des ressources lors d'une conférence organisée par Resources for the Future (RFF) en 1976 (1979a). Bien qu'elle concerne également d'autres aspects, sa critique vise en premier lieu l'hypothèse de productivité illimitée des ressources. Pour y répondre, il avance une hypothèse rivale, selon laquelle les principes de la thermodynamique imposent une limite à la productivité des ressources.

Cette critique est reprise par Daly près de vingt ans plus tard dans un article intitulé « Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz » (1997a). Cet article fait partie d'un numéro spécial de la revue *Ecological Economics* consacré à Georgescu-Roegen, suite à son décès en 1994. Ce numéro spécial montre l'influence importante de Georgescu-Roegen en économie écologique. Alors que la critique de Georgescu-Roegen n'avait pas

80. Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans *The European Journal of the History of Economic Thought* intitulée « Natural Resources in the Theory of Production: The Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Controversy » (Couix, 2019).

81. Bien que le premier choc pétrolier date également de cette époque, il n'est pas mentionné comme un élément déclencheur de l'intérêt pour les ressources naturelles dans cette partie de la littérature.

reçu de réponse explicite jusque-là, l'article de Daly suscite des répliques de la part de Solow (1997) et Stiglitz (1997) pour défendre l'hypothèse de productivité illimitée des ressources. D'autres économistes écologiques et néoclassiques, tels qu'Ayres (1997a) et Pearce (1997), prennent également part au débat. Ce débat constitue ainsi l'une des rares confrontations directes entre les deux approches. Cette situation souligne l'importance des enjeux sous-jacents, et invite à examiner cette controverse en détail pour mieux en saisir les enjeux méthodologiques.

Malgré cette importance, la controverse en question n'a pas fait l'objet d'une attention poussée jusqu'à présent. Les travaux de Solow et Stiglitz sur les ressources naturelles ont reçu peu d'intérêt dans la littérature sur l'histoire de la théorie néoclassique de la croissance. Dans le numéro spécial consacré à ce sujet dans *History of Political Economy*, seul Erreygers (2009) s'intéresse réellement au modèle avec ressources épuisables de Solow. Plus précisément, il se concentre sur l'influence de John Rawls et Harold Hotelling sur Solow, et donc davantage sur la question de la norme de distribution intergénérationnelle que sur la représentation de la production. Pottier (2014, chap. 2) est l'un des seuls à fournir un examen critique des premiers travaux de la théorie néoclassique des ressources. Il souligne le rôle central de l'hypothèse de productivité illimitée des ressources, et la nature essentiellement formelle de sa justification. Il présente également la critique formulée par Georgescu-Roegen et Daly autour de la notion de limite thermodynamique. En ce sens, ma contribution vise essentiellement à examiner plus en détail cette controverse. Ce degré de précision supplémentaire me semble utile pour approfondir l'analyse des enjeux méthodologiques sous-jacents. Cette démarche confirme dans une large mesure le caractère formel de l'approche néoclassique, et la difficulté à relier l'hypothèse de productivité illimitée des ressources à une réalité technique précisément identifiée. Mais elle montre également que l'argument de la limite thermodynamique n'est pas exempt de difficultés semblables.

Ce chapitre retrace donc le fil conducteur qui mène des premières contributions de Solow et Stiglitz, et leur critique par Georgescu-Roegen, au débat de 1997. Plus précisément, il se concentre sur les aspects liés à la représentation formelle de la production dans ce cadre, à travers la fonction de production agrégée avec ressources. Pour saisir les enjeux sous-jacents à cette controverse, je m'appuie sur les deux angles d'analyse présentés dans l'introduction générale. Les questions liées à la modélisation sont abordées à travers, d'une part, le registre de la représentation dans la construction des modèles, et, d'autre part, le registre des manipulations dans l'utilisation des modèles. La relation entre les dimensions physique et économique de la production est quant à elle analysée au prisme de l'interdisciplinarité entre la thermodynamique et l'économie. Dans ce cadre, je conclus qu'aucun des deux camps n'a été réellement en mesure de démontrer la validité de son hypothèse, car ils sont tous deux confrontés à des difficultés conceptuelles importantes. D'une part, dans la théorie néoclassique des ressources, le formalisme de la fonction de production agrégée ne permet pas de saisir convenablement les réalités techniques sous-jacentes au processus de production et d'articuler ses dimensions physique et économique. D'autre part, dans la conception thermodynamique de l'économie, le manque d'intégration conceptuelle entre les disciplines empêche d'appréhender la nature

exacte des limites qu'impose la thermodynamique au processus de production.

Ces différentes facettes de la controverse sont abordées dans trois sections. La section 2.1 montre comment l'hypothèse de productivité illimitée des ressources a été intégrée dans les modèles de Solow et Stiglitz, sous la forme du progrès technique et de la substitution entre capital et ressources. La section 2.2 présente la critique de Georgescu-Roegen envers la théorie néoclassique des ressources, en se concentrant sur l'hypothèse de limite thermodynamique. Enfin, la section 2.3 examine le débat de 1997 et la manière dont il prolonge et approfondi les questions méthodologiques sous-jacentes.

2.1 Solow, Stiglitz et les origines de la théorie néoclassique des ressources

2.1.1 Fonctions de production et théorie de la croissance avant les années 1970

Avant de s'intéresser à l'émergence de la théorie néoclassique des ressources dans les années 1970, il est utile de rappeler l'évolution de la théorie néoclassique de la croissance. L'attention est portée en particulier sur la fonction de production agrégée, qui constitue l'un des objets centraux de ce chapitre et du suivant. Bien que l'on puisse trouver des antécédents, l'origine de la fonction de production néoclassique est généralement attribuée à Philip Wicksteed (1894)⁸². Ce dernier s'intéresse à la théorie de la rémunération des facteurs à leur productivité marginale, initialement suggérée par Clark (1889). Cette règle de répartition est elle-même censée découler du comportement maximisateur des producteurs. Wicksteed cherche les conditions qui permettent d'assurer que le produit est bien épuisé par ce critère de rémunération. Il montre que cette propriété est vérifiée lorsque les rendements sont constants⁸³. Cette analyse se situe cependant principalement au niveau microéconomique et vise à représenter les choix des producteurs individuels. Elle n'est donc pas directement concernée par ce chapitre et par la thèse en général.

C'est avec les travaux de Cobb et Douglas (1928) que la fonction de production agrégée apparaît réellement. En effet, ils mettent explicitement en correspondance le modèle formel de la fonction de production avec des indices agrégés de la production, du capital et du travail. Leur ambition est alors principalement empirique. Cobb et Douglas cherchent à identifier une relation structurelle entre ces différentes variables agrégées au cours du temps. C'est dans ce cadre qu'ils proposent la forme fonctionnelle qui porte

82. Humphrey (1997) identifie des formulations littéraires qui s'apparentent à des fonctions de production chez les physiocrates et les classiques. Il suggère que la première expression formelle est due à Johann Heinrich von Thünen au début du 19^e siècle.

83. La nécessité de supposer des rendements constants est accueillie de manière très critique par certains marginalistes, tels que Francis Edgeworth, Vilfredo Pareto ou encore Léon Walras (Humphrey, 1997). Knut Wicksell montrera ensuite qu'il est suffisant de supposer que la fonction de production a localement des rendements constants autour du point d'équilibre. Il utilisera également pour la première fois la forme spécifique qui sera par la suite connue comme la fonction de Cobb-Douglas. Pour des précisions techniques sur l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale et les différentes formes fonctionnelles, voir l'annexe B.

depuis leur nom. Selon eux, pour des valeurs adéquates des paramètres, cette forme fonctionnelle permet de capturer la relation de long terme entre les différentes variables agrégées. Notons au passage que Cobb et Douglas n'incluent pas la terre comme facteur de production dans leur fonction, alors que c'est encore le cas chez Wicksteed. Dans la pensée classique, la terre représentait les contraintes environnementales qui s'exercent sur le processus économique. L'approche de Cobb et Douglas traduit donc un certain effacement de cette problématique dans la pensée économique⁸⁴.

Néanmoins, la fonction de production agrégée ne devient réellement populaire en économie qu'avec la théorie néoclassique de la croissance, initiée de manière indépendante par Solow (1956) et Swan (1956). Le modèle de Solow se veut en particulier une réponse à l'analyse des dynamiques macroéconomiques formulée par Harrod (Halsmayer et Hoover, 2016). Solow reproche à Harrod d'avoir une conception trop rigide des rapports entre les facteurs de production, ce qui engendrerait nécessairement une forme d'instabilité macroéconomique dans sa théorie⁸⁵. Il répond à ce problème en introduisant une fonction de production agrégée avec un certain degré de substituabilité entre les facteurs, telle que la fonction Cobb-Douglas. Il fait également l'hypothèse que la productivité marginale du capital est décroissante, ce qui induit une convergence vers un état stationnaire de long terme. Dans ce dernier, le revenu par tête est constant si l'on n'introduit pas également un progrès technique exogène dans la fonction de production agrégée. C'est sur cette base que se développe la théorie néoclassique de la croissance dans les années 1950 et 1960, donnant lieu à une multitude de modèles dérivés du modèle de Solow⁸⁶.

Malgré ce succès, cette période est également marquée par de nombreuses critiques, en particulier dans le cadre des « controverses cambridgiennes » sur la théorie du capital (Harcourt, 1969; Cohen et Harcourt, 2003). Ces dernières sont déclenchées par l'attaque de Joan Robinson (1953), qui critique la conception du capital utilisée dans la fonction de production néoclassique. Plus précisément, elle suggère que le capital ne peut pas être défini indépendamment des conditions de répartition, alors que dans la théorie néoclassique, il détermine la répartition à travers la productivité marginale. Il y a donc un problème de circularité dans la définition du capital. Cette critique va susciter des réponses, de la part notamment de Solow et de Paul Samuelson, pour défendre la fonction de production néoclassique. Suite à la publication par Piero Sraffa de *Production of Commodities by Means of Commodities* (1960), le débat se déplace sur la question du « retour des techniques ». Dans la théorie néoclassique, chaque niveau d'intensité capitaliste correspond à un

84. Cobb et Douglas (1928, 165) mentionnent cependant les ressources naturelles à la toute fin de leur article : « Finally, we should ultimately look toward including the third factor of natural resources in our equations and of seeing to what degree this modifies our conclusions and what light it throws upon the laws of rent. »

85. Halsmayer et Hoover (2016) mettent néanmoins en garde contre l'interprétation de la théorie de Harrod fournie par Solow. Ils soulignent que Harrod était préoccupé par des déséquilibres de court terme liés à une faiblesse de la demande effective keynésienne. Or, ces problèmes sont écartés par Solow sous prétexte qu'il s'intéresse à la croissance de long terme.

86. Sans être exhaustif, on peut notamment mentionner les travaux de Kenneth Arrow sur l'apprentissage par la pratique, ceux de James Tobin sur la monnaie, ou encore les modèles de croissance optimale de Tjalling Koopmans et David Cass. Voir Boianovsky et Hoover (2009) pour une présentation plus complète des développements en théorie de la croissance.

certain taux d'intérêt. Mais dans des modèles avec capital hétérogène, il est possible qu'une même technique soit optimale pour deux intervalles disjoints du taux d'intérêt. Cette propriété est d'abord contestée par David Levhari, sous la forme d'un théorème du non-retour des techniques. Mais suite à des contre-exemples au théorème mis en avant par Luigi Pasinetti, Levhari et Samuelson (1966, 518) reconnaissent que « le théorème de non retour des techniques qui [leur] est associé est définitivement faux ». Il en découle que la fonction de production agrégée n'est pas compatible avec l'idée d'une hétérogénéité sous-jacente. Sur le plan théorique, la victoire semble donc acquise pour les cambridgiens britanniques. Mais elle reste contestée par certains, tels que Stiglitz (1974a), et n'amène pas pour autant les économistes néoclassiques à abandonner la fonction de production agrégée.

En définitive, davantage que le choix d'une représentation formelle de la production, ce sont les conséquences en ce qui concerne la répartition qui sont au centre des controverses cambridgiennes. En particulier, pour les cambridgiens britanniques, la théorie de la rémunération à la productivité marginale, outre ses faiblesses théoriques, tend à naturaliser les inégalités de revenus. D'autres critiques vont par la suite, viser plus directement l'idée même qu'il soit possible de construire une fonction de production agrégée à partir de fonctions de production microéconomiques. C'est le cas notamment de Franklin Fisher (1969), qui montre que les conditions nécessaires pour qu'une telle agrégation soit valide sont tellement contraignantes qu'il est peu crédible de penser qu'elles sont vérifiées dans la réalité⁸⁷. Face à ce type de critique, les économistes néoclassiques avancent que les fonctions de production agrégées obtiennent de très bons résultats empiriques. Mais ces derniers sont également critiqués. Shaikh (1974) suggère ainsi que les estimations empiriques de fonctions de productions agrégées ne font que capturer l'égalité comptable associée à la répartition du revenu entre le capital et le travail. Elles ne garantiraient donc pas que la structure de production sous-jacente puisse être approximée par une fonction agrégée⁸⁸.

Malgré ces attaques successives, les fonctions de production agrégées ont connu tout au plus une légère baisse de popularité dans les années qui ont suivi. Ainsi, l'affirmation de Cohen et Harcourt (2003, 206) selon laquelle les fonctions de production agrégées « sont tombées en disgrâce dans les années 70 et au début des années 80, jusqu'à leur renaissance avec la croissance endogène et les théories des cycles réels », apparaît quelque peu exagérée. Les estimations économétriques de fonctions de production agrégées se développent fortement durant cette période. Par ailleurs, si l'on constate un certain recul de la thématique de la croissance dans les revues les plus prestigieuses, cette thématique reste beaucoup plus populaire qu'avant les années 1950 (Boianovsky et Hoover, 2009, 3). Dans ce contexte, les modèles de croissance avec ressources épuisables, initiés par Solow et Stiglitz, apparaissent comme l'un des principaux développements de la théorie néoclassique de la croissance dans les années 1970. La controverse avec Georgescu-Roegen, puis

87. Fisher part d'une situation dans laquelle il existe différentes formes de capital, de travail et de biens produits. Pour que l'agrégation soit logiquement possible, il faut alors que pour chacun des trois éléments, toutes les entreprises aient les mêmes proportions de ses différentes formes.

88. Pour plus de détails sur les débats autour de l'agrégation et de l'estimation empirique des fonctions de production, voir par exemple Felipe et Fisher (2003) et Felipe et McCombie (2013).

Daly, à laquelle ils donnent lieu fait étonnamment peu référence aux critiques antérieures. S'il fallait construire une filiation, ce serait davantage avec la critique de Fisher, dans la mesure où Georgescu-Roegen et Daly interrogent la capacité de la fonction de production agrégée à représenter le processus de production, et en particulier sa dimension physique. Au contraire, les questions de répartition n'y sont pas abordées, alors qu'elles occupent une place centrale dans les controverses cambridgiennes.

2.1.2 Modèles de croissance et productivité illimitée des ressources

Comme l'exprime Solow dans sa « Richard T. Ely lecture » au congrès de l'American Economic Association (AEA) de décembre 1973, c'est le rapport *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972) qui a suscité son intérêt pour les ressources naturelles :

About a year ago, having seen several of those respectable committee reports on the advancing scarcity of materials in the United States and the world, and having, like everyone else, been suckered into reading *The Limits to Growth*, I decided I ought to find out what economic theory has to say about the problems connected with exhaustible resources. (Solow, 1974a, 1-2)

Il présente son modèle dans le cadre d'un symposium sur l'économie des ressources épuisables, dont les contributions sont par la suite publiées dans un numéro spécial de *The Review of Economic Studies* (1974b). Avec celui de Stiglitz (1974c) dans le même numéro, son article a eu une influence importante sur les travaux ultérieurs. Ces contributions partagent un cadre similaire et jettent ainsi les bases de la théorie néoclassique des ressources⁸⁹. Par rapport à la théorie néoclassique de la croissance antérieure, leur principale innovation consiste à introduire une variable R représentant le flux de ressources comme facteur de production, aux côtés du capital K et du travail L . Le niveau de production Q est ainsi relié au niveau des facteurs de production et au temps t par une fonction de production agrégée du type :

$$Q = F(K, R, L, t) \quad (1)$$

Dans ces travaux, la notion de « ressource » est illustrée soit par les ressources énergétiques, comme le pétrole ou le charbon, soit par les minéraux, comme le cuivre ou le phosphate. Ces ressources sont considérées comme étant épuisables et provenant d'un stock fini S_0 . Dans la fonction de production, la variable temporelle permet quant à elle d'introduire un « progrès technique exogène », défini comme l'ensemble des variations de la production qui ne sont pas attribuables à des variations des facteurs de production. L'évolution du capital et de la population est similaire à la théorie traditionnelle de la

89. Dans le même numéro, Dasgupta et Heal (1974) fournissent une autre contribution importante, ce qui amène certains auteurs à parler du modèle Dasgupta-Heal-Solow-Stiglitz (DHSS) (Benckroun et Withagen, 2011). Le travail de Dasgupta et Heal n'est pas abordé ici pour deux raisons : premièrement, ils n'ont pas participé activement à la controverse ultérieure avec l'économie écologique ; deuxièmement, leur modèle repose sur une norme utilitariste de répartition intergénérationnelle qui exigerait l'introduction d'aspects formels supplémentaires, sans pour autant contribuer à une meilleure compréhension de la controverse.

croissance : l'investissement net est égal à la production totale moins la consommation, et la population augmente à un taux constant et exogène. Dans ce cadre, la question posée par Solow et Stiglitz est de savoir si certains niveaux de consommation intergénérationnelle peuvent être atteints ou non. Cependant, ils considèrent chacun des configurations légèrement différentes.

Solow (1974b) étudie le cas d'une population constante et d'une consommation par tête constante à travers les générations, qu'il lie à une certaine conception de la justice chez Rawls⁹⁰. Il suggère alors que certaines hypothèses doivent être faites sur la fonction de production pour que le problème ne soit pas trivial :

For the problem to be interesting and substantial, R must enter in a certain way. For example, if production is possible without natural resources, then they introduce no new element. [...] On the other hand, if the average product of resources is bounded, then only a finite amount of output can ever be produced from the finite pool of resources ; and the only level of aggregate consumption maintainable for infinite time is zero.

The interesting case is one in which $R = 0$ entails $Q = 0$, but the average product of R has no upper bound. (Solow, 1974b, 34)

Solow introduit ici l'hypothèse de « productivité illimitée des ressources » qui postule que le niveau de production n'est pas limité par le flux de ressources. Comme il le reconnaît, cette hypothèse est cruciale si l'on cherche des niveaux de consommation qui peuvent être maintenus indéfiniment. Si elle n'est pas satisfaite, la consommation doit nécessairement diminuer à un moment donné. Solow propose pour cela d'utiliser une fonction de production Cobb-Douglas, qui vérifie effectivement cette hypothèse :

$$Q = K^\alpha R^\beta L^\gamma, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (2)$$

Dans ce cas, c'est la « substituabilité » entre le capital et les ressources qui garantit une productivité illimitée des ressources⁹¹. Solow démontre alors qu'un niveau de consommation strictement positif peut être maintenu si et seulement si l'élasticité de production du capital est supérieure à celle des ressources⁹² :

$$\alpha > \beta \quad (3)$$

90. Voir Erreygers (2009) pour une discussion plus détaillée de la relation avec le travail de Rawls.

91. Pour le voir, on peut réécrire la fonction de production de la manière suivante : $\frac{Q}{R} = \left(\frac{K}{R}\right)^\alpha \left(\frac{L}{R}\right)^\gamma$. Si R et L sont constants, la productivité des ressources à gauche peut être aussi grande qu'on le souhaite, à condition que K soit suffisamment grand.

92. La démonstration de Solow repose sur la minimisation de $\int_0^\infty R(t)dt$ sous la contrainte de l'équation d'accumulation du capital. Il en déduit un système différentiel à deux équations :

$$\dot{K} = Q - C \quad \text{et} \quad \frac{\dot{F}_R}{F_R} = F_K$$

où F_R et F_K sont les productivités marginales des ressources et du capital. Solow montre qu'il existe une solution de ce système qui consomme moins que le stock total de ressources si et seulement si l'inégalité (3) est satisfaite.

Cette condition signifie qu'une variation du capital doit avoir un effet plus important sur la production qu'une variation du flux de ressources⁹³. Dans ce cas, le long de la trajectoire qui réalise la consommation constante maximale par habitant, le stock de capital augmente de manière monotone et le flux de ressources diminue. Par conséquent, les possibilités de substitution inhérentes à la fonction Cobb-Douglas, et l'hypothèse d'une productivité illimitée des ressources qu'elle incorpore, jouent un rôle central dans ce résultat.

De son côté, Stiglitz (1974c) examine le cas d'une population qui croît à un rythme constant n . Il suppose une fonction de production Cobb-Douglas et un progrès technique neutre au sens de Hicks, qui croît à un rythme constant λ , de sorte que⁹⁴ :

$$Q = e^{\lambda t} K^\alpha R^\beta L^\gamma, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (4)$$

Dans ce cadre, Stiglitz montre qu'une consommation constante par tête peut être maintenue si et seulement si⁹⁵ :

$$n < \frac{\lambda}{\beta} \quad (5)$$

Cette condition indique que le taux auquel le progrès technique améliore la productivité des ressources doit être supérieur au taux de croissance démographique⁹⁶. Plutôt que la substitution du capital aux ressources, c'est désormais le progrès technique qui joue un rôle central pour contrecarrer la diminution du flux de ressources. Cependant, il ne s'agit que d'une autre manière d'assurer la même hypothèse de productivité illimitée des ressources. Stiglitz conclut ainsi⁹⁷ :

The fact that there is a limited amount of natural resources and natural resources are necessary for production does not necessarily imply that the economy must eventually stagnate and then decline. Two offsetting forces have been identified: technical change and capital accumulation. Even with no technical change, capital accumulation can offset the effects of the declining

93. Pour une définition formelle de la notion d'élasticité de production, voir l'annexe B.

94. Pour des précisions formelles sur le progrès technique neutre au sens de Hicks, voir l'annexe B.

95. Les équations dynamiques de Stiglitz sont similaires à celles obtenues par Solow, mis à part le fait qu'elles introduisent des taux de croissance constants pour le progrès technique et la population. En fait, Stiglitz établit une condition plus générale pour que la consommation totale augmente à un rythme constant g :

$$g < \frac{\lambda + \gamma n}{1 - \alpha}$$

Pour obtenir le cas d'une consommation par tête constante, il suffit de poser $g = n$ dans cette inégalité, ce qui donne la condition (5).

96. En réécrivant la fonction de production sous la forme $Q = K^\alpha (Re^{\frac{\lambda}{\beta}t})^\beta L^\gamma$, $\frac{\lambda}{\beta}$ apparaît comme étant le taux auquel le progrès technique améliore le niveau de ressources.

97. Dans la deuxième partie du même article, Stiglitz étudie un autre modèle basé sur une fonction de production similaire. Au lieu d'une croissance constante, il utilise une norme utilitariste de répartition intergénérationnelle, qui consiste à maximiser la somme des utilités actualisées sur l'ensemble des générations. Là encore, le progrès technique joue un rôle central pour échapper à la rareté des ressources. Le taux de croissance asymptotique de la consommation par habitant est positif si et seulement si le taux auquel le progrès technique améliore la productivité des ressources est supérieur au taux d'actualisation.

inputs of natural resources, so long as capital is “more important” than natural resources, i.e. the share of capital is greater than that of natural resources. With technical change, at any positive rate, we can easily find paths along which aggregate output does not decline. (Stiglitz, 1974c, 130-131)

Le progrès technique et la substitution du capital aux ressources apparaissent donc bien comme les principaux mécanismes permettant de surmonter l'épuisement des ressources dans ces modèles. Derrière ces mécanismes se trouve une même hypothèse de productivité illimitée des ressources qui est nécessaire pour maintenir un certain niveau de consommation indéfiniment. Elle n'est cependant pas suffisante, et demande à être complétée par les conditions (3) ou (5). Les travaux de Solow et Stiglitz ont ainsi donné à la théorie néoclassique des ressources ses principales caractéristiques. Une littérature considérable s'est construite sur cette base, à laquelle eux-mêmes ont apporté d'autres contributions importantes⁹⁸. Dans ce cadre, l'hypothèse de productivité illimitée des ressources, ainsi que les notions de substitution et de progrès technique, conservent un rôle central.

2.1.3 Méthodologie de la modélisation dans la théorie néoclassique des ressources

Pour étudier les aspects méthodologiques des modèles de croissance avec ressources épuisables, j'utilise le cadre présenté dans l'introduction générale. Celui-ci s'intéresse aux relations entre théorie, modèles et données, en distinguant deux registres principaux. D'une part, le registre de la *représentation*, qui renvoie au réalisme des modèles. D'autre part celui des *manipulations*, relatif aux fonctions remplies par les modèles. Cette caractérisation de la méthodologie de Solow et Stiglitz vise principalement à appréhender leur traitement des ressources naturelles. Elle ne prétend pas rendre compte de leur perspective méthodologique en général. Dans le cas de Solow, une analyse plus détaillée de sa conception de la modélisation est proposée par Halsmayer (2014). Elle apparaît dans une large mesure cohérente avec l'analyse développée ici. À ma connaissance, il n'existe pas de synthèse de ce type en ce qui concerne Stiglitz. Cependant, il fournit lui-même une approche réflexive des fondements de la théorie néoclassique des ressources (Stiglitz, 1979). Cette contribution est d'autant plus importante qu'elle résulte de sa participation à la conférence sur la raréfaction des ressources naturelles, organisée en 1976 par RFF, et à laquelle Georgescu-Roegen et Daly ont également participé. Cette conférence a donc offert l'occasion d'une première confrontation entre leurs conceptions divergentes du problème.

98. Stiglitz (1976) se concentre sur les caractéristiques des marchés concurrentiels et d'autres structures institutionnelles en ce qui concerne l'allocation des ressources épuisables. Solow et Wan (1976) explorent une version élaborée du modèle de croissance avec des coûts d'extraction de la ressource. Solow (1978) étudie le prix et la disponibilité des ressources à partir de données empiriques.

Exploration théorique et tests empiriques des modèles

Je m'intéresse pour commencer au registre des manipulations associé à la théorie néoclassique des ressources. Dans les travaux de Solow et Stiglitz, les modèles sont avant tout conçus comme un outil permettant de réaliser des inférences logiques de manière rigoureuse. Dans la typologie proposée par Morgan et Morrison (1999b), ils satisfont donc une fonction d'*exploration théorique*. Cette dimension est bien illustrée par le fait que Solow cherche un problème « intéressant et substantiel », c'est-à-dire une question dont la réponse n'est pas mathématiquement triviale (1974b, 34)⁹⁹. Stiglitz (1979, 44) adopte une approche similaire lorsqu'il insiste sur la distinction entre les « méthodes analytiques » et les « simulations ». Les premières recherchent des conditions exactes qui permettent de caractériser le système. Elles sont illustrées par les conditions (3) et (5) dans la théorie néoclassique des ressources. Ces conditions délimitent précisément les situations dans lesquelles une consommation constante peut être maintenue indéfiniment. Les simulations quant à elles donnent des solutions *numériques* pour différentes valeurs des paramètres. Cette démarche est notamment adoptée dans le rapport sur les limites à la croissance (Meadows *et al.*, 1972). Stiglitz défend la supériorité des méthodes analytiques, car elles permettent d'identifier la frontière exacte séparant les différents comportements du modèle, tandis que les simulations ne répondent au problème que pour des valeurs spécifiques des paramètres.

Toutefois, les méthodes analytiques ne peuvent s'appliquer qu'à des modèles relativement simples. La résolution analytique, ou l'analyse qualitative, des systèmes différentiels est généralement hors de portée si le modèle est trop complexe. Les remarques de Solow à l'égard du fait que la fonction Cobb-Douglas « [simplifie] le traitement du progrès technique » (1974b, 34) ou qu'une « une analyse complète [des implications du progrès technique] serait laborieuse » (40) illustrent bien cette dimension du problème. En ce sens, le choix de la fonction de production Cobb-Douglas est lié à la représentation simpliste de la production qu'elle fournit¹⁰⁰.

Outre cette justification purement théorique, les fonctions de production agrégées utilisées dans la théorie néoclassique des ressources sont également présentées comme étant validées empiriquement. Cette justification fait appel à une deuxième fonction des modèles, à savoir celle d'instrument de mesure (Morgan et Morrison, 1999b). Sur ce point, Solow et Stiglitz se réfèrent tous deux aux travaux antérieurs de Nordhaus et Tobin (1972), qui s'intéressent déjà à des fonctions de production agrégées intégrant une variable pour les ressources naturelles. Cette référence est cependant problématique à au

99. Cet aspect est souligné par Pottier (2014, 129, italique de l'auteur) : « Le raisonnement de Solow pour établir ses hypothèses est caractéristique. La clef est dans le sens du mot "intéressant". En quoi le cas où le produit moyen de la ressource est borné est inintéressant ? La réponse est simple : ce cas est inintéressant *d'un point de vue mathématique*. »

100. Halmayer (2014) montre que Solow reconnaît la simplicité de son modèle de croissance et qu'il le conçoit comme une alternative aux modèles complexes, tels que les tableaux input-output de Leontief ou les modèles macroéconométriques keynésiens. D'une part, il présente son modèle comme un « prototype » sur lequel il convient de construire des modèles plus raffinés. D'autre part, il le considère comme un outil pédagogique dans lequel les mécanismes économiques élémentaires peuvent être expliqués de manière transparente.

moins deux égards. Premièrement, dans leurs estimations empiriques, Nordhaus et Tobin prennent seulement en compte la terre en guise de ressource naturelle. À l'inverse, ce sont les ressources épuisables qui intéressent Solow et Stiglitz dans leurs modèles. Les résultats empiriques des premiers ne peuvent donc pas être utilisés pour valider les modèles des seconds. Deuxièmement, les travaux empiriques de Nordhaus et Tobin font appel à une fonction de production à élasticité de substitution constante (CES)¹⁰¹ :

$$Q = F(K, R, L) = [\alpha K^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \beta R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \gamma L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (6)$$

Cette forme est plus générale que la fonction Cobb-Douglas utilisée par Solow et Stiglitz, qui correspond au cas spécifique où l'élasticité de substitution σ tend vers 1. Ils choisissent explicitement cette dernière car elle combine deux propriétés qu'ils jugent nécessaires. D'une part, les ressources sont essentielles, au sens où si $R = 0$, alors $Q = 0$. D'autre part, la productivité des ressources n'est pas bornée. Si l'élasticité de substitution est supérieure à 1, les ressources ne sont plus essentielles. Si elle est inférieure à 1, la productivité des ressources est bornée. Or, sur la base des travaux de Nordhaus et Tobin, Solow considère comme « l'hypothèse la plus probable à l'heure actuelle » le fait que l'élasticité de substitution soit supérieure à 1 (1974b, 41). Cela reviendrait donc à supposer que l'on peut produire sans utiliser de ressources, ce qu'il considère initialement comme étant irréaliste. La référence aux travaux de Nordhaus et Tobin est donc incompatible avec les prémisses des modèles de Solow et Stiglitz.

De manière plus générale, l'ambition de soumettre les hypothèses de ces modèles à des tests empiriques soulève de nombreuses questions. Comme le reconnaît Stiglitz (1979, 44-45), « la question cruciale est de savoir ce qu'il faut considérer comme une constante ». Ainsi, il admet que les « pessimistes » pourraient considérer que l'hypothèse selon laquelle « l'élasticité de substitution est constante n'est pas correcte : par exemple, ils pourraient soutenir que lorsque les ressources deviennent rares, l'élasticité diminue ». Pour résoudre ce problème, Stiglitz suggère de permettre à l'élasticité de varier et de tester l'hypothèse selon laquelle elle est constante. Il semble cependant que cet argument ne permet pas réellement de répondre au problème. Ce n'est pas parce que l'élasticité est constante d'après les données passées, qu'elle le sera dans toutes les conditions de production futures, et en particulier avec un flux décroissant de ressources. Par conséquent, les estimations empiriques sur des données passées ne peuvent fournir des justifications satisfaisantes des fonctions de production à long terme.

Notons que ce problème est indépendant des critiques évoquées dans la sous-section 2.1.1 à l'encontre des estimations économétriques de fonctions de production. Ces critiques suggèrent que de telles estimations capturent l'égalité comptable de répartition de la valeur ajoutée plutôt que la structure de la production. Cependant, même si l'on pense que les estimations économétriques sont à même de dévoiler des relations techniques entre les facteurs agrégés, il est clair que celles-ci ne peuvent être valides que dans le domaine couvert par les données empiriques disponibles. En particulier, dans le cas

101. Nordhaus et Tobin combinent en fait une fonction Cobb-Douglas du capital et du travail avec une fonction CES par rapport aux ressources. Par simplicité, seule une forme CES standard est introduite ici. Pour davantage de détails techniques sur les fonctions CES, voir l'annexe B.

qui nous concerne, estimer une fonction de production dans un contexte de ressources naturelles abondantes ne peut rien nous apprendre sur une situation de long terme où le flux de ressources diminuerait de manière drastique. En dernier ressort, des justifications proprement théoriques sont nécessaires pour extrapoler la fonction de production en-dehors du domaine couvert par les données empiriques.

Fondements conceptuels et réalisme des modèles

Les éléments qui précèdent montrent que les diverses manipulations des modèles, en particulier les estimations empiriques, ne permettent pas de valider *a posteriori* les hypothèses théoriques. Il est donc nécessaire de justifier ces hypothèses par des arguments portant sur leur réalisme *a priori*, c'est-à-dire des arguments relevant du registre de la représentation. Étant donné leur rôle central dans la théorie néoclassique des ressources, il est particulièrement important d'examiner de plus près les notions de substitution et de progrès technique. Leur signification mathématique est claire. D'une part, la substitution décrit la possibilité d'augmenter la productivité des ressources $\frac{Q}{K}$ en augmentant le niveau du capital K . D'autre part, le progrès technique est associé à un terme exponentiel dépendant du temps, $e^{\lambda t}$. Du point de vue de la représentation, la principale difficulté consiste donc à saisir la signification conceptuelle de ces notions, seule à même de faire le lien avec le monde réel à l'extérieur du modèle. Or, Solow et Stiglitz fournissent très peu d'éléments permettant de saisir précisément ce qu'ils entendent par substitution ou progrès technique, au-delà des symboles mathématiques. Cette situation illustre une tendance à la fusion entre la théorie et le modèle, tels qu'ils ont été définis dans l'introduction générale. Les notions fondamentales ne proviennent pas d'un examen conceptuel approfondi antérieur à la modélisation, c'est-à-dire d'une théorie. Elles ne sont définies que par rapport au modèle lui-même. Or, la théorie sert d'intermédiaire entre le monde réel et le modèle, et sans elle le lien entre les deux est rompu.

Évidemment, cette analyse n'est vraie que *tendanciellement*, c'est-à-dire que l'on trouve en proportion beaucoup plus d'éléments renvoyant aux propriétés du modèle qu'à des aspects liés au monde extérieur. Néanmoins, un examen attentif permet toujours d'identifier quelques éléments résiduels qui dessinent les contours vagues d'une pseudo-théorie. Dans le cas de la théorie néoclassique des ressources, ces éléments soulèvent des questions importantes. Pour commencer, trois mécanismes différents peuvent être identifiés pour illustrer la notion de substituabilité. Premièrement, il peut y avoir substitution entre les ressources, par exemple entre le pétrole et le charbon grâce à une technologie de liquéfaction du charbon (Solow, 1974a, 5), ou entre les combustibles fossiles et les « technologies de secours » (« *backstop technologies* »), comme la fusion nucléaire ou l'énergie solaire (Solow, 1974a, 11). Deuxièmement, la substitution peut signifier un changement dans la composition de la production, vers des biens moins intensifs en ressources (Solow, 1978, 6). Enfin, elle peut renvoyer à une transformation du processus de production favorisant le recours à des technologies plus économes en ressources pour un même service final (Solow, 1978, 6).

Le problème de ces différentes définitions de la substitution est qu'aucune d'entre elles n'est explicitement représentée dans le modèle. La première est plutôt une substitution

entre ressources qu'une substitution entre capital et ressources. Or, il n'y a pas de variable dans le modèle décrivant une ressource alternative qui viendrait remplacer la ressource épuisable. La deuxième définition repose sur une substitution entre les biens produits, qui ne peut être représentée dans le modèle, car seule une variable de production agrégée est utilisée. Enfin, la troisième est plutôt une substitution entre différents types de biens d'équipement, alors que seule une variable agrégée du capital apparaît dans le modèle. La notion de substitution repose donc sur des mécanismes qui ne sont pas représentés explicitement dans le modèle. Par ailleurs, il est difficile d'établir une distinction claire entre les concepts de substitution et de progrès technique. La principale illustration de ce dernier est celle d'un « progrès technique qui économise des ressources naturelles » (Solow, 1974a, 10), ce qui semble très proche du troisième mécanisme évoqué ci-dessus pour la substitution. Alors qu'elles sont représentées de manière distincte au niveau analytique, les notions de substitution et de progrès technique se recouvrent donc sur le plan conceptuel.

L'hypothèse d'un progrès technique exponentiel est particulièrement symptomatique de ce point de vue. Certes, on peut envisager que certaines innovations permettront dans le futur de réduire la quantité de ressource nécessaire pour produire une unité de bien final. Mais de là à supposer que ce phénomène se poursuive à un rythme constant à l'infini, il y a un saut significatif. Or, cette hypothèse n'est pas réellement justifiée par Stiglitz. Il ne mentionne pas de technique particulière qui permette de réduire la consommation de ressources, et ne discute pas de la pertinence d'une telle hypothèse à long terme. La notion de progrès technique reste donc très désincarnée dans la théorie néoclassique des ressources. Par ailleurs, comme le soulignent Hourcade *et al.* (2015), cette manière de concevoir le progrès technique ne donne aucune information sur les facteurs économiques et institutionnels qui favorisent l'apparition d'innovations visant spécifiquement à réduire la consommation de ressources. Les modèles de croissance endogène mettent davantage en avant ces facteurs. Mais en dernier ressort, ils attribuent un caractère inépuisable au progrès technique à travers des hypothèses tout aussi abstraites.

Ces difficultés apparaissent étroitement liées à l'utilisation d'une fonction de production agrégée. Les différents mécanismes sous-jacents à la notion de substitution font tous appel à des distinctions entre des entités de différentes natures pour un même facteur de production. De même, le progrès technique renvoie à l'apparition de procédés de production nouveaux et distincts de ceux utilisés auparavant. Mais ces éléments disparaissent derrière les variables agrégées utilisées dans les modèles de croissance. La fonction de production agrégée offre donc peu de prise conceptuelle pour rendre compte de l'évolution du processus de production. Elle ne propose pas de relations claires entre les symboles mathématiques du modèle et des entités extérieures, sur la base desquelles il serait possible de discuter du réalisme du modèle. Au contraire, tous ces enjeux sont passés sous silence et laissés dans une forme d'implicite.

Dans le cadre des « modèles comme idéalisation et systèmes subrogés » proposé par Mäki (2009c), l'analyse qui précède tend à caractériser les modèles de croissance avec ressources épuisables comme des « systèmes de substitution ». Cette caractérisation découle d'abord de la faiblesse du « commentaire ». Dans l'approche de Mäki le commentaire est

censé étayer les bases de la ressemblance entre le modèle et le système dont il entend rendre compte. Or, dans la théorie néoclassique des ressources, la fusion entre la théorie et le modèle amène à un enfermement auto-référentiel sur ce dernier. Par ailleurs, les quelques éléments résiduels permettant d'établir un lien avec le monde extérieur au modèle ne sont pas réellement satisfaisants. Ils donnent à voir une pluralité de significations pour la notion de substitution, dont aucune ne transparait clairement dans la fonction de production agrégée. Et la confusion est encore accrue par la difficulté à distinguer la notion de substitution de celle de progrès technique. Dans l'ensemble, les liens entre le modèle et le système productif qu'il est censé représenter sont donc très faibles.

Ces difficultés pourraient cependant être attribuées au caractère nécessairement idéalisé du modèle, qui empêcherait de rendre compte plus rigoureusement des différents mécanismes couverts par les notions de substitution et de progrès technique. Mais, suivant Mäki, si l'idéalisation est nécessaire, elle doit être réduite au minimum en ce qui concerne les mécanismes causaux les plus centraux du modèle. Or, comme il a été montré dans la sous-section 2.1.2, les notions de substitutions et de progrès technique sont au cœur de la dynamique des modèles avec ressource épuisable. En particulier, elles entretiennent toutes deux des liens forts avec l'hypothèse de productivité illimitée des ressources. Or, cette dernière peut être qualifiée d'« hypothèse critique » (Mäki, 2011), dans la mesure où les conclusions du modèle en dépendent de manière très directe. Si l'hypothèse de productivité illimitée des ressources n'est pas satisfaite, il est clair qu'aucun niveau de consommation ne peut être maintenu par un stock fini de ressource. Le manque de fondements conceptuels fragilise donc considérablement la légitimité de cette hypothèse, et de l'ensemble de la démarche.

Cette question peut également être abordée sous l'angle de l'impérialisme scientifique, tel que défini par Mäki (2009a, 2013). Dans ce cadre, la théorie néoclassique des ressources apparaît comme une « expansion » de la théorie de la croissance néoclassique à la question de l'épuisement des ressources naturelles. Plutôt qu'une expansion « ontologique » qui viserait à saisir effectivement la spécificité de ce nouvel objet, elle s'apparente à une expansion « dérivationnelle » qui se contente de calquer le cadre préexistant. Cette démarche se traduit par l'absence de réflexion sur la spécificité des ressources naturelles en tant que facteur de production. En particulier, le caractère symétrique de la fonction de production de Cobb-Douglas place le capital, le travail et les ressources au même niveau. De même, les notions de substitution et de progrès technique sont transposées de la théorie traditionnelle sans davantage de réflexion quant à leur signification du point de vue des ressources naturelles.

Dans l'ensemble, ces éléments soulignent donc les faiblesses de la théorie néoclassique des ressources en ce qui concerne le registre de la représentation. La méthodologie de Solow et Stiglitz laisse peu de place à une réelle discussion de la place des ressources dans le processus de production. En particulier, la fonction de production agrégée offre peu de prise conceptuelle pour rendre compte des mécanismes sous-jacents aux notions de substitution et de progrès technique. De ce fait, leurs choix sont plutôt déterminés par des pratiques de modélisation préexistantes et des préoccupations d'ordre mathématique. Les modèles de Solow et Stiglitz fonctionnent ainsi de manière auto-référentielle, et il est

très difficile d'établir un lien avec la réalité extérieure aux modèles. Cette difficulté est d'autant plus importante que les méthodes empiriques ne permettent pas de valider *a posteriori* les hypothèses du modèle en-dehors du domaine des données empiriques existantes.

Le défi lancé par Stiglitz (1979, 47) aux « pessimistes » apparaît particulièrement étonnant de ce point de vue. Il les invite à montrer que « lorsque les ressources deviennent plus rares, nous ne remplaçons pas, ou ne pouvons pas remplacer, les marchandises plus gourmandes en ressources par des marchandises moins consommatrices de ressources ». Selon lui, les pessimistes doivent également apporter la preuve que « les perspectives sont peu encourageantes en matière de changements techniques qui nous permettraient de mieux utiliser nos ressources ». Stiglitz situe ainsi le débat au niveau des réalités techniques, alors même que lui et Solow discutent très peu de ces dernières. C'est néanmoins sur ce plan que Georgescu-Roegen va lui répondre, en mobilisant les principes de la thermodynamique.

2.2 Georgescu-Roegen et l'hypothèse de limite thermodynamique

La controverse sur les limites à la croissance intervient à un moment propice pour Georgescu-Roegen. En mettant les questions environnementales au centre de l'attention en économie, elle lui donne l'occasion de diffuser plus largement ses thèses sur les liens entre la thermodynamique et l'économie. Dans un premier temps, les économistes néo-classiques ne sont pas insensibles à cette perspective. Ainsi, Samuelson (1966b, 444) va jusqu'à affirmer que les principes de la thermodynamique se trouvent derrière l'idée même de fonction de production¹⁰². Il est probablement influencé par l'introduction de Georgescu-Roegen à *Analytical Economics*, pour lequel Samuelson rédige une préface. Solow (1974a, 11) lui-même suggère qu'il faut « de l'économie ainsi que la loi d'entropie » pour répondre à la question de l'épuisement des ressources naturelles, sans pour autant citer explicitement Georgescu-Roegen. De manière plus générale, comme le note Pottier (2014, 120-121), les économistes standards sont dans un premier temps intéressés par les approches physiques des questions environnementales, telles que les travaux d'Ayres et Kneese (1969). Mais un retournement va se produire progressivement, et tendre à marginaliser ces approches. La critique virulente que Georgescu-Roegen adresse à la théorie néoclassique des ressources a ainsi certainement contribué à son isolement au sein de la discipline.

2.2.1 Énergie accessible et efficacité limitée

Comme on l'a vu, les modèles de croissance avec ressources épuisables de Solow et Stiglitz sont une réponse à la publication du rapport sur les limites à la croissance (Meadows *et al.*, 1972), qui suscite plus généralement une réaction négative de la part de nombreux économistes. Dans ce contexte, Georgescu-Roegen propose son aide aux auteurs du rapport pour répondre aux critiques qui leur sont adressées (Levallois, 2010).

102. Voir citation en épigraphe de ce chapitre.

Cette démarche aboutit à la publication de l'article intitulé « Energy and Economic Myths » (1975), et elle offre à Georgescu-Roegen l'occasion de promouvoir sa conception thermodynamique de l'économie. Il y réaffirme en particulier l'idée que le processus économique repose sur la dégradation de flux physiques sous-jacents. La thermodynamique permet de rendre compte de ce phénomène grâce à la distinction entre l'énergie « disponible », qui peut être transformée en travail mécanique, et l'énergie « indisponible », qui ne le peut pas. C'est ce qui l'amène à considérer la loi de l'entropie comme la racine de la rareté économique.

Après avoir rappelé les fondements de son approche, Georgescu-Roegen propose de distinguer l'énergie disponible de l'énergie « accessible ». L'extraction d'une ressource énergétique d'un gisement terrestre, par exemple un puits de pétrole, implique de dépenser de l'énergie pour construire et faire fonctionner les infrastructures associées. Si la quantité d'énergie dépensée dans ce processus est inférieure à la quantité obtenue, la ressource est dite accessible. Sinon, le gisement n'est pas rentable sur le plan énergétique. Dans ce contexte, Georgescu-Roegen appelle « efficacité » le rapport entre l'énergie extraite et l'énergie dépensée, et il écrit :

To be sure, actual efficiency depends at any one time on the state of the arts. But, as we know from Carnot, in each particular situation there is a theoretical limit independent of the state of the arts, which can never be attained in actuality. In effect, we generally remain far below it. (Georgescu-Roegen, 1975, 355)

Il s'agit là de la première occurrence de l'hypothèse de « limite thermodynamique » dans les travaux de Georgescu-Roegen¹⁰³. Dans ce cadre, il présente le coefficient de Carnot comme l'exemple typique de limite que la thermodynamique impose aux processus de production, et en particulier à l'extraction d'énergie¹⁰⁴. Cet argument est cependant problématique, car le coefficient de Carnot s'applique à une situation tout à fait différente. Il détermine le rendement maximum d'une machine thermique, c'est-à-dire la quantité maximale d'énergie mécanique qu'elle peut produire pour une quantité donnée d'énergie thermique initiale. Dans une machine thermique, l'énergie mécanique produite est donc une transformation directe de l'énergie thermique. À l'inverse, dans le processus d'extraction d'énergie, la ressource extraite, le pétrole par exemple, n'est pas une transformation de l'énergie dépensée. Cette dernière sert uniquement à construire et faire fonctionner les infrastructures qui permettront d'extraire la ressource énergétique d'un gisement préexistant. Par conséquent, le principe de Carnot ne semble pas pouvoir être appliqué directement dans ce contexte. Il est néanmoins clair qu'il fournit une borne supérieure au rendement des machines thermiques, et donc qu'il définit une forme de limite thermodynamique dans ce cadre restreint.

Par la suite, Georgescu-Roegen va plus loin et suggère que le coefficient de Carnot implique de manière plus générale une limite thermodynamique au progrès technologique :

Even if technology continues to progress, it will not necessarily exceed any

103. En particulier, cette idée n'apparaît pas dans *The Entropy Law and the Economic Process*.

104. Pour une présentation détaillée du coefficient de Carnot, voir l'annexe A.

limit ; an increasing sequence may have an upper limit. In the case of technology this limit is set by the theoretical coefficient of efficiency. (Georgescu-Roegen, 1975, 362)

Georgescu-Roegen présente cette affirmation comme un contre-argument à l'optimisme technologique général des économistes qui critiquent le rapport Meadows. Il remarque notamment que « dans les mains de Solow, la substitution devient le facteur clé qui soutient le progrès technologique alors même que les ressources deviennent de plus en plus rares » (1975, 362). Comme on le voit, Georgescu-Roegen ne fait pas vraiment de distinction entre les notions de substitution et de progrès technique, ce qui s'explique par la confusion qui règne au sein même de la théorie néoclassique des ressources sur ce point (cf. sous-section 2.1.2). Néanmoins, cela ne facilite pas la compréhension précise du type de contrainte que le coefficient de Carnot exercerait sur les processus de production. Cet argument n'est pas réellement développé davantage dans cette première contribution, de sorte que la signification de l'hypothèse de limite thermodynamique reste incertaine à ce stade.

2.2.2 Limite thermodynamique au progrès technique

Dans une publication ultérieure, Georgescu-Roegen (1979a) formule une critique plus spécifique des travaux de Solow et Stiglitz, et en particulier de la fonction de production Cobb-Douglas sur laquelle ils reposent. Cette contribution résulte de sa participation à la conférence de RFF sur la raréfaction des ressources naturelles en 1976. À cette occasion, il est invité à commenter les communications présentées par Stiglitz et Daly lors de la session consacrée au rôle des ressources naturelles dans la production. Il indique clairement qu'il partage en grande partie la vision de Daly et qu'il est au contraire « entièrement dénué de sympathie envers la manière dont J. E. Stiglitz a traité son sujet » (95). Sa principale critique porte sur l'hypothèse de productivité illimitée des ressources telle qu'elle est incorporée dans la fonction de production Cobb-Douglas. Il avance une série d'arguments à l'encontre de cette hypothèse, qu'il convient d'examiner de manière détaillée.

Premièrement, Georgescu-Roegen (1979a, 97) fait valoir que « l'accumulation de capital implique un épuisement supplémentaire des ressources ». Selon lui, cela implique que si le capital augmente vers l'infini, alors les ressources seront rapidement épuisées par la production de capital. Cependant, dans les travaux de Solow et Stiglitz, la production de capital consomme effectivement des ressources. Dans leurs modèles, l'accumulation de capital est prélevée sur la production agrégée, qui implique elle-même une certaine consommation de ressources. Cela n'empêche pas le capital d'augmenter indéfiniment, car la productivité des ressources augmente plus rapidement et permet au flux de ressources de tendre vers zéro. Le mécanisme suggéré par Georgescu-Roegen est donc bien pris en compte, mais il n'implique pas à lui seul un épuisement des ressources, tant que la productivité des ressources est illimitée. Ce premier argument n'est donc pas suffisant sur le plan strictement logique.

Cela conduit au deuxième argument, selon lequel « tout processus matériel consiste

en la transformation de certains matériaux (les flux) par certains agents (les fonds) ». La distinction entre les flux et les fonds suggère ici une différence de nature entre les différents facteurs de production. Alors que les ressources naturelles sont transformées dans le processus de production, le capital et le travail sont les agents de cette transformation. Dans ce cadre, la notion de substitution apparaît trompeuse, en ce sens que le capital ne peut jouer le même rôle que les ressources dans la production. Selon Georgescu-Roegen (1979a, 97), « un changement de capital ou de travail ne peut que diminuer la quantité de déchets dans la production d'une marchandise ». Autrement dit, il est possible de réduire la part des ressources naturelles qui n'est pas à strictement parler *incorporée* dans le bien final, et qui est au contraire rejetée sous forme de déchets. Cet argument concerne donc plutôt les flux de matière, car l'énergie consommée dans la production n'est jamais réellement incorporée dans le bien final. L'une des difficultés liées à cet argument est qu'il n'est valable qu'à l'échelle d'un bien qui reste qualitativement identique. Si l'on peut produire un bien différent qui rende à peu près le même service, alors il n'est plus possible de définir une limite fondée sur la matière incorporée dans le bien final.

Pour généraliser son argument, Georgescu-Roegen s'appuie à nouveau sur l'idée d'une limite générale à la productivité des ressources :

In some cases it may also be that the same service can be provided by a design that requires less matter or energy. *But even in this direction there exists a limit*, unless we believe that the ultimate fate of the economic process is an earthly Garden of Eden. (Georgescu-Roegen, 1979a, 97-98, italique ajouté)

Cette idée semble être le véritable fondement logique de la critique de Georgescu-Roegen. Sans elle, l'affirmation selon laquelle l'augmentation indéfinie du capital implique l'épuisement des ressources n'est pas justifiée. Toutefois, elle soulève un certain nombre de questions qui rendent sa signification incertaine. Premièrement, alors que la première formulation de l'hypothèse de limite thermodynamique portait uniquement sur l'énergie, Georgescu-Roegen fait ici référence à la fois à l'énergie et à la matière. Deuxièmement, l'idée sous-jacente est toujours que les lois de la thermodynamique imposent des contraintes sur l'utilisation des ressources naturelles, mais il n'est plus fait de référence explicite à un principe en particulier, comme c'était le cas avec le coefficient de Carnot. Troisièmement, l'argument de Georgescu-Roegen mélange des notions physiques, telles que l'énergie et la matière, avec des notions économiques, telles que les « services ». Cependant, l'articulation entre ces deux dimensions de la production demeure très peu développée. Les liens entre les différents concepts et la possibilité de les comparer quantitativement pour définir l'existence d'une limite restent très implicites. Il est donc difficile de juger de la pertinence globale de l'hypothèse de limite thermodynamique.

Les contributions ultérieures de Georgescu-Roegen ne donnent pas beaucoup plus de détails sur ces arguments. Des allusions aux travaux de Solow et Stiglitz sont faites à divers endroits (Georgescu-Roegen, 1981, 1986a, 1988), mais l'hypothèse de limite thermodynamique n'est plus mentionnée explicitement. De plus, à ma connaissance, aucun élément réellement intéressant à ce sujet n'est disponibles dans les archives de Georgescu-Roegen et Solow, disponibles à la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Li-

brary de l'Université de Duke. En particulier, aucune correspondance directe entre eux n'est disponible, ni aucun autre document permettant de compléter l'analyse.

2.2.3 La conception thermodynamique de l'économie à l'épreuve de l'opérationnalisation

L'hypothèse de limite thermodynamique s'inscrit clairement dans la conception thermodynamique de l'économie de Georgescu-Roegen. Elle en représente en quelque sorte une forme d'opérationnalisation, dans la mesure où elle tente de préciser dans quelle mesure les principes de la thermodynamique exercent effectivement une contrainte sur le processus économique. Néanmoins, la discussion qui précède montre que cette opérationnalisation rencontre un certain nombre de difficultés conceptuelles. Ces difficultés questionnent la capacité à déduire de la vision du monde portée par la conception thermodynamique de l'économie des propositions plus directement utiles à la théorie économique. Pour en analyser les enjeux, il est utile de revenir aux caractéristiques de la conception thermodynamique de l'économie mises en évidence dans le chapitre 1^{er}. Celles-ci permettent d'approfondir l'examen de l'hypothèse de limite thermodynamique et des difficultés qu'elle soulève.

L'hypothèse de limite thermodynamique reflète tout d'abord le caractère hiérarchique de l'ontologie sous-jacente. La dimension économique de la réalité est encadrée dans la dimension physique, et l'idée de limite thermodynamique traduit le fait que cet encastrement implique des contraintes pour le processus économique. Mais l'ontologie associée à la conception thermodynamique de l'économie est également anti-réductionniste, dans la mesure où elle reconnaît une forme d'indépendance à la dimension économique par rapport à ses fondements physiques. En particulier, Georgescu-Roegen considère que la basse entropie est nécessaire pour produire de la valeur économique, mais pas suffisante. Si l'on conçoit les « services » ou le « progrès technique » auxquels il fait référence en termes économiques, il convient donc de rendre compte de leur autonomie relative vis-à-vis des ressources naturelles conçues en termes physiques. L'idée de « limite » est cohérente avec cette perspective, dans la mesure où elle laisse une part d'indétermination tant que l'on se situe en dessous de la limite en question. C'est à cet endroit que s'insère l'ontologie évolutionnaire propre à la conception thermodynamique de l'économie. L'articulation entre les dimensions physique et économique de la production n'est pas une constante intemporelle, mais le produit de circonstances historiques particulières, et en particulier des moyens techniques disponibles à un instant donné. De ce point de vue, l'idée de limite thermodynamique vient encadrer l'espace des possibles en suggérant qu'il existe néanmoins une forme de contrainte intemporelle dont aucune technologie ne peut s'extraire. À un niveau très général, l'hypothèse de limite thermodynamique est donc compatible avec les trois principales caractéristiques ontologiques de la conception thermodynamique de l'économie.

Cependant, cette hypothèse rencontre davantage de difficultés aux deux autres niveaux de la conception thermodynamique de l'économie. Au niveau épistémologique, les principes de la thermodynamique sont censés fournir un cadre conceptuel permettant de mieux appréhender les aspects physiques de l'économie. Or, un certain flou entoure

l'hypothèse de limite thermodynamique de ce point de vue. Georgescu-Roegen lie initialement cette hypothèse à l'efficacité avec laquelle l'énergie peut être extraite d'un gisement et au coefficient de Carnot. Mais un examen attentif montre qu'il n'y a pas réellement de lien direct entre le fonctionnement d'une machine thermique et les processus d'extraction de l'énergie. Ce sont là deux situations totalement différentes, et le coefficient de Carnot ne s'applique qu'à la première. Par ailleurs, dans un second temps, l'idée de limite thermodynamique tend à inclure également la matière parmi les facteurs qui imposent une contrainte sur le processus de production. Implicitement, il semble s'appuyer sur le principe de conservation de la matière pour justifier l'existence d'une limite liée à la matière incorporée dans les biens finaux. Mais il suggère également qu'il existe une limite aux services que peuvent fournir les ressources naturelles, sans réellement préciser la nature de cette limite. Dans l'ensemble, à un niveau strictement physique, les fondements de l'hypothèse de limite thermodynamique ne sont donc pas clairement établis.

Mais la principale difficulté soulevée par l'hypothèse de limite thermodynamique se situe au niveau méthodologique, c'est-à-dire qu'elle concerne l'intégration conceptuelle entre l'économie et la thermodynamique. Dans sa forme la plus générale, cette hypothèse occupe en effet une position transversale qui couvre les dimensions physique et économique de la production. Elle vise à rendre compte des contraintes exercées par des facteurs physiques, tels que l'énergie et la matière, sur des aspects économiques, tels que la production de services ou le progrès technique. Or, en l'état, les relations entre ces différents éléments restent largement inexplorées. Si l'on ne parlait que d'un bien final spécifique, il pourrait être plus facile de discuter de l'existence d'une limite thermodynamique liée à son processus de production. Mais la notion de service introduit un horizon beaucoup plus vaste. Un même service peut être rendu par différents moyens. Pour une bonne part, les flux physiques nécessaires à la production d'un service n'y sont pas *incorporés*, de sorte que le service n'a pas nécessairement de contenu physique. Dans cette circonstance, il semble difficile de donner un sens précis à l'hypothèse de limite thermodynamique. En ce sens, chez Georgescu-Roegen, cette idée se trouve davantage au stade d'une intuition théorique que d'un principe parfaitement établi.

Elle n'en constitue pas moins une réponse intéressante à la théorie néoclassique des ressources, car elle s'insère dans les failles conceptuelles de cette dernière. On a vu à quel point la réflexion sur la place des ressources naturelles dans la production est marginale dans la théorie néoclassique des ressources (cf. sous-section 2.1.3). En particulier, les notions de substitution et de progrès technique ne sont pas insérées dans un cadre conceptuel cohérent qui permettrait d'établir un lien clair entre les modèles et la réalité. Au contraire, le modèle tend à devenir un espace auto-référentiel. La critique de Georgescu-Roegen vise en un sens à rompre cette circularité dans la construction des modèles, en forçant à les confronter avec un référent extérieur. Elle souligne ainsi qu'un modèle ne se suffit pas à lui-même, mais qu'il doit être d'une manière ou d'une autre en prise avec la réalité qu'il cherche à décrire. En l'occurrence, ce sont les principes de la thermodynamique qui servent d'intermédiaire entre la réalité et les hypothèses du modèle, et permettent de confronter l'une aux autres. Si cette tâche n'est que partiellement menée à bien, la critique de Georgescu-Roegen a néanmoins l'intérêt d'ouvrir la voie.

Il convient par ailleurs de souligner que la critique de Georgescu-Roegen envers la théorie néoclassique des ressources ne se réduit pas à l'hypothèse de limite thermodynamique. Il inclut également d'autres aspects plus directement liés à la dimension proprement économique de l'épuisement des ressources naturelles. Tout d'abord, il se montre sceptique quant à la capacité des marchés à fournir une allocation optimale des ressources (1979a, 100). D'une part, car les générations futures ne peuvent participer au processus d'allocation dans le présent. D'autre part, car l'horizon temporel des propriétaires des ressources est selon lui limité¹⁰⁵. Georgescu-Roegen reproche également à la théorie néoclassique des ressources d'avoir adopté une « norme utilitariste » de maximisation de l'utilité escomptée. Or, selon lui, cette norme représente une idéalisation valide uniquement pour décrire un trait irrationnel au niveau individuel. Tandis qu'au niveau social, « escompter l'avenir est faux à tous points de vue » (101)¹⁰⁶.

Georgescu-Roegen se montre aussi très critique des estimations empiriques de fonctions de production, qu'il compare à la situation d'un « sculpteur qui peut vous prouver qu'il y a une magnifique Madone dans n'importe quelle bûche » (97). Cette métaphore signifie qu'il existe toujours des valeurs des paramètres de la fonction de production qui permettent de faire en sorte qu'elle corresponde bien aux données empiriques. Par conséquent, les résultats empiriques relèvent plutôt d'un artifice numérique que d'une relation sous-jacente entre les facteurs et la production. Bien que Georgescu-Roegen n'y fasse pas référence, cette critique s'apparente à celle formulée par Shaikh à peu près à la même période (cf. sous-section 2.1.1). Par ailleurs, quel que soit le résultat de ces estimations, l'extrapolation de fonctions de production estimées sur des données passées s'apparente selon lui à une négation du caractère profondément évolutionnaire du processus économique. Dès lors que des changements qualitatifs apparaissent dans le long terme, de telles extrapolations ne peuvent avoir qu'une validité limitée dans le temps.

Ces différentes critiques montrent que Georgescu-Roegen n'aborde pas la théorie néoclassique des ressources seulement sous l'angle de l'approche thermodynamique. Il est plus généralement en rupture avec de nombreux aspects théoriques et méthodologiques de la théorie économique standard, tels que le recours à l'utilité escomptée et aux estimations économétriques. Cependant, ces autres aspects de sa critique ne sont pas évoqués dans le débat entre économistes écologiques et néoclassiques à la fin des années 1990. Cette évolution traduit le fait que l'élément perçu comme étant le plus critique dans cette opposition est l'articulation entre les dimensions physique et économique de la production.

105. Cet argument répond au fait que pour les économistes néoclassiques, les trajectoires optimales de leurs modèles devraient être satisfaites par des économies de marché. Stiglitz (1979) considère ainsi qu'il est dans l'intérêt de chaque propriétaire d'une ressource d'anticiper les besoins futurs, de limiter l'extraction de la ressource et de la vendre à un autre investisseur pour obtenir son rendement.

106. Cette critique apparaît cependant trop générale. En effet, comme on l'a vu dans la sous-section 2.1.2, Solow et Stiglitz s'intéressent tous deux à des modèles dans lesquels chaque génération a le même niveau de consommation par tête. Solow lui-même se montre très critique envers la norme utilitariste.

2.3 Le débat entre économistes écologiques et néoclassiques à la fin des années 1990

2.3.1 Contexte du débat

En 1997, un numéro de la revue *Ecological Economics* est consacré à Georgescu-Roegen, décédé trois ans auparavant. À cette occasion, Daly remet en avant la critique de Georgescu-Roegen envers la théorie néoclassique des ressources dans un article intitulé « Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz » (1997a)¹⁰⁷. Daly est un ancien étudiant de Georgescu-Roegen et il partage avec lui la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). Sur cette base, il développe en particulier une critique de la croissance comme objectif ultime de la politique économique, et défend au contraire qu'il est « nécessaire » de viser un « état stationnaire ». De ce point de vue, la critique qu'il adresse aux travaux de Solow et Stiglitz peut apparaître *a priori* paradoxale, car ces derniers s'intéressent notamment aux conditions dans lesquelles un niveau de consommation par tête constant peut être maintenu indéfiniment. Il faut cependant rappeler que la définition de l'état stationnaire donnée par Daly porte sur le stock de capital et non sur le niveau de la consommation.

Mais plus que cette divergence, c'est l'hypothèse sous-jacente de productivité illimitée des ressources qui dérange Daly. Lui-même avait déjà suggéré que « les lois de la thermodynamique fournissent une limite théorique à l'amélioration de l'efficacité de maintenance » (1974, 15). C'est-à-dire qu'une quantité minimale de ressource est nécessaire pour faire fonctionner une unité de capital, alors que dans le modèle de Solow, la quantité de ressource par unité de capital tend vers 0. De ce fait, Daly conçoit l'état stationnaire comme une solution temporaire plutôt que comme un état perpétuel, contrairement à ce que laissent penser les modèles de Solow et Stiglitz. Cette divergence s'avère très importante dans le cas des ressources épuisables, car si leur productivité est limitée, la production cumulée est nécessairement finie. Pour Daly, à long terme, l'économie doit nécessairement reposer sur des ressources renouvelables, telles que l'énergie solaire. Il y a donc bien des différences importantes entre sa conception de l'état stationnaire, et les trajectoires de consommation par tête constante obtenues par Solow et Stiglitz dans leurs modèles. En ce sens, sa critique de leurs travaux est moins paradoxale qu'il peut sembler.

En 1997, Daly n'en est pas à sa première attaque envers la théorie néoclassique des ressources. En particulier, il a lui aussi participé à la conférence de RFF sur la raréfaction des ressources naturelles en 1976 (Daly, 1979). À l'époque, il formule déjà une critique des modèles de Solow et Stiglitz. La critique de Georgescu-Roegen reste cependant la plus détaillée, car on lui demande spécifiquement de commenter l'article de Stiglitz. Daly se concentre davantage sur la présentation de sa propre vision, et il distille sa critique au passage. Aucun d'entre eux ne semble avoir réellement reçu une réponse de la part de Solow et Stiglitz à l'époque. Il s'agit là d'une différence notable avec le débat de 1997,

107. Daly (1985, 290) reprend déjà la critique de Georgescu-Roegen. Cependant, il ne la développe pas davantage et ne la présente pas aussi clairement comme une attaque envers Solow et Stiglitz. De ce fait, il ne suscite pas un débat tel que celui de 1997.

suscité par l'article de Daly.

Lors du débat de 1997, Daly focalise la discussion sur la critique de l'hypothèse de productivité illimitée des ressources à partir de l'idée de limite thermodynamique. Il laisse au contraire de côté les autres aspects de la critique de Georgescu-Roegen, relatifs aux estimations empiriques de fonction de production et à la répartition intergénérationnelle des ressources. Dans leurs réponses, Solow (1997) et Stiglitz (1997) défendent l'hypothèse de productivité illimitée des ressources. D'autres économistes écologiques et néoclassiques prennent également part au débat. Certains se rallient clairement aux arguments de Daly et Georgescu-Roegen (Clark; Common; Opschoor; Peet; Tisdell), certains proposent un avis plus nuancé (Ayres; Pearce; Castle), et d'autres dénoncent le ton polémique du débat (Turner; Perrings). Par ailleurs, dans les années qui suivent, plusieurs publications approfondissent les questions soulevées dans ce cadre et méritent également que l'on s'y intéresse (Mayumi *et al.*, 1998; van den Bergh, 1999; Baumgärtner, 2004; Krysiak, 2006).

Ce débat reste l'une des rares confrontations directes entre les deux approches et montre l'importance des enjeux sous-jacents. Il illustre parfaitement les deux facettes du processus de « formation de l'identité » de l'économie écologique suggéré par Ropke (2005). D'une part, la construction d'une identité propre à l'économie écologique passe par la discussion des travaux des précurseurs. Cette discussion permet de préciser les racines théoriques du courant. Dans ce cadre, Georgescu-Roegen et sa conception thermodynamique de l'économie occupent clairement une place centrale. D'autre part, l'identité de l'économie écologique passe par la clarification des divergences avec l'approche standard en économie de l'environnement. Le débat de 1997 illustre cela en ce qui concerne plus particulièrement les relations avec la théorie néoclassique des ressources.

Avant d'aller plus loin dans l'analyse de ce débat, il est important de souligner qu'il se déroule dans un contexte intellectuel légèrement différent de celui des années 1970. Alors que la question des limites à la croissance domine dans les années 1970, les années 1990 sont marquées par l'émergence de la notion de « soutenabilité ». Le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, intitulé *Our Common Future*, définit « le développement durable » comme « la satisfaction des besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs » (Brundtland, 1987, 6). La notion de soutenabilité vise en quelque sorte à trouver un point de départ plus consensuel pour discuter des problèmes environnementaux, là où l'idée de limites à la croissance avait une tonalité d'emblée plus critique. Néanmoins, les oppositions des années 1970 vont se reconstruire quasiment à l'identique autour de la confrontation entre deux conceptions de la soutenabilité.

D'une part, la « soutenabilité faible » suppose qu'il est possible de substituer le capital artificiel au capital naturel à mesure que ce dernier se détériore. Elle se construit donc sur deux notions essentielles, celle de « capital naturel » et celle de « substitution ». Il est possible de trouver des précurseurs de l'idée de capital naturel au début du 20^e siècle (Missemer, 2018). Néanmoins, c'est réellement avec les travaux de David Pearce (1988) qu'elle devient centrale en économie de l'environnement. La notion de capital naturel promeut une vision globale des problèmes environnementaux, dans la mesure où elle englobe les ressources naturelles, les écosystèmes, ou encore le climat. En regroupant

pant ainsi ces différentes composantes de l'environnement, elle tend du même coup à les rendre interchangeables. Cette tendance est renforcée par l'idée d'une substituabilité entre le capital artificiel et le capital naturel. La notion de substitution utilisée dans les modèles néoclassiques avec ressources épuisables est ainsi étendue à l'intégralité du capital naturel. Solow (1993) lui-même contribue à cette interprétation extensive du concept de substitution. Dans ce cadre, la soutenabilité faible consiste à maintenir constant la somme du capital artificiel et du capital naturel, en accumulant le premier au fur et à mesure que le second se détériore. Différents travaux, tels que ceux de Pearce et Atkinson (1993), proposent des indicateurs de soutenabilité fondés sur cette approche.

De leur côté, les économistes écologiques, en particulier Daly (1990), privilégient l'idée d'une « soutenabilité forte ». Selon cette approche, il existe des limites à la capacité du capital artificiel à se substituer au capital naturel. L'idée même de capital naturel est jugée problématique, car elle masque le fait que des fonctions écologiques spécifiques doivent être préservées. Ainsi, la préservation du climat n'est pas substituable avec celle de la biodiversité. Dans les deux cas, des seuils doivent être respectés pour éviter une dégradation irréversible de l'environnement. Dans ce contexte, Victor (1991) souligne déjà le rôle crucial joué par les différentes approches de la substitution et du progrès technique. Toutefois, il n'identifie pas l'hypothèse de limite thermodynamique comme un argument central. Celui-ci est donc réellement remis en avant par Daly. De ce point de vue, la controverse entre Georgescu-Roegen/Daly et Solow/Stiglitz permet donc d'explorer certains des fondements de l'opposition entre la soutenabilité faible et la soutenabilité forte.

2.3.2 Horizon temporel des modèles et lois de la thermodynamique

La première question soulevée par le débat de 1997 concerne l'interprétation de l'horizon temporel des modèles néoclassiques avec ressources épuisables. Elle est déclenchée par l'affirmation de Stiglitz selon laquelle ces modèles n'ont de sens qu'à moyen terme, c'est-à-dire pour les 50 à 60 prochaines années. Selon lui, les modèles sont écrits « comme s'ils s'étendaient à l'infini, mais personne ne prend cela au sérieux » (1997, 269). Cet argument est vivement critiqué par un certain nombre d'autres participants au débat (Daly; Clark; Opschoor; Tisdell). Ces derniers considèrent que cet horizon temporel n'est pas adapté à des objectifs écologiques, tels que l'épuisement des ressources ou le changement climatique, qui ont des conséquences à court et à long terme. Ils pensent aussi que l'argument est une interprétation *ad hoc* avancée pour éviter les critiques, et qu'il n'avait jamais été formulé explicitement auparavant.

Bien que personne ne le remarque dans le débat, cela semble confirmé par le fait que Solow et Stiglitz soutiennent des positions opposées sur le sujet. D'une part, Stiglitz (1997, 269) remarque que « l'augmentation exponentielle de la population pose des problèmes de congestion presque inimaginables sur notre planète limitée », ce qui justifie selon lui une interprétation de moyen terme de l'horizon temporel des modèles. D'autre part, Solow (1974b, 36) avait affirmé auparavant que « sur une échelle de temps appropriée à des ressources limitées [...] la croissance exponentielle de la population est une idéalisation inappropriée ». Il suggère donc plutôt une interprétation à long terme.

Comme pour les notions de substitution et de progrès technique (cf. sous-section 2.1.3), la notion de temps dans les modèles se révèle donc ambiguë. Il s'agit d'abord d'une variable mathématique, dont la signification en dehors des modèles n'est pas stabilisée. Les multiples interprétations qui en découlent soulignent les contradictions qui peuvent en résulter¹⁰⁸.

De manière plus générale, la question de la temporalité adéquate est importante en théorie de la croissance. En macroéconomie, il est commun de distinguer le court terme du long terme par le fait que le capital varie dans le second cas et pas dans le premier. De ce point de vue, la théorie néoclassique des ressources se situe clairement dans le long terme. Cependant, il s'agit là d'abord d'une distinction conceptuelle liée au statut du capital. Cette distinction ne nous dit pas à quoi correspond le long terme en termes concrets de nombres d'années. Or, les ordres de grandeurs peuvent être très variables sur ce point. L'émergence récente de la « théorie unifiée de la croissance », défendue notamment par Galor (2011), le rappelle de manière très frappante. Cette théorie se propose en effet de reproduire l'évolution de la production sur plusieurs siècles, depuis une phase de stagnation malthusienne jusqu'à une phase de croissance soutenue. Il n'y a donc pas d'évidence quant à l'horizon temporel des modèles utilisés en théorie de la croissance. Cela rend d'autant plus nécessaire le fait d'en préciser la portée.

Réciproquement, les économistes néoclassiques contestent le fait que les principes de la thermodynamique imposent une quelconque contrainte sur le processus économique. Par exemple, Solow (1997, 268) affirme que la loi de l'entropie n'a « aucune importance pratique immédiate pour modéliser ce qui est, après tout, un bref instant temporel dans un petit coin de l'Univers ». Cet argument montre que Solow interprète la loi de l'entropie comme une force motrice globale et à long terme de l'Univers. En conséquence, elle n'aurait pas d'importance pour les activités économiques, car elles se déroulent sur une échelle de temps plus courte et dans des sous-systèmes de petite taille. Daly (1997c, 273) réplique en soulignant au contraire les conséquences pratiques de la loi de l'entropie, par exemple « qu'on ne peut pas brûler le même morceau de charbon deux fois », ou « qu'il y a des limites à l'efficacité dans la conversion de l'énergie ». L'opposition repose donc ici sur la double signification des principes de la thermodynamique (cf. chapitre 1^{er} et annexe A). La première signification, qualifiée de *pratique*, souligne que les principes de la thermodynamique fournissent une clef de lecture de nombreux processus naturels et industriels. Elle provient du fait que la thermodynamique naît de l'intérêt de Carnot pour les machines thermiques et qu'elle est utilisée pour traiter de nombreux problèmes d'ingénierie. La seconde signification, qualifiée de *cosmologique*, renvoie à l'évolution de l'Univers dans son ensemble. Elle est attachée en particulier à la formulation des principes de la thermodynamique donnée par Clausius.

La difficulté se situe donc ici au niveau épistémologique, dans la mesure où elle touche à la nature de la connaissance que fournit la thermodynamique. De ce point de vue,

108. Dans un récent article, Germain (2019) montre par ailleurs que même dans le moyen terme, il peut apparaître un écart significatif entre deux modèles néoclassiques avec ressource épuisable, l'un utilisant une fonction Cobb-Douglas, et l'autre une fonction de production où la productivité des ressources est bornée. Il suggère ainsi que l'argument de Stiglitz ne permet pas d'échapper à la question de l'existence d'une limite thermodynamique de long terme.

chaque camp mobilise la signification des principes de la thermodynamique qui sert le plus sa propre perspective. Dans les contributions antérieures au débat de 1997, cette division n'était pas aussi claire. Si Stiglitz (1979, 37) privilégie déjà la signification cosmologique, Solow (1974a, 2) s'appuie sur la signification pratique lorsqu'il suggère que les lois de la thermodynamique restreignent les possibilités de recyclage. Georgescu-Roegen quant à lui se réfère alternativement à la signification cosmologique (1971, 19, 231) et aux conséquences pratiques (1971, 6, 278). Or, l'histoire de la thermodynamique montre que les deux significations sont légitimes. Le principal problème provient donc du fait que Solow (1997) utilise implicitement la signification cosmologique pour écarter l'idée que les principes de la thermodynamique puissent avoir des conséquences pratiques. En tout état de cause, un tel raisonnement ne semble pas cohérent avec l'histoire et la structure de la thermodynamique.

L'idée que la thermodynamique a des conséquences pratiques pour l'analyse économique ne peut donc pas être exclue *a priori*. Il convient pour en juger d'examiner en détail les arguments avancés pour défendre cette position. Or, c'est précisément au niveau des conséquences pratiques que se situe l'hypothèse de limite thermodynamique qui constitue l'objet central du débat. S'appuyant sur la critique de Georgescu-Roegen (1979a), Daly la présente de la manière suivante :

In the Solow-Stiglitz variant [of production function], to make a cake we need not only the cook and his kitchen, but also some non-zero amount of flour, sugar, eggs, etc. This seems a great step forward until we realize that we could make our cake a thousand times bigger with no extra ingredients, if we simply would stir faster and use bigger bowls and ovens. *The conjuring trick is to give the appearance of respecting the first law of thermodynamics (material balance) without really doing so.* (Daly, 1997a, 263, italique ajouté)

Daly se sert de la métaphore de la recette de cuisine pour illustrer la conception de la production qui se trouve derrière la fonction de production Cobb-Douglas utilisée par Solow et Stiglitz. Sa critique vise très clairement l'hypothèse de productivité illimitée des ressources, selon laquelle, quel que soit le niveau du flux de ressource, il est toujours possible d'atteindre un niveau de production donné si l'on dispose de suffisamment de capital. Pour remettre en question cette hypothèse, Daly suggère également que la thermodynamique impose une limite à cette productivité. Deux aspects importants transparaissent de son interprétation de la critique de Georgescu-Roegen. Premièrement, Daly se concentre sur la première loi de la thermodynamique plutôt que sur la loi de l'entropie. Deuxièmement, au sein de cette première loi, il utilise plus particulièrement le principe de conservation de la masse. Il concentre ainsi le débat sur le rôle de la matière plutôt que sur celui de l'énergie. Dans cette perspective, l'hypothèse de limite thermodynamique repose donc sur le fait que la masse de matière qui sort du processus de production, sous forme de marchandises ou de déchets, est égale à l'apport de matière à l'entrée du processus de production. Par conséquent, la masse des biens produits est nécessairement inférieure à la masse de matière entrante, ce qui fournit une limite à la productivité des ressources matérielles.

Si l'on considère la manière dont l'hypothèse de limite thermodynamique apparaît

dans les travaux de Georgescu-Roegen (cf. section 2.2), l'interprétation de Daly procède à un certain rétrécissement de la question. La formulation initiale de Georgescu-Roegen (1975) faisait référence au coefficient de Carnot, c'est-à-dire à la question de l'énergie et à la loi de l'entropie. Dans la seconde formulation, qui est la principale source de Daly, Georgescu-Roegen (1979a) mentionne à la fois la matière et l'énergie. S'il ne mentionne plus explicitement un principe de la thermodynamique en particulier, certains de ses arguments vont plutôt dans le sens d'une approche en termes de conservation de la matière. Alors même qu'il prétend simplement répéter l'argument de Georgescu-Roegen, Daly fait donc une interprétation particulière de ce dernier. Il ne considère plus que la matière et il mentionne explicitement le principe de conservation de la masse comme fondement de l'idée de limite thermodynamique¹⁰⁹.

Cette interprétation a l'avantage d'apporter une certaine clarification sur le plan épistémologique. La limite en question découle du fait que la masse des biens produits est nécessairement inférieure à la masse de matière entrante. Elle soulève néanmoins d'autres questions. Tout d'abord, son utilité apparaît limitée dans une perspective évolutionnaire telle que celle adoptée par la conception thermodynamique de l'économie. Si l'on souhaite *in fine* déduire de cette inégalité une limite sur la quantité de biens produits, il faut également connaître leur contenu matériel par unité. Or, si des changements qualitatifs affectent les biens produits, ce contenu matériel peut également être modifié, et la conservation de la matière ne permet plus de déterminer une limite intertemporelle sur la quantité de biens produits. Ce problème devient d'autant plus aigu si l'on adopte une approche en termes de services finaux, qui peuvent être satisfaits par des biens qualitativement différents. Si l'on souhaite obtenir une limite pour un service donné, il faut alors appliquer la conservation de la masse à l'ensemble des biens qualitativement différents qui permettent de le satisfaire. À un instant donné, cela donne certainement une limite finie. Mais si l'on tient compte des changements qualitatifs possibles dans le futur, il n'est pas garanti *a priori* qu'une telle limite existe. À nouveau, ces difficultés soulignent la nécessité de préciser comment les dimensions physique et économique de la production s'articulent l'une à l'autre.

2.3.3 Articulation entre les dimensions physique et économique de la production

Dans le débat de 1997, le premier élément important en ce qui concerne l'intégration conceptuelle entre la thermodynamique et l'économie est lié à la question des unités pertinentes pour mesurer la production. Sur ce point, Daly (1997a, 264) affirme que « même les fonctions de production qui produisent des services produisent une production physique—l'utilisation de quelque chose ou de quelqu'un pendant un certain temps ». Au contraire, Stiglitz (1997, 269) estime que « la production est mesurée non en unités

109. La plupart des travaux ultérieurs qui se sont intéressés à l'hypothèse de limite thermodynamique ont adopté l'interprétation de Daly (van den Bergh, 1999; Baumgärtner, 2004). Le seul auteur qui ait adopté une interprétation plus générale et essayé d'inclure dans un modèle formel la conservation de l'énergie et de la matière, ainsi que la loi d'entropie, semble être Krysiak (2006). Néanmoins, de manière plus générale, la loi de l'entropie reste une référence importante en économie écologique.

physiques, mais en fonction de la valeur des services qui lui sont associés ». Cette question n'est pas explicitement abordée dans les travaux antérieurs de Solow et Stiglitz sur les ressources naturelles. Cependant, si l'on en revient aux premiers travaux de Solow, on peut constater qu'il qualifie explicitement les variables agrégées de ses modèles comme des mesures physiques des facteurs de production. Ainsi, dans sa réponse aux critiques formulées par Joan Robinson, il considère que le capital agrégé « est sans ambiguïté mesuré en unité physique » (1955, 101). Plus tard, dans son article sur la comptabilité de la croissance, il déclare que « Q représente la production et K et L représentent le capital et le travail en unités "physiques" » (1957, 312). À l'inverse, l'idée d'une mesure en valeur n'est jamais mentionnée dans ces travaux.

Cette situation laisse penser que l'idée d'une mesure en valeur est en partie utilisée de manière stratégique par Stiglitz dans le débat avec Daly. Il lui permet d'éviter l'argument de la limite thermodynamique en soulignant qu'une limite en termes physiques n'implique pas nécessairement une limite en termes de valeur. En ce sens, on aurait tendance à penser que l'argument est plutôt rhétorique et qu'il ne fournit pas réellement d'éléments pour étayer l'idée d'une mesure en valeur. Néanmoins, l'idée même d'une mesure strictement physique est également problématique lorsqu'il est question de variables agrégées. L'argument de Daly en faveur d'une mesure strictement physique ne tient que si l'on considère la production d'un bien ou d'un service spécifique, mais pas lorsque l'on passe à un niveau agrégé. Selon quelle unité physique serait-il possible d'agrégier des éléments hétérogènes d'une manière qui fasse sens d'un point de vue économique ? Face à cette difficulté, il semble qu'une mesure agrégée de la production doit nécessairement impliquer d'une manière ou d'une autre une comparaison des différents biens et services en termes de valeur.

Si l'on reconnaît l'impossibilité de se situer à un niveau strictement physique, la question est alors celle de l'articulation entre dimensions physique et économique de la production. Or, cette question divise au sein même de la conception thermodynamique de l'économie, et explique notamment certaines divergences entre Daly et Ayres (cf. chapitre 1^{er}). Il n'est donc pas étonnant qu'Ayres adopte une position intermédiaire dans le débat. Il considère en effet que « le bien-être humain est, en dernière analyse, attribuable à des services non matériels » qui ont cependant « une base matérielle ». Il conteste l'idée qu'il existe « une limite supérieure finie à la production de services à partir d'un matériau donné [...] étant donné les possibilités de dématérialisation, de réutilisation, de rénovation, de récupération et de recyclage » (1997a, 286)¹¹⁰. Cette perspective a l'intérêt de mettre clairement en évidence le fait que la question nécessite une intégration conceptuelle plus poussée entre les dimensions physique et économique de la production. Elle n'explique cependant pas clairement comment l'on peut en rendre compte dans le cadre des fonctions de production agrégées ou d'autres formalismes.

À l'inverse, les tentatives d'incorporer les lois thermodynamiques dans des modèles formels ont tendance à éviter la difficulté conceptuelle sous-jacente (Baumgärtner, 2004;

110. Dans la même lignée, van den Bergh (1999, 554) affirme que « la production de services à partir de la transformation de matériaux et la valeur de cette production de services ne semblent pas être bornées par une limite absolue ».

Krysiak, 2006). Leurs auteurs considèrent simplement que les marchandises produites sont mesurées en fonction de leur masse et de leur contenu énergétique. Par conséquent, les lois de conservation conduisent à des inégalités de la forme $Q \leq R$, qui sont interprétées comme étant incompatibles avec l'hypothèse d'une productivité illimitée des ressources. Cela n'est cependant pas satisfaisant d'un point de vue méthodologique, dans la mesure où ces unités physiques ne sont pas ensuite liées aux notions économiques de services ou de valeur.

Symétriquement, l'affirmation des économistes néoclassiques selon laquelle la production peut être directement mesurée en valeur met de côté la dimension physique du processus de production. La fonction de production agrégée se révèle particulièrement inappropriée pour rendre compte de l'articulation entre les deux dimensions. Il est difficile d'appréhender les relations physiques entre les facteurs de production en-dehors de processus spécifiques. Or, la fonction de production agrégée suppose implicitement que ces différents processus sont agrégés de manière monétaire, ce qui empêche de revenir à la structure physique sous-jacente. En ce sens, ce formalisme offre peu de prise conceptuelle pour réfléchir à l'articulation entre les dimensions physique et économique de la production.

La contribution ayant cerné le plus clairement ces enjeux est certainement celle de van den Bergh (1999). Bien qu'il se situe explicitement dans le camp de l'économie écologique, il reconnaît que le fait de se concentrer uniquement sur la dimension physique du processus de production ne résout pas davantage le problème que l'approche néoclassique traditionnelle. Il estime plutôt que « l'interaction entre la dimension physique et celle relative à la valeur, qui est au cœur de la question, n'est pas vraiment abordée dans les deux approches » (552). Pour tenter de combler cet écueil, il propose un modèle agrégé de la production très similaire à ceux des économistes néoclassiques, dont la principale innovation consiste à introduire une « fonction de transformation » entre les mesures physiques et les mesures en valeur. Par conséquent, le débat initial entre la productivité illimitée des ressources et la limite thermodynamique est simplement reformulé par la question de savoir si cette fonction peut produire une valeur constante ou croissante avec un flux physique décroissant. Si cette démarche part d'un constat pertinent, elle laisse donc intacte la plupart des difficultés liées aux relations entre les dimensions physique et économique de la production.

Cette controverse souligne donc les difficultés inhérentes à l'intégration conceptuelle de la thermodynamique et de l'économie. Si elles ne résolvent pas complètement le problème, les contributions qui s'intéressent à la fois aux dimensions physique et économique, telles que celles d'Ayres (1997a) et de van den Bergh (1999), aident à le situer plus clairement. Elles montrent que la notion de production elle-même doit être affinée pour pouvoir évaluer sa dépendance vis-à-vis des ressources naturelles. Plus précisément, la relation entre les ressources matérielles et énergétiques, les biens qu'elles permettent de produire et les services immatériels qu'ils fournissent, est au cœur de la question. En outre, le débat souligne que les unités utilisées pour mesurer les concepts sont importantes. Dès lors que les hypothèses rivales de productivité illimitée et de limite thermodynamique supposent une relation quantitative, il convient de s'interroger sur l'échelle appropriée pour

étudier cette relation. Alors que la thermodynamique repose sur les mesure en termes d'énergie et de masse, la production de biens et de services a généralement été associée à une mesures en valeur, et il est nécessaire de les articuler ensemble. Or, le formalisme des fonctions de production agrégées n'offre pas une distinction conceptuelle claire entre ces deux dimensions du processus de production, et ne permet donc pas d'analyser leurs relations réciproques.

2.3.4 Retour à la distinction entre substitution et progrès technique

L'autre question importante soulevée par le débat concerne l'analyse des changements techniques au sein du processus de production. Sur ce point, Solow et Stiglitz entretiennent la même confusion que celle déjà identifiée dans leurs premières contributions (cf. sous-section 2.1.3). Solow (1997, 267) affirme ainsi que « la substitution entre les ressources renouvelables et non renouvelables est l'essence de la question ». Comme indiqué auparavant, cette interprétation en termes de substitution entre ressources apparaît cependant incompatible avec les modèles initiaux de Solow et Stiglitz, dans lesquels aucune ressource renouvelable ne vient remplacer la ressource épuisable. Cela ne signifie pas que cette forme de substitution n'est pas effectivement importante. Au contraire, certains économistes écologiques mettent particulièrement l'accent sur cette question (Clark, 1997; Ayres, 2007). Mais l'on est en droit de douter que les modèles de Solow et Stiglitz aient initialement visé à traiter cette question, et qu'ils soient appropriés pour le faire.

Stiglitz (1997, 269) suggère quant à lui que la substitution entre le capital et les ressources est permise par « des machines plus précises (faites de ressources relativement abondantes) [qui] peuvent réduire le gaspillage de ressources qui sont relativement rares ». À nouveau, cette interprétation est difficile à mettre en lien avec les modèles en question, car ces derniers reposent sur des variables agrégées qui ne permettent pas de représenter un changement dans la nature des biens d'équipement. Par ailleurs, elle montre qu'il n'y a pas de consensus entre les économistes néoclassiques sur le principal mécanisme dont la notion de substitution est censée rendre compte. Enfin, la notion de substitution s'avère encore une fois redondante avec celle de progrès technique, définie par Stiglitz comme permettant de « réduire les quantités de capital physique et de ressources nécessaires à la production de l'unité de production ». Il demeure donc une confusion quant à la signification de la substitution et du progrès technique, ainsi qu'à leurs relations avec les propriétés correspondantes dans les modèles.

Cette difficulté est perçue par Daly. Ce dernier critique en particulier l'absence de « distinction entre la substitution entre les facteurs à l'intérieur d'un ensemble donné de technologies (état de l'art existant) et la substitution entre les facteurs rendue possible par une nouvelle technologie (état de l'art amélioré) » (1997a, 264). Il avance ainsi un argument plus direct contre l'hypothèse de productivité illimitée des ressources. En effet, si la fonction de production est censée représenter les possibilités existantes de production à un moment donné, alors la productivité est nécessairement limitée par le fait que l'ensemble des technologies disponibles est lui-même fini. Le conflit entre les hypothèses de productivité illimitée des ressources et de limite thermodynamique porte donc uniquement sur les possibilités futures offertes par la technologie. S'il reconnaît qu'il peut y avoir

un débat sur ce point, Daly considère que l'argument de Georgescu-Roegen l'emporte.

Solow et Stiglitz n'abordent pas directement cette question dans leurs réponses. Néanmoins, il est intéressant de s'interroger sur ce que changerait cette distinction dans les modèles de croissance avec ressources épuisables. Premièrement, comme le progrès technique dépend du temps dans ces modèles, il semble être le concept qui correspond le mieux à l'idée d'un état de l'art amélioré. Inversement, la substitution entre capital et ressources est indépendante du temps dans les fonctions de production et correspondrait donc à l'idée d'un état de l'art existant. Cela permettrait donc de clarifier la distinction conceptuelle entre substitution et progrès technique. Si l'on suit le raisonnement de Daly, la substitution ne peut donner lieu à une productivité illimitée des ressources pour la simple raison que l'ensemble des technologies disponibles à chaque instant est fini. La structure de la fonction Cobb-Douglas serait donc inappropriée. En particulier, cela remettrait en question les résultats obtenus par Solow dans son modèle avec ressource épuisable. Il serait également nécessaire de modifier le modèle de Stiglitz afin d'utiliser une fonction de production dans laquelle la productivité des ressources est bornée à chaque instant. Cependant, les résultats obtenus par ce dernier reposent davantage sur le terme de progrès technique dépendant du temps. Le débat se concentrerait alors sur le fait de savoir si ce progrès technique peut tendre vers l'infini et ainsi permettre une productivité illimitée des ressources dans le long terme, ou s'il est contraint par une limite thermodynamique.

Cette approche permet donc de clarifier la distinction entre substitution et progrès technique. Mais la notion de substitution elle-même reste ambiguë, dans la mesure où elle renvoie à différents mécanismes. Ce point est notamment abordé par van den Bergh (1999), qui critique le fait que l'utilisation de variables agrégées dans les modèles néoclassiques empêche d'examiner plus précisément les possibilités de substitution¹¹¹. Il suggère en particulier de distinguer la substitution directe entre les facteurs de production « ayant la même fonction », de la substitution indirecte entre « plusieurs catégories de facteurs de production, qui remplissent des fonctions différentes et souvent complémentaires » (549). Cette distinction est ensuite utilisée pour analyser plus finement les effets de différentes formes de substitutions sur l'utilisation de l'énergie, des matériaux, du capital et du travail dans le processus de production. L'approche de van den Bergh ne vise cependant pas à affirmer *a priori* qu'une forme de substitution est plus importante qu'une autre. Elle se veut plutôt un cadre conceptuel préalable pour mener des études empiriques sur la question.

Ces remarques permettent de mieux saisir les enjeux liés au registre de la représentation dans le cadre des fonctions de production agrégées. En ce qui concerne la substitution, le principal problème réside dans le fait que les différents mécanismes proposés pour l'expliquer font tous appel à des distinctions entre différentes formes pour un

111. Bien qu'il n'y fasse pas aussi clairement référence au cours du débat, cette difficulté semble également avoir été saisie par Daly (1985, 291) quelques années auparavant : « The plausibility of the extensive substitution hypothesis is enhanced by the fact that an aggregate measure of output permits product substitution as well as factor substitution. But the extra scope for substitution is bought at the price of ambiguity in the meaning of output that unavoidably arises in moving from a definite single product to a vague aggregate. »

même facteur de production. De même, le progrès technique renvoie à l'apparition de nouveaux procédés de production, distincts de ceux utilisés auparavant. Mais ces divers aspects ne trouvent pas de place parmi les variables agrégées utilisées dans les modèles de croissance avec ressources épuisables. Il en ressort une certaine difficulté conceptuelle à rendre compte de l'évolution du processus de production dans le cadre des fonctions de production agrégées. À cette difficulté s'ajoute celle mentionnée plus haut en ce qui concerne les relations entre les dimensions physique et économique de la production. En ne représentant pas de manière bien distincte ces deux facettes, le formalisme des fonctions de production agrégées ne permet pas de penser leur articulation. Il suscite également une confusion quant aux unités dans lesquelles les facteurs et la production sont censés être mesurés. Ce point apparaît pourtant crucial pour pouvoir cerner plus précisément la signification des hypothèses rivales de productivité illimitée des ressources et de limite thermodynamique, et juger de leur pertinence respective.

La question se pose alors de savoir si un autre formalisme, permettant de mieux rendre compte de ces différents aspects, émerge de cette controverse. L'alternative qui est la plus régulièrement mentionnée du côté de l'économie écologique est celle de la théorie flux-fonds de la production proposée par Georgescu-Roegen. Lui-même utilise sa distinction entre flux et fonds pour critiquer la notion de substitution (cf. section 2.2). Daly (1997a, 265) estime quant à lui que « le modèle flux-fonds du processus de production est supérieur à la fonction de production néoclassique », car il fournit une vision plus claire de ses aspects physiques. De même, Mayumi *et al.* (1998) considèrent que les flux et les fonds jouent des rôles distincts dans le processus de production, et par conséquent que la représentation analytique utilisée dans la théorie néoclassique est erronée. Cependant, ces références au modèle flux-fonds restent relativement limitées dans le cadre de la controverse. En particulier, elles ne permettent pas de voir en quoi celui-ci permet de répondre aux principaux enjeux qu'elle soulève, à savoir la représentation de l'évolution technique du processus de production et l'articulation entre ses dimensions physique et économique. Je reviens donc sur cette question de manière séparée dans le chapitre 5.

À la fin des années 1990, la position de la conception thermodynamique de l'économie par rapport à la fonction de production agrégée semble donc ambiguë. Alors que certains, tels que Daly (1997a) et Mayumi *et al.* (1998), la rejette clairement, d'autres, tels qu'Ayres (1997a) et van den Bergh (1999), proposent plutôt d'y apporter des corrections pour mieux rendre compte des aspects physiques du processus de production. La première perspective ne se développe pas vraiment dans les années qui suivent et la théorie flux-fonds demeure marginale en économie écologique. À l'inverse, la deuxième approche donne lieu à un important programme de recherche qui se développe depuis les années 2000 et vise à démontrer empiriquement l'importance de l'énergie dans la croissance économique. Ce programme de recherche a favorisé un retour en grâce de la fonction de production agrégée au sein de l'économie écologique. Le chapitre suivant s'intéresse plus en détail à cette perspective, afin d'approfondir les enjeux méthodologiques sous-jacents.

2.4 Conclusion

La controverse entre la théorie néoclassique des ressources et la conception thermodynamique de l'économie se résume en définitive à une opposition entre les hypothèses de productivité illimitée des ressources et de limite thermodynamique. Mais derrière l'apparente simplicité de cette opposition, la controverse met en évidence de nombreuses difficultés conceptuelles. Du fait de ces difficultés, aucun des deux camps n'a été réellement en mesure de démontrer la supériorité de son hypothèse. Il est néanmoins possible de tirer de cette controverse de nombreux enseignements quant aux défis qui se présentent lorsque l'on cherche à penser conjointement les dimensions physique et économique de la production.

Le premier défi est qu'il est nécessaire d'avoir au préalable une vision claire du changement technique. De ce point de vue, les notions de substitution et de progrès technique sont utilisées de manière très confuse dans la controverse. Lorsque l'on s'intéresse de près à cette question, on constate que la notion de substitution recouvre divers mécanismes impliquant des changements dans le type de ressource, de capital ou de biens finaux. La distinction entre l'état de l'art existant et l'état de l'art amélioré permet quant à elle de clarifier la distinction entre substitution et progrès technique. Ce dépliage des concepts de substitution et de progrès technique met en évidence les faiblesses conceptuelles et méthodologiques de la théorie néoclassique des ressources. Les différents mécanismes sur lesquels repose la notion de substitution ne peuvent être explicitement représentés dans la fonction de production agrégée, qui efface toute différence entre des facteurs de production hétérogènes. L'idée d'un état de l'art existant exclu quant à lui le recours à la fonction de Cobb-Douglas. Ces problèmes apparaissent comme la conséquence d'une méthodologie de la modélisation auto-référentielle, dans laquelle la théorie et le modèle tendent à se confondre, et qui perd ainsi tout lien avec le monde extérieur.

La conception thermodynamique de l'économie vient en quelque sorte rompre la logique auto-référentielle de la théorie néoclassique des ressources en imposant les principes de la thermodynamique comme condition minimale de réalisme des modèles. Cependant, cette démarche rencontre également des difficultés conceptuelles. Au niveau strictement physique tout d'abord, l'hypothèse de limite thermodynamique donne lieu à des interprétations variables qui laissent planer un doute sur sa signification exacte. D'une part, cette hypothèse pourrait être liée à l'énergie, et plus particulièrement au coefficient de Carnot, selon la formulation initiale de Georgescu-Roegen. Cette approche est appliquée de manière inappropriée par Georgescu-Roegen à la question de l'extraction d'énergie, mais il est clair qu'elle peut avoir un sens dans d'autres situations. D'autre part, la limite pourrait provenir de la conservation de la matière et du fait qu'une partie est nécessairement incorporée dans les biens finaux, selon l'interprétation de Daly. La portée d'une telle limite est cependant réduite dans une perspective évolutionnaire où les biens finaux subissent des changements qualitatifs. Pour redonner une portée plus générale à l'idée de limite thermodynamique, il faudrait donc être en mesure de comparer des biens qualitativement différents entre eux. Or, aucune mesure strictement physique ne permet de faire cela d'une manière qui ait un sens économique.

Cette difficulté amène donc à la question de l'articulation entre les dimensions physique et économique de la production, et à l'intégration conceptuelle entre la thermodynamique et l'économie qu'elle suppose. La notion de service, abondamment utilisée dans la controverse, est particulièrement ambiguë de ce point de vue. Par essence, ce concept vise à dépasser la situation dans laquelle un bien spécifique est utilisé pour remplir un besoin, et prendre en compte le fait que ce besoin peut être rempli par des biens qualitativement différents. En ce sens, la limite thermodynamique liée à la conservation de la matière devient moins claire dès lors que l'on parle d'un service, puisque la matière n'est pas incorporée dans ce dernier. L'existence d'une limite liée à l'énergie soulève une interrogation similaire. Si certains services, tels que l'éclairage, ont clairement une composante énergétique irréductible, il est évident que ce n'est pas toujours le cas. De manière générale, pour pouvoir discuter de l'existence d'une limite thermodynamique, il semble donc nécessaire de déplier cette notion, afin de savoir si l'on parle d'un bien défini ou d'un service, de la matière ou de l'énergie, du premier ou du second principe, d'un état donné de la technique ou d'un état futur, etc. Or, à nouveau, une telle discussion semble impossible dans le cadre d'une fonction de production agrégée qui tend à gommer toutes ces nuances.

Plus généralement, cette controverse souligne les obstacles qui empêchent la construction d'un réel dialogue entre la théorie néoclassique des ressources et la conception thermodynamique de l'économie. Le ton polémique adopté dans le débat de 1997 n'est certes pas propice à un tel dialogue. Mais au-delà, ce sont deux visions du monde apparemment irréconciliables qui s'affrontent : l'une dans laquelle le processus économique est soumis à des contraintes physiques strictes, et l'autre dans laquelle le processus économique dispose toujours des moyens nécessaires pour surmonter ces contraintes. La controverse est une illustration de cette dichotomie plus générale que l'on retrouve dans l'opposition entre soutenabilité forte et soutenabilité faible. Au niveau institutionnel, dans les années 1990, cette dichotomie est rendue plus visible par l'apparition de l'économie écologique comme courant à part et opposé à l'économie de l'environnement néoclassique. Le processus de rapprochement qui s'enclenche dans les années 2000 se fait par une *normalisation* de l'économie écologique davantage que par une *synthèse* entre ces deux visions du monde (Spash, 2013; Plumecocq, 2014). De manière symptomatique, la thermodynamique tend à devenir moins centrale dans l'appareil théorique de l'économie écologique.

Les outils analytiques jouent également un rôle majeur dans cette opposition entre deux visions du monde. En particulier, la fonction de production agrégée incarne la vision standard d'une économie dépourvue de fondements physiques réellement contraignants. Le fait que la controverse se concentre autour de cet instrument formel rend le dialogue d'autant plus difficile, car il est impossible d'y distinguer clairement les dimensions physique et économique de la production. En ce sens, les économistes écologiques sont dans une certaine mesure pris au piège de la fonction de production agrégée. Néanmoins, à la fin des années 1990, leur position apparaît ambiguë à cet égard. Certains rejettent clairement la fonction de production agrégée et voient dans la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen une alternative possible. D'autres au contraire pensent pouvoir adapter la fonction de production agrégée afin de mieux rendre compte des aspects phy-

siques du processus de production. Cette deuxième perspective semble avoir plus d'écho dans les années qui suivent et marque ainsi un retour en grâce de la fonction de production agrégée en économie écologique, comme le montre le chapitre suivant. Le débat de 1997 aurait cependant pu laisser attendre une autre issue via la théorie flux-fonds, et il convient donc d'y revenir dans le chapitre 5.

Du côté de la théorie néoclassique des ressources, Stiglitz ne contribue pas davantage à la réflexion¹¹², mais Solow revient au moins à deux reprises sur le sujet. Dans le premier cas (2009b), il mentionne brièvement les ressources naturelles comme l'un des quatre défis qui devraient être mieux pris en compte dans la théorie de la croissance à l'avenir, aux côtés des services, du commerce international et des inégalités. Toutefois, la deuxième contribution montre que son point de vue sur la question a changé significativement. Il suggère que le concept de « technologie de secours » introduit par Nordhaus dans les années 1970 est « une façon plus sensée et plus réaliste de penser le très long terme que le genre d'exercice cherchant la consommation constante maximale » (2009a, 5). Il questionne ainsi la pertinence des modèles que Stiglitz et lui-même avaient proposé dans les années 1970. La question centrale ne devrait plus être la répartition d'une ressource épuisable sur un horizon temporel infini, mais la transition vers une technologie basée sur une ressource renouvelable, telle que « l'énergie solaire directe, l'éolien, les biocarburants ». Il semble qu'il admet ainsi qu'à long terme, l'augmentation de la productivité d'une ressource épuisable ne peut suffire à compenser son épuisement, et que les modèles des années 1970 n'étaient pas pertinents pour rendre compte de la substitution entre différentes ressources. Bien que Solow ne fasse pas explicitement référence à la controverse avec Georgescu-Roegen et Daly, cela ressemble à une concession de sa part.

112. J'entends par là que Stiglitz ne contribue pas spécifiquement à la littérature sur les ressources naturelles. Il est néanmoins actif sur les questions climatiques (Stiglitz *et al.*, 2017; Stiglitz, 2019).

Chapitre 3

L'énergie et les fonctions de production agrégées

If I may revert to methodological propaganda again, I would like to remind my colleagues and their readers that every piece of empirical economics rests on a substructure of background assumptions that are probably not quite true. For instance, these total-factor-productivity calculations require not only that market prices can serve as a rough-and-ready approximation of marginal products, but that aggregation does not hopelessly distort these relationships. Under those circumstances, robustness should be the supreme econometric virtue; and over-interpretation is the endemic econometric vice.

–Robert M. Solow (1988)

PARMI les travaux empiriques sur les ressources naturelles, ceux qui s'intéressent à l'énergie occupent une place particulièrement importante. Les méthodes économétriques visant à estimer des fonctions de production agrégées ont notamment été centrales dans ce cadre. Du point de vue de la problématique générale de cette thèse, les travaux les plus intéressants sont ceux que je regroupe ici sous le nom de « théorie néo-thermodynamique de la production ». Ce programme de recherche se développe dans les années 2000, autour notamment de Robert Ayres et Reiner Kümmel. Il vise à intégrer la conception thermodynamique de l'économie dans le formalisme des fonctions de production agrégées afin de démontrer empiriquement le rôle central de l'énergie dans la croissance. Cette perspective soulève donc des questions méthodologiques fondamentales quant à la possibilité d'appréhender la dimension physique du processus économique dans un cadre analytique agrégé. Pour saisir pleinement ces enjeux méthodologiques, il s'avère cependant utile, dans un premier temps, de revenir sur des travaux antérieurs. En effet, l'énergie occupe une place particulièrement importante en économie dans les années 1970. Les fonctions de production agrégées sont alors utilisées pour répondre à diverses questions empiriques, telles que celle de la substituabilité entre le capital et l'énergie. S'intéresser à ces travaux permet ainsi de mettre en perspective la théorie néo-thermodynamique de la production d'un point de vue historique et méthodologique. On appréhende ainsi mieux les difficultés à mesurer empiriquement la dépendance énergétique de l'économie à l'aide de fonctions de production agrégées.

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, la question des ressources naturelles devient centrale en économie dans les années 1970. Cette situation est notamment due au débat suscité par le rapport du Club de Rome, *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972). La préoccupation pour l'épuisement des ressources est également présente dans les travaux portant plus spécifiquement sur l'énergie. Cependant, le premier choc pétrolier de 1973, et sa réplique en 1979, vont jouer un rôle encore plus important dans ce domaine ¹¹³.

113. Entre octobre 1973 et janvier 1974, le prix du baril de pétrole est quadruplé par l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP), passant d'environ 3\$ à 12\$ (Parra, 2004). Cette augmentation est décidée en riposte au soutien des pays occidentaux à Israël, dans la guerre qui l'oppose aux pays arabes, et elle entraîne une hausse générale des prix de l'énergie dans le monde. Les États-Unis sont particulièrement visés, car la production de pétrole nationale a passé son pic en 1971 et ne parvient pas à suivre la demande, entraînant une dépendance accrue aux importations (Bardi, 2009).

À cette même époque, les économies industrialisées connaissent toutes un ralentissement de la croissance économique, voire des périodes de récession. La question se pose alors de savoir quel a été le lien entre les deux, ce qui implique de mieux comprendre les relations entre énergie, production et croissance.

L'intérêt pour ce sujet est soutenu par une demande de la part des décideurs publics et s'accompagne de financements importants¹¹⁴. Les principales institutions en charge de la politique énergétique sont créées à cette époque. À titre d'exemple, l'Agence Internationale de l'Énergie et la Federal Energy Administration sont créées en 1974¹¹⁵. Ces différentes institutions sont notamment responsables d'améliorer la récolte et la diffusion des données liées à l'énergie, qui deviennent la source d'un intérêt croissant. La Ford Foundation finance quant à elle un important programme appelé Energy Policy Project, qui publie une quarantaine de rapports entre 1973 et 1978. Comme on le verra par la suite, ce programme mobilise certains des économistes qui vont s'intéresser de près aux questions énergétiques durant cette période, et il leur fournit même les premières données nécessaires pour cela. Dans le milieu académique à proprement parler, l'énergie a temporairement une place importante dans les revues généralistes les plus prestigieuses de la discipline, telles que *The American Economic Review* et *The Review of Economic and Statistics*. En parallèle, cette période voit l'émergence d'un champ spécialisé dans l'analyse économique des questions énergétiques. L'International Association for Energy Economics est créée en 1977, et *The Energy Journal*, qui lui est affilié, en 1980. Une autre revue importante, *Energy Economics*, est publiée pour la première fois en 1979.

Ainsi, la théorie économique a fortement contribué à la manière dont les questions énergétiques ont été appréhendées dans les années 1970. Turnbull (2017, chap. 8) suggère que l'analyse économique standard transforme en profondeur la manière de percevoir les enjeux énergétiques. À la différence des approches antérieures, cette démarche se désintéresse des aspects technologiques et institutionnels, et s'en remet aux méthodes économétriques pour dévoiler la relation sous-jacente entre l'énergie et le processus économique. Dans son analyse, Turnbull montre en particulier comment l'adaptation de la société aux chocs pétroliers a été réduite à l'estimation de l'élasticité de la demande finale en énergie. Ce chapitre prolonge en quelque sorte cette analyse en s'intéressant à deux autres questions qui sont au cœur des débats sur l'énergie dans les années 1970 et au-delà. Premièrement, une controverse naît autour de l'estimation de la substituabilité entre l'énergie et le capital à la suite des résultats divergents obtenus par Berndt et Wood (1975), d'une part, et Griffin et Gregory (1976), d'autre part. Cette controverse se poursuit de manière soutenue jusque dans les années 2000, et soulève du même coup de nombreuses questions méthodologiques. De manière relativement indépendante, mais en se situant dans un cadre théorique semblable, une série de travaux s'intéressent à la rela-

114. James Griffin (1995) témoigne rétrospectivement des spécificités de cette période : « Les années 1970 étaient uniques en ce qu'une question de microéconomie, l'économie de l'énergie, a subitement captivé l'agenda politique. Depuis les années 1930 et la Grande Dépression, l'intérêt des décideurs politiques pour la discipline économique ne s'était pas exprimé aussi vivement. Le financement généreux des recherches sur l'énergie a alimenté une réelle explosion de la recherche liée à l'énergie, attirant un groupe de chercheurs très diversifié. »

115. La Federal Energy Administration devient le Department of Energy en 1977.

tion entre l'énergie et la productivité. À titre d'exemple, deux figures importantes de la comptabilité de la croissance prennent des positions opposées. D'un côté, Dale Jorgenson (Hudson et Jorgenson, 1974, 1978; Jorgenson, 1984) est très intéressé par ces questions et convaincu du rôle central de l'énergie. De l'autre, Edward Denison (1979a) en minimise l'importance et s'en détourne rapidement.

Après avoir occupé une position relativement importante dans la théorie économique dans les années 1970 et au début des années 1980, les questions énergétiques vont progressivement refluer vers des courants spécialisés, en marge de la discipline. En particulier, la théorie néo-thermodynamique de la production va chercher à adapter la fonction de production agrégée afin de mieux rendre compte des aspects physiques du processus de production. Les premières contributions de cette approche sont fournies dès les années 1980 par Reiner Kümmel (Kümmel, 1982, 1989; Kümmel *et al.*, 1985), avant de connaître un regain d'intérêt au début des années 2000, sous l'impulsion d'Ayres (Ayres, 2001; Ayres *et al.*, 2003; Ayres et Warr, 2005). Tout en s'inscrivant clairement dans la conception thermodynamique de l'économie, ils y occupent une place particulière. Ils cherchent en effet à faire entrer la perspective thermodynamique dans le formalisme néoclassique des fonctions de production agrégées afin de démontrer empiriquement le rôle crucial de l'énergie dans la croissance. Ce programme de recherche se poursuit de manière soutenue depuis lors, mais les ouvrages de Ayres et Warr (2009) et Kümmel (2011) en fournissent une première synthèse et permettent de définir une borne temporelle adéquate.

Ce double point de vue, à partir de l'approche néoclassique standard et de sa variante thermodynamique, donne une vision d'ensemble des enjeux méthodologiques que soulèvent la question de l'énergie dans le cadre d'une représentation agrégée de la production¹¹⁶. Ce sont précisément ces enjeux méthodologiques qui sont ici au centre de l'attention. Pour les appréhender, je m'appuie à nouveau sur les deux angles d'analyse présentés dans l'introduction générale. D'un côté, les questions liées à la modélisation sont abordées à travers les deux registres des manipulations et de la représentation. De l'autre, la double dimension physique et économique de la production est analysée au prisme de l'interdisciplinarité entre la thermodynamique et l'économie. Dans la continuité du chapitre précédent, je montre d'abord que la fonction de production agrégée peine à saisir conceptuellement les réalités techniques et physiques de la production. Cette situation est en partie reconnue par les auteurs des travaux en question, ce qui les amène à justifier leur choix d'un modèle agrégé par les possibilités empiriques qu'il offre. Cependant, dans les deux approches, standard et thermodynamique, les résultats empiriques se révèlent être sujets à de sévères limitations. La cohérence globale de la méthodologie sous-jacente à ces approches est donc très fragile.

116. Ce chapitre ne vise pas à rendre compte de l'intégralité des réflexions relatives à l'énergie dans la théorie économique. Il s'intéresse seulement aux approches qui permettent de saisir les enjeux méthodologiques propres à une représentation agrégée de la production. Parmi les questions qui pourraient apparaître proches, on trouve l'explication de la dynamique de l'intensité énergétique de l'économie (Cleveland *et al.*, 1984), ou le sens de la causalité entre l'énergie et la croissance (Stern, 1993). Cependant, ces travaux ne reposent pas de manière aussi explicite sur une représentation agrégée de la production et n'entrent donc pas dans le cadre défini ici. Voir par exemple Stern (2011, 2017) pour une revue plus générale des questions liées à l'énergie en économie.

Dans cette perspective, la section 3.1 s'intéresse à la manière dont l'approche standard s'est emparée de la question de l'énergie à partir des années 1970, tant du point de vue de sa substituabilité avec le capital que de sa relation avec la productivité. La section 3.2 examine quant à elle la façon dont la théorie néo-thermodynamique de la production adapte la fonction de production agrégée pour y donner davantage de place à des considérations physiques. La conclusion souligne une certaine continuité dans les difficultés méthodologiques rencontrées pour traiter la question de l'énergie dans le cadre d'une représentation agrégée de la production.

3.1 L'énergie dans l'approche standard

L'approche standard, ou néoclassique, de la production et de la croissance s'est construite à partir des travaux de Wicksteed (1894), Cobb et Douglas (1928), et Solow (1956), avec lesquels la fonction de production agrégée acquiert progressivement une place centrale (cf. chapitre 2). Tout au long de ces développements, la théorie néoclassique de la production est étroitement liée avec la théorie de la rémunération des facteurs à leur productivité marginale initialement suggérée par Clark (1889). Ce principe de répartition est lui-même censé découler du comportement maximisateur des producteurs. Et c'est bien la combinaison de l'approche agrégée et de cette théorie de la répartition qui constitue l'objet central des « controverses cambridgiennes ».

Outre des développements purement théoriques (cf. chapitre 2), l'approche standard va s'accompagner de nouvelles manières d'analyser empiriquement la production et la croissance. Ainsi, Solow (1957) s'appuie sur la fonction de production agrégée et l'hypothèse de rémunération des facteurs à la productivité marginale pour étudier les contributions respectives du capital et du travail à la croissance¹¹⁷. Il aboutit au résultat paradoxal selon lequel plus des quatre cinquièmes de la croissance ne s'expliquent pas par la croissance des facteurs de production. Ce résidu non expliqué est appelé « productivité totale des facteurs » (TFP), ou « résidu de Solow », et il est associé à une forme de progrès technique. L'explication de ce résidu va alors constituer la question fondatrice de ce qui prend le nom de « comptabilité de la croissance ». À la suite de Solow (1960), une part du progrès technique va être dite « incorporée » dans les nouveaux biens d'équipements, donnant ainsi un rôle plus important à l'accumulation de capital. D'autres travaux, tels que ceux de Denison (1962) et de Jorgenson et Griliches (1967), vont tenir compte du degré d'utilisation du capital et de la qualité du travail. Cela va permettre de mieux expliquer la part de la croissance due aux facteurs de production, et ainsi de réduire la part attribuable au progrès technique « non incorporé »¹¹⁸.

117. Solow n'est pas le premier à réaliser une telle décomposition de la croissance en fonction de la contribution de différents facteurs. Un programme de recherche sur le sujet était notamment actif au National Bureau of Economic Research (NBER) dans les années 1950, auquel Solomon Fabricant, Moses Abramovitz, et John Kendrick ont fourni des contributions importantes. Mais ces premiers travaux ne reposaient pas explicitement sur la fonction de production agrégée. Voir (Crafts, 2009) pour plus de détails.

118. À partir des années 1990, l'analyse de la productivité s'est mise à utiliser davantage les données microéconomiques des firmes, par exemple dans les travaux de Baily *et al.* (1992). Cette démarche

En parallèle, une deuxième question empirique importante voit le jour, à savoir celle de la substituabilité entre le capital et le travail. Arrow *et al.* (1961) introduisent la fonction à élasticité de substitution constante (CES) pour étudier cette question¹¹⁹. En s'appuyant sur l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, ils déduisent une relation entre le niveau des salaires et la part revenant au travail dans la valeur ajoutée. Ils estiment cette équation pour diverses industries à l'aide de données en coupes transversales sur différents pays. L'un de leurs principaux résultats empiriques est que l'élasticité de substitution entre le capital et le travail est significativement inférieure à 1 et supérieure à 0 dans la plupart des industries manufacturières¹²⁰. Ce résultat suggère donc que la capacité du capital à se substituer au travail est limitée.

La littérature qui s'inscrit dans le prolongement de cette contribution fondatrice va cependant produire des résultats contrastés. En utilisant des données régionales sur les États-Unis ou en s'intéressant à l'équation liée à la rémunération du capital, Ferguson (1963) et Bell (1965) trouvent plutôt des élasticités de substitution proches de 1, voire significativement supérieures dans un certain nombre d'industries. D'autres travaux, tels que ceux de David et Klundert (1965) et Weitzman (1970), trouvent des élasticités de substitution faibles à partir de séries temporelles pour les États-Unis et l'Union soviétique. Mais sur des séries temporelles similaires, Berndt et Christensen (1973) trouvent une élasticité supérieure à 1 en utilisant une fonction « logarithmique transcendantale », ou « Translog », introduite à la même époque par Christensen *et al.* (1973)¹²¹. Ces divergences mènent à des tentatives de réconciliation, telles que celle de Berndt (1976), qui met l'accent sur les différences dans la construction des données et les méthodes d'estimation. Néanmoins, au début des années 1970, la diversité des résultats obtenus dans l'estimation de la substituabilité entre le capital et le travail reste mal expliquée.

Malgré cette difficulté, les mêmes outils vont être appliqués à la question de la substituabilité entre le capital et l'énergie qui devient centrale dans les années 1970. Il n'est donc pas étonnant que des divergences similaires en émerge, suscitant notamment une controverse importante dans l'*American Economic Review* entre Griffin et Gregory (1976), d'une part, et Berndt et Wood (1979), d'autre part. Mais certaines caractéristiques spécifiques à la question de l'énergie, notamment les variations de prix et la nécessité de prendre en compte trois facteurs ou plus, vont mettre en évidence plus clairement les enjeux méthodologiques sous-jacents à ces méthodes. C'est ce que montrent les sous-sections 3.1.1 et 3.1.2.

a également amené à relâcher l'hypothèse d'un marché concurrentiel pour se rapprocher des modèles oligopolistiques utilisés en économie industrielle. Il n'est cependant pas directement question de cette littérature ici.

119. Auparavant, deux formes fonctionnelles étaient principalement utilisées, celle à facteurs complémentaires de Leontief et la fonction Cobb-Douglas. Celles-ci correspondent à deux cas particuliers de la fonction CES, où l'élasticité de substitution vaut respectivement 0 et 1. La fonction CES avait également été utilisée auparavant par Solow (1956) pour illustrer son modèle de croissance. Voir également l'annexe B.

120. Arrow *et al.* (1961) réalisent aussi une estimation globale sur la production industrielle aux États-Unis à partir de séries temporelles, qui conclut également à une élasticité significativement inférieure à 1.

121. Voir ci-dessous et l'annexe B pour une présentation de la fonction Translog.

La sous-section 3.1.3 revient quant à elle sur la manière dont la relation entre l'énergie et la productivité est analysée à cette même époque. Si elle ne se structure pas de manière aussi claire en une controverse entre deux camps, cette question voit néanmoins des figures importantes de la comptabilité de la croissance, telles que Jorgenson (Hudson et Jorgenson, 1978) et Denison (1979a), prendre des positions opposées. Dans l'ensemble, les débats autour de la substituabilité et de la productivité permettent de saisir la manière dont l'approche standard appréhende l'énergie, et les questions méthodologiques que soulève une telle démarche.

Notons tout de suite que cette littérature fait peu référence à la littérature théorique sur les modèles de croissance avec ressources naturelles étudiée dans le chapitre 2, et réciproquement. Ces deux littératures partagent pourtant clairement des traits importants. Elles sont fondées sur le formalisme des fonctions de production agrégées, dans lequel elles insèrent les ressources naturelles, au sens large, ou plus spécifiquement l'énergie. Elles mettent également l'accent sur les questions de substituabilité entre le capital et les ressources. Mais malgré ces liens théoriques forts, les deux littératures se développent de manière relativement autonome l'une de l'autre. Cette situation traduit une forme de fragmentation des savoirs au sein de la discipline économique. Elle est d'autant plus étonnante que la possibilité de tester empiriquement les hypothèses des modèles théoriques fait partie des principaux arguments avancés par Stiglitz (1979) pour justifier ces modèles. Il est donc important de voir ce que la littérature empirique nous apprend sur le sujet.

3.1.1 La controverse sur la substituabilité entre le capital et l'énergie

Première contribution et cadre général de la controverse

Exposons tout d'abord les fondements de la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital. Une présentation relativement détaillée des méthodes d'estimation empirique est ici nécessaire pour pouvoir saisir pleinement les enjeux méthodologiques sous-jacents par la suite. La contribution qui va servir de point de départ à cette controverse est celle de Berndt et Wood (1975). Ces derniers s'intéressent à l'industrie manufacturière aux Etats-Unis, entre 1947 et 1971. Ils représentent ce secteur à l'aide d'une fonction de production agrégée à rendements constants, reliant la quantité produite Y , aux quantités de quatre facteurs de production : le capital K , le travail L , l'énergie E , et les autres matériaux intermédiaires M ¹²². Pour cette raison, ce modèle est également connu sous l'acronyme KLEM, et la fonction de production prend donc la forme suivante :

$$Y = F(K, L, E, M) \quad (7)$$

Cependant, Berndt et Wood n'estiment pas directement cette fonction de production agrégée. À partir du début des années 1970, un changement de méthode important

122. Il est à noter que dans les travaux empiriques sur la croissance de cette époque, il est devenu normal de tenir compte du degré d'utilisation du capital, de sorte que K désigne en fait les services rendus par le capital.

intervient dans la littérature sur les fonctions de production. Il est jugé plus adéquat de procéder à l'estimation d'une fonction de coût duale, de sorte que l'estimation de la fonction de production devient *indirecte* (Fuss, 2017). Plus précisément, la fonction de coût associée à un niveau donné de production et à un ensemble de prix pour les facteurs, le coût minimum de production déduit de la fonction de production. Pour l'appliquer à la situation étudiée, il faut donc implicitement supposer que l'industrie manufacturière dans son ensemble se comporte comme un agent qui chercherait à minimiser le coût de production total. L'existence d'une fonction de coût associée à la fonction de production ne va donc pas de soi, mais découle d'un *a priori* théorique. Pour cette raison, je parlerai ici d'« hypothèse de dualité ». Notons que cette hypothèse ne constitue qu'une reformulation de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Ainsi, en pratique, pour trouver la fonction de coût associée à une fonction de production, on passe par les équations de rémunération à la productivité marginale, que l'on résout pour déterminer la combinaison optimale des facteurs de production en fonction des prix.

Formellement, si un niveau de production Y et des prix P_K, P_L, P_E, P_M sont donnés, la fonction de coût duale de la fonction de production ci-dessus est de la forme ¹²³ :

$$C = G(Y, P_K, P_L, P_E, P_M) \quad (8)$$

L'intérêt de la fonction de coût est qu'elle permet de définir des formes fonctionnelles à la fois plus flexibles et suffisamment simples pour être estimées à l'aide des méthodes économétriques habituelles ¹²⁴. En particulier, il est possible de définir des fonctions qui imposent moins de contraintes sur la substituabilité entre les facteurs que la fonction CES, qui suppose que tous les couples de facteurs ont la même élasticité de substitution. Au contraire, au début des années 1970, de nouvelles formes fonctionnelles sont proposées, qui permettent aux élasticités de substitution d'être différentes selon le couple de facteur. C'est notamment le cas de la fonction Translog utilisée par Berndt et Wood ¹²⁵. Dans le cadre du modèle KLEM, celle-ci prend la forme suivante ¹²⁶ :

$$\begin{aligned} \ln C &= \ln \alpha_0 + \ln Y + \sum_i \alpha_i \ln P_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \gamma_{ij} \ln P_i \ln P_j, \\ \sum_k \alpha_k &= 1, \forall i, j, \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \sum_k \gamma_{ik} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Pour obtenir des équations linéaires qui puissent être estimées par les méthodes économétriques standards, il est nécessaire de s'intéresser aux parts de chaque facteur dans

123. Voir l'annexe B pour davantage de précisions sur les fonctions de coût duales, et plus généralement sur les éléments formels utilisés dans cette partie.

124. Cette justification est donnée par Fuss (2017) pour expliquer le recours croissant aux fonctions de coût dans les estimations empiriques à partir des années 1970. Berndt et Wood eux-mêmes ne justifient pas explicitement cette démarche dans leur article. Elle semble aller de soi.

125. Les fonctions « généralisées » de Leontief, de Cobb-Douglas, ou de McFadden ont des propriétés similaires (Fuss, 2017).

126. Dans les équations qui suivent, les indices i et j parcourent systématiquement l'ensemble des valeurs K, L, E, M .

le coût total, appelées ici « parts en valeur », et notées S_K , S_L , S_E , et S_M . Pour cela, on utilise le lemme de Shephard, selon lequel la quantité demandée de chaque facteur est égale à la dérivée partielle de la fonction de coût par rapport au prix de ce facteur. On obtient alors le système d'équations suivant :

$$\forall i, S_i = \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln P_j \quad (10)$$

Ce sont ces fonctions de demande qui sont estimées par Berndt et Wood à l'aide d'une variante de la méthode des moindres carrés¹²⁷. Les données nécessaires pour réaliser ces estimations sont les séries temporelles des prix des facteurs et de leurs parts en valeur dans la production manufacturière, entre 1947 et 1971. Pour cela, il est nécessaire de partir de données détaillées sur les flux intersectoriels de marchandises, et d'agréger les flux qui correspondent à un même facteur de production dans le modèle KLEM. Plus précisément, Berndt et Wood utilisent les données spécialement réunies par Faucett (1973) dans le cadre du Energy Policy Project de la Ford Foundation, auquel Berndt participe également pour le rapport de Jorgenson *et al.* (1973)¹²⁸. À partir de ces données détaillées, Berndt et Wood construisent eux-mêmes les indicateurs agrégés pour les quatre facteurs du modèle KLEM, en agrégeant les éléments qui appartiennent à une même catégorie (biens d'équipement, travail, énergie, biens intermédiaires). Ils utilisent pour cela la méthode d'agrégation de Divisia, qui tient compte des prix et des changements de qualité des éléments qui sont agrégés. Il s'agit donc d'une méthode d'agrégation purement économique, y compris pour l'indice agrégé de l'énergie. Ce point est particulièrement important, car nous verrons par la suite que la théorie néo-thermodynamique de la production revendique au contraire une méthode d'agrégation physique.

Une fois les estimations économétriques des paramètres de la fonction de coût réalisées, il est possible d'en déduire les valeurs de différentes mesures de la substituabilité entre les facteurs. Deux mesures sont examinées par Berndt et Wood. Premièrement, ils s'intéressent à l'élasticité de substitution partielle d'Allen (AES) entre les facteurs i et j , notée σ_{ij} ¹²⁹. Dans le cas de la fonction de coût Translog, cette élasticité s'exprime sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_i S_j} + 1, i \neq j \quad (11)$$

La deuxième mesure de la substituabilité est donnée par l'élasticité de la demande en facteur i par rapport au prix du facteur j , notée η_{ij} . Dans le cadre de la fonction

127. Plus précisément, pour contourner le problème d'endogénéité des prix, Berndt et Wood recourent à des variables instrumentales. Ils utilisent ensuite une itération de la méthode des moindres carrés en trois étapes (« *iterative three-stage least squares* » ou I3SLS).

128. Les données de Faucett sont produites à partir d'informations issues du US Bureau of Mines, du US Bureau of Census, et des tableaux input-output du Department of Commerce. Il semble que les données de Faucett soient à l'époque l'une des principales sources d'information. Elles sont également utilisées par Hudson et Jorgenson (1974).

129. Cette élasticité est une des généralisations possibles de l'élasticité de substitution définie par Hicks dans le cas de deux variables. Voir l'annexe B pour une présentation plus détaillée.

Translog, elle vérifie l'équation :

$$\eta_{ij} = S_j \sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_i} + S_j, i \neq j \quad (12)$$

Sur la période allant de 1947 à 1971, les résultats empiriques de Berndt et Wood suggèrent que l'énergie et le capital sont plutôt des facteurs complémentaires¹³⁰. Quand le prix de l'énergie augmente, toutes choses égales par ailleurs, les quantités des deux facteurs devraient donc diminuer. La substituabilité entre l'énergie et le travail apparaît plus importante, mais elle reste tout de même limitée¹³¹. Ainsi, la quantité de travail devrait augmenter lorsque le prix de l'énergie augmente, toutes choses égales par ailleurs.

En conclusion de leur article, Berndt et Wood s'intéressent brièvement aux implications de leurs résultats en ce qui concerne l'impact de diverses politiques économiques sur la consommation d'énergie. Ils notent en particulier que les subventions à l'investissement en capital devraient plutôt avoir l'effet d'augmenter la consommation d'énergie, étant donné que les deux facteurs sont complémentaires. Dès lors, « dans la mesure où la préservation de l'énergie devient un objectif politique conscient, des incitations générales à investir pourraient devenir moins attractives en tant que stimulants fiscaux » (Berndt et Wood, 1975, 267). Cette conclusion insiste donc sur la question de l'épuisement des ressources et des moyens pour lutter contre. Cependant, de façon étonnante, Berndt et Wood ne mentionnent à aucun moment les modèles théoriques de Solow et Stiglitz (cf. chapitre 2). Pourtant, leurs résultats vont à l'encontre de l'une des hypothèses centrales de ces modèles, à savoir la productivité illimitée des ressources. Dès lors que l'élasticité de substitution entre le capital et les ressources est inférieure à 1, la substituabilité est insuffisante pour garantir que l'accumulation de capital permette de compenser l'épuisement des ressources à long terme¹³². L'absence de référence explicite à cette question souligne donc une forme de fragmentation entre les littératures théorique et empirique sur les ressources naturelles.

Résultats divergents et tentatives d'explication

La pertinence des résultats de Berndt et Wood concernant la complémentarité entre l'énergie et le capital va rapidement être contestée par Griffin et Gregory (1976). Selon eux, le principal problème est qu'une estimation à partir de séries temporelles ne permet d'évaluer que les capacités de substitution de court terme. Ils entendent par là que les ajustements se font alors par une modification du degré d'utilisation des capacités, et non par un changement qualitatif des biens d'équipement. Or, à équipement donné, la quantité d'énergie consommée est complémentaire de la durée d'utilisation. Pour Griffin

130. L'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie σ_{KE} se situe aux alentours de $-3,2$ et l'élasticité de la demande en capital par rapport au prix de l'énergie η_{KE} est proche de $-0,15$.

131. L'élasticité de substitution entre le travail et l'énergie σ_{LE} est en moyenne de $0,65$ et l'élasticité de la demande en travail par rapport au prix de l'énergie η_{LE} de $0,03$.

132. Cette implication est particulièrement importante pour le modèle de Solow, qui repose exclusivement sur ce mécanisme de substitution. Dans le modèle de Stiglitz, le progrès technique peut compenser l'épuisement des ressources, même en l'absence d'une forte substituabilité.

et Gregory, cet aspect explique les résultats trouvés par Berndt et Wood¹³³. À l'inverse, ils proposent d'évaluer les capacités de substitution de long terme entre l'énergie et le capital. Pour cela, ils suggèrent qu'il est plus pertinent de réaliser une estimation sur la base de données en coupe transversale, et ils choisissent d'étudier le secteur manufacturier de neuf pays industrialisés en 1955, 1960, 1965, et 1969. Selon eux, au sein de chaque pays, les prix de l'énergie dépendent de politiques de long terme, auxquelles les producteurs peuvent réellement adapter le choix de leurs biens d'équipement.

L'une des difficultés rencontrées par Griffin et Gregory concernent la disponibilité des données internationales nécessaires à une telle estimation. Ainsi, ils mentionnent que leurs « données ont été assez laborieusement recueillies auprès d'une grande variété de sources » (1976, 850). En particulier, ils ne disposent pas des données sur les matériaux intermédiaires. Par conséquent, Griffin et Gregory réalisent leurs estimations sur un modèle n'incluant que les facteurs K , L , et E . Mis à part cela, ils utilisent la même fonction de coût Translog que Berndt et Wood, et leurs données sont également obtenues par la méthode d'agrégation de Divisia¹³⁴. Leurs résultats donnent alors à voir des points communs et des différences par rapport à ceux de Berndt et Wood. D'un côté, le degré de substituabilité entre l'énergie et le travail est similaire, quoi que légèrement plus élevé¹³⁵. De l'autre, Griffin et Gregory trouvent que l'énergie et le capital sont substituables et non complémentaires¹³⁶. Dans ce cas, une hausse du prix de l'énergie implique donc, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du niveau de capital et une baisse de la consommation d'énergie, de sorte qu'un mécanisme de substitution est effectivement à l'œuvre. Ces résultats sont donc cohérents avec l'intuition initiale de Griffin et Gregory, selon laquelle l'estimation sur des données en coupe transversale internationale permet de mesurer une substituabilité de long terme plus élevée que celle de court-terme.

En réponse, Berndt et Wood (1979) vont proposer une autre interprétation des différences entre leurs estimations et celles de Griffin et Gregory. Cette interprétation repose pour l'essentiel sur la distinction entre deux types d'élasticité. Les élasticité *nettes*, de prix ou de substitution, sont calculées en prenant en compte les quatre facteurs K , L , E et M . Les élasticité *brutes* sont calculées en prenant uniquement en compte K , L et E ¹³⁷. Berndt et Wood montrent alors que les élasticité nettes sont nécessairement inférieures aux élasticité brutes. Cela permet selon eux d'expliquer en partie les divergences entre leurs résultats, qui correspondent à des élasticité nettes, et ceux de Griffin et Gregory, qui correspondent à des élasticité brutes, car ils omettent la variable M . Ils mesureraient donc simplement des élasticité différentes, mais leurs résultats ne seraient pas fondamentalement contradictoires.

133. Griffin et Gregory considèrent également que les variations de prix dans les données de Berndt et Wood sont trop faibles pour permettre une estimation de qualité.

134. Cependant, Griffin et Gregory réalisent leurs estimations par itération de la procédure efficiente de Zellner (« *iterative Zellner efficient procedure* » ou IZEF) et n'utilisent pas de variables instrumentales.

135. L'élasticité de substitution entre le travail et l'énergie σ_{LE} varie de 0,72 à 0,87 selon les pays, et l'élasticité de la demande en travail par rapport au prix de l'énergie η_{LE} de 0,05 à 0,15.

136. L'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie σ_{KE} est entre 1,02 et 1,07, et l'élasticité de la demande en capital par rapport au prix de l'énergie η_{KE} entre 0,08 et 0,17.

137. Voir l'annexe B pour une définition formelle des élasticité nettes et brutes.

Griffin (1981) réplique par un court commentaire, dans lequel il suggère que la distinction entre élasticités brutes et nettes est insuffisante pour expliquer les différences entre leurs estimations respectives. Il souligne notamment que si l'on suit la logique de Berndt et Wood, il ne devrait pas y avoir de différence entre deux estimations d'un modèle KLE réalisées respectivement sur des données en coupe transversale et avec des séries temporelles. Il procède alors à l'estimation d'un modèle KLE à l'aide des séries temporelles de Berndt et Wood pour les États-Unis. Il trouve ainsi une élasticité de substitution entre le capital et l'énergie plus élevée que l'estimation de Berndt et Wood (1975), mais encore loin de celle de Griffin et Gregory (1976)¹³⁸.

En réponse à ce commentaire, Berndt et Wood (1981) admettent que la distinction entre élasticités brutes et nettes ne permet pas d'expliquer intégralement les différences entre les estimations, mais qu'elle y contribue significativement. Ils contre-attaquent cependant sur deux points. Tout d'abord, ils questionnent l'idée que les différences puissent être mieux expliquées par la distinction entre court terme et long terme de Griffin et Gregory. Selon eux, cette question demande à être traitée dans un modèle représentant explicitement les ajustements dynamiques. S'appuyant sur les résultats obtenus par Morrison et Berndt (1981) dans ce domaine, ils suggèrent au contraire que la complémentarité serait plus forte dans le long terme. Cela remettrait donc en cause la conception intuitive qu'ont Griffin et Gregory des rapports entre les substituabilités de court terme et long terme.

Par ailleurs, Berndt et Wood (1981) suggèrent que les différences d'estimation peuvent également s'expliquer par des différences dans la construction des données. Ils remarquent notamment que leur mesure de la rémunération du capital inclut les impôts, tandis que celle de Griffin et Gregory ne les prend pas en compte. Pour que les estimations soient comparables, ils ajustent leurs données aux critères utilisés par Griffin et Gregory, et ils estiment un modèle KLE sur ces nouvelles séries temporelles. Ils obtiennent alors une substituabilité entre le capital et l'énergie proche de celle initialement trouvée par Griffin et Gregory¹³⁹. Cela démontre selon eux que les différentes méthodes de construction des données jouent un rôle important dans les estimations. Cependant, ils reconnaissent qu'un écart inexpliqué demeure et que « la raison pour laquelle ces différences persistent est mystérieuse » (Berndt et Wood, 1981, 1109)¹⁴⁰.

Au début des années 1980, la controverse sur la substituabilité entre le capital et

138. Griffin trouve une élasticité de substitution brute entre le capital et l'énergie σ_{KE}^* de $-1,31$. Pour rappel, Berndt et Wood trouvent une élasticité de substitution nette σ_{KE} de $-3,2$, et Griffin et Gregory trouvent une élasticité de substitution brute de $1,07$.

139. Berndt et Wood trouvent une élasticité brute de la demande de capital par rapport au prix de l'énergie η_{KE}^* égale à $0,05$, après avoir ajusté leurs séries temporelles aux données de Griffin et Gregory. Pour rappel, Griffin et Gregory avaient obtenu une élasticité prix brute de $0,13$ avec leurs données en coupe transversale. Berndt et Wood avaient initialement obtenu une élasticité prix nette η_{KE} de $-0,14$.

140. L'estimation de η_{KE}^* à $0,05$ pourrait par ailleurs donner l'impression que Berndt et Wood acceptent l'idée que l'énergie et le capital sont légèrement substituables, mais il n'en est rien. D'une part, ils continuent à penser que l'élasticité nette est une meilleure mesure de la substituabilité, et celle-ci est nécessairement inférieure. D'autre part, ils concluent en suggérant que les données devraient plutôt être construites à l'aide de leur méthode. Il leur est simplement plus facile d'ajuster leurs propres données aux critères de Griffin et Gregory que l'inverse.

l'énergie interroge donc la capacité des méthodes économétriques à révéler la structure productive de l'économie. Différentes raisons sont suggérées pour expliquer les divergences entre les estimations. Mais elles ne parviennent pas à expliquer complètement ces divergences, et aucune raison ne semble faire réellement consensus. Ces débats amènent par ailleurs à déconstruire l'idée d'une définition univoque de la substituabilité entre les facteurs. Au contraire, la substituabilité peut être brute ou nette, de court terme ou de long terme. Par ailleurs, les estimations de la substituabilité dépendent fortement de la construction des données. Ces éléments remettent en cause une vision simpliste de la place des méthodes empiriques en économie. Les méthodes économétriques ne constituent pas un instrument de mesure transparent et dépourvu de toute ambiguïté, mais au contraire le produit d'une interaction complexe entre la théorie, le modèle et les données. Il n'est donc pas possible de prétendre que les résultats donnent à voir une propriété intrinsèque du processus économique. Ils constituent plutôt le fruit d'une construction théorique et statistique dont les liens avec la réalité économique demandent à être explorés davantage.

3.1.2 Enjeux méthodologiques de la controverse et de ses prolongements

La controverse sur l'estimation empirique de la substituabilité entre l'énergie et le capital s'est poursuivie de manière soutenue au moins jusqu'au début des années 2000. Les estimations se sont diversifiées en ce qui concerne les zones géographiques et le périmètre (pays, secteur, entreprises, etc.), tout en conservant une certaine unité méthodologique. Dans leur méta-analyse, Koetse *et al.* (2008) ont sélectionné 34 publications différentes réalisées entre 1975 et 2002, qui leur fournissent 317 estimations d'élasticités prix. Parmi celles-ci, un plus grand nombre trouve une élasticité positive, synonyme de substituabilité, mais le nombre d'estimations négatives est également significatif. Des revues de littérature ont par ailleurs été réalisées périodiquement (Apostolakis, 1990; Frondel et Schmidt, 2002). Je ne cherche pas ici à faire un examen exhaustif de cette littérature, mais plutôt à approfondir les enjeux méthodologiques sous-jacents.

Une notion de substitution équivoque

Pour commencer, il apparaît important de saisir comment se situent ces travaux par rapport au registre de la représentation, c'est-à-dire en ce qui concerne la relation entre la fonction de production agrégée et le processus de production réel qu'elle vise à décrire. Nous allons voir que nous retrouvons ici nombre des difficultés identifiées dans la théorie néoclassique des ressources. En particulier, la fonction de production agrégée est entourée d'une grande opacité conceptuelle qui fragilise l'interprétation que l'on peut faire des résultats empiriques sur la substituabilité entre le capital et l'énergie.

La question de la légitimité de la fonction de production agrégée comme représentation formelle du processus de production n'est abordée que de façon marginale dans les premières contributions à la controverse. Néanmoins, dès le début de leur article Griffin et Gregory (1976, 845) reconnaissent que « l'existence d'une fonction de coût agrégée pourrait être questionnée ». Ils insèrent notamment une référence explicite à la critique

de Fisher (1969) (cf. chapitre 2). Puis, en conclusion, ils suggèrent que les « différences de substitution entre formes d'énergie pourraient exclure le recours à une variable agrégée » (855). Cette question est à nouveau mentionnée par Griffin (1981, 1102), mais il estime que « l'hypothèse d'un agrégat d'énergie permet des simplifications théoriques et empiriques considérables qui compensent probablement le sacrifice en matière de réalisme ». Pour ces auteurs, la légitimité de la fonction de production agrégée ne repose donc pas sur l'existence de fondements théoriques solides, mais sur les outils empiriques qu'elle permet de mettre en œuvre. Dit autrement, ils reconnaissent sa fragilité quant au registre de la représentation, c'est-à-dire en ce qui concerne sa portée descriptive du processus de production. Cette fragilité est supposée être compensée par le fait que la fonction de production agrégée se soumet aisément à des méthodes économétriques, et permet ainsi de confronter la théorie aux données empiriques.

En ce qui concerne plus particulièrement l'agrégation de l'énergie, il faut rappeler que ces travaux s'appuient sur des méthodes d'agrégation par les prix et non sur des mesures physiques. Plus généralement, il convient de souligner l'absence de références à la signification physique du concept d'énergie et de réflexion sur son rôle spécifique dans le processus de production, à la différence de la conception thermodynamique de l'économie. Dans l'approche standard, l'intérêt pour la question de l'énergie apparaît comme une réaction pragmatique aux chocs pétroliers, que les auteurs cherchent à analyser dans le cadre pré-existant de la théorie néoclassique de la production. L'énergie est simplement introduite comme un facteur de production parmi d'autres, et on lui applique les outils formels et les méthodes empiriques habituelles. Comme dans le cas des modèles de croissances étudiés dans le chapitre 2, l'approche standard se caractérise ici par une démarche d'expansion « dérivationnelle » au sens de Mäki (2009a). Cette démarche consiste à appliquer les outils standards de la théorie économique dans un domaine qui relève *a priori* plutôt de la physique et de l'ingénierie, sans se préoccuper de ce que ces disciplines ont à dire sur le sujet. Les réalités techniques concrètes de la production sont ainsi écartées au profit d'une manière abstraite et indirecte d'appréhender le processus de production. Cette approche se caractérise ainsi par une forme faible d'interdisciplinarité, au sens où l'interaction entre les disciplines est réduite au minimum (Klein, 2010).

Dans le registre de la représentation, il est également important de s'interroger sur la signification attribuée à la notion de substitution dans ces travaux. La distinction entre substituabilité de court terme et de long terme est particulièrement importante de ce point de vue. Griffin et Gregory la présentent de la manière suivante :

For existing capital equipment, the energy input per hour of capital service is likely to be fairly constant. Thus it would not be surprising if higher energy prices were to induce increases in labor and material inputs and a corresponding reduction in the utilization of capital in the short run. In other words, short-run cost functions are likely to show E and L, M to be substitutes and E and K as complements. On the other hand, in the long run, one might expect K and E to be substitutes since new equipment could be designed to achieve higher thermal efficiencies but at greater capital costs. (Griffin et Gregory, 1976, 846)

La distinction entre court terme et long terme est donc une distinction entre des ajustements qui ne concernent que le niveau d'utilisation du capital, et des ajustements qui concernent le type de capital utilisé. Griffin et Gregory reconnaissent ainsi qu'à l'échelle d'un bien d'équipement spécifique, il y a nécessairement une forme de complémentarité entre l'énergie et le capital. Ce n'est que dans le cas où les biens d'équipement changent qu'il peut y avoir une amélioration de l'efficacité énergétique. De ce point de vue, la fonction de production agrégée est problématique à au moins deux égards. D'une part, étant donné que la variable K y désigne les services fournis par le capital, elle combine le taux d'utilisation et la quantité de capital, dont les effets ne peuvent plus réellement être distingués. D'autre part, il n'y a pas de distinction explicite entre deux types de capital qui différencieraient par leur intensité énergétique. Les mécanismes sous-jacents suggérés par Griffin et Gregory pour donner un sens à la notion de substitution ne peuvent donc pas être représentés explicitement dans la fonction de production agrégée.

Cette difficulté est indirectement perçue par Berndt et Wood lorsqu'ils questionnent l'idée que la substituabilité est nécessairement plus importante dans le long terme que dans le court terme. Là où Griffin et Gregory (1976, 855) qualifiaient leur explication d'« intuitive », Berndt et Wood considèrent qu'elle demande à être analysée plus rigoureusement à partir de modèles d'ajustements dynamiques. C'est notamment ainsi que procèdent Morrison et Berndt (1981). Après estimation de leur modèle, ils concluent au contraire que la complémentarité est plus importante dans le long terme que dans le court terme. Ces résultats vont donc à l'encontre de l'intuition initiale de Griffin et Gregory¹⁴¹. Plutôt que de clore la question, l'approche par les modèles dynamiques ouvre donc tout un nouveau champ d'exploration. Les rapports de la notion de substitution avec la distinction entre court terme et long terme demeurent une source de débats.

L'une des voies suggérée pour sortir de ces difficultés et pour résoudre la controverse empirique, consiste à désagréger le modèle à tous les niveaux : les secteurs de demande d'énergie, les formes d'énergie, les équipements en capital, et même les travailleurs (Apostolakis, 1990). Comme dans le chapitre 2, on retrouve ici l'idée que la substitution repose en fait sur une multiplicité de mécanismes dont les modèles agrégés peinent à rendre compte : substitution entre les formes d'énergies, entre les types de capital, entre les demandes finales de bien, etc. L'effet agrégé est la combinaison de ces différents mécanismes sous-jacents. Les estimations de la substituabilité entre le capital et l'énergie au niveau agrégé ne peuvent donc pas être interprétées de manière transparente. Il est impossible de savoir lequel des mécanismes sous-jacents a été le plus important.

Ce dernier aspect est bien illustré par la contribution théorique de John L. Solow (1987)¹⁴². J.L. Solow s'intéresse aux changements dans la composition de la demande finale de produits en réponse à un choc sur le prix de l'énergie. Il montre qu'ils peuvent induire au niveau agrégé des phénomènes de complémentarité ou de substituabilité, selon

141. Dans sa revue de la controverse, Apostolakis (1990) présente cependant d'autres modèles d'ajustements dynamiques. Certains d'entre eux intègrent au niveau purement théorique l'idée que la substituabilité est plus forte dans le long terme, avant même qu'aucune estimation ne soit réalisée.

142. Comme il est également souvent question des travaux de Robert M. Solow dans cette thèse, il est important de souligner qu'il s'agit là d'un autre économiste. Pour éviter toute confusion, les initiales J.L. sont utilisées lorsqu'il est question John L. Solow.

les situations. J.L. Solow s'appuie pour cela sur un modèle d'équilibre général dans lequel deux biens sont produits par des technologies à facteurs complémentaires, mais dont l'intensité énergétique de la production diffère. La hausse des prix de l'énergie affecte les prix relatifs des biens et modifie la demande. Il distingue alors deux effets. Premièrement, individuellement, chaque consommateur va consommer relativement moins du bien le plus intensif en énergie, et plus de l'autre. Deuxièmement, la hausse des prix entraîne un changement de répartition des revenus entre la demande domestique et la demande étrangère, en faveur de la dernière. Si celle-ci a une demande en bien le plus intensif en énergie structurellement plus élevée que la demande domestique, alors les deux effets sont contradictoires. Le résultat au niveau agrégé va donc dépendre du poids respectif de chacun des effets, et peut donner lieu à des ajustements qui s'apparentent à une complémentarité ou à une substituabilité des facteurs. Cependant, pour J.L. Solow, ces phénomènes au niveau agrégé ne sont pas le résultat de ce que l'on a l'habitude de considérer comme relevant de la substitution entre deux facteurs :

One lesson to take from this analysis is that estimates of factor substitutability based on aggregate data are misleading because they capture more than simply technological substitution. On this view, none of the various empirical measures of factor substitutability is correct ; they are not measuring what they want. (J.L. Solow, 1987, 612)

Le présupposé de cette affirmation est que les études empiriques visaient à mesurer spécifiquement la substituabilité liée aux modifications techniques des processus de production¹⁴³. Cependant, ce que l'on peut plutôt retenir de la contribution de J.L. Solow, c'est que la notion de substitution au niveau agrégé peut reposer sur différents mécanismes au niveau désagrégé. De ce point de vue, le principal défaut des travaux empiriques est de ne pas avoir approfondi cette question au niveau conceptuel, laissant un certain flou autour de la notion de substitution. C'est d'autant plus important que cette dimension conceptuelle détermine la manière dont les résultats empiriques peuvent ensuite être interprétés¹⁴⁴.

Par ailleurs, la notion de substitution est également plurielle sur un plan strictement formel. C'est ce que révèle la contribution de Thompson et Taylor (1995) à la controverse sur la substituabilité entre le capital et l'énergie. Pour Thompson et Taylor, la controverse repose sur un choix inapproprié d'indicateur de substituabilité. Ils proposent de s'intéresser à l'élasticité de substitution de Morishima (MES), plutôt que l'élasticité de substitution partielle d'Allen (AES)¹⁴⁵. Ces deux élasticités constituent simplement deux manières différentes de généraliser à plusieurs variables le concept d'élasticité de substitution défini par Hicks dans le cas de deux variables. Thompson et Taylor reprennent

143. C'est effectivement ce qui transparaît des quelques indices fournis par la littérature en la matière, notamment lorsque Griffin et Gregory envisagent la substitution de long terme comme le produit d'un renouvellement des biens d'équipement.

144. Considérons par exemple le résultat empirique obtenu par Morrison et Berndt (1981), selon lequel la substituabilité est plus faible dans le long terme que dans le court terme. Si l'on imagine que le mécanisme envisagé par J.L. Solow agit principalement dans le long terme, alors il pourrait expliquer en partie ce résultat paradoxal.

145. Voir l'annexe B pour les définitions formelles de ces deux élasticités.

alors les résultats d'un certain nombre d'estimations empiriques antérieures qui laissaient apparaître des disparités importantes d'AES. En calculant les MES correspondantes, ils concluent que les disparités diminuent si l'on utilise cet indicateur. Cependant, contrairement à ce qu'ils suggèrent eux-mêmes, Thompson et Taylor ne résolvent pas vraiment la controverse. D'une part, leur approche ne permet pas de réconcilier les estimations des élasticités prix, or celles-ci constituent un indicateur de substituabilité tout aussi important dans la littérature. D'autre part, leur démarche laisse de côté la principale difficulté. En effet, les différences d'AES traduisent un problème plus général, à savoir l'identification de deux fonctions de production différentes pour un même endroit et au même moment. Le fait que d'autres grandeurs caractéristiques de ces fonctions soient plus proches ne dissipe pas ce problème fondamental.

L'intérêt de la contribution de Thompson et Taylor réside plutôt dans le fait qu'elle souligne à nouveau le caractère équivoque de la notion de substitution dans le cadre des fonctions de production agrégées. Au niveau formel, trois indicateurs différents sont proposés pour en rendre compte : les élasticités prix, les AES, et les MES. Au niveau conceptuel, le degré de substitutabilité au niveau agrégé peut être le produit de plusieurs mécanismes allant d'un réel changement technique à une modification dans la structure de la demande finale. Ces éléments renforcent la déconstruction de la notion de substitution déjà analysée plus haut, autour des distinctions entre substituabilité brute et nette, et entre substituabilité de court terme et de long terme. On assiste dans l'ensemble à un éclatement du concept de substitution qui questionne la possibilité d'interpréter les résultats des estimations empiriques de manière univoque.

Dans le prolongement du chapitre 2, ces remarques soulignent les faiblesses de la fonction de production agrégée en ce qui concerne le registre de la représentation. Les difficultés à donner un sens clair et précis à la notion de substitution découlent d'une forme de déconnexion vis-à-vis des réalités techniques de la production. L'approche standard ne discute pas de manière approfondie la manière dont les différents facteurs, et en particulier l'énergie, entrent dans la production. La fonction de production efface les différences qualitatives entre des biens hétérogènes et masque ainsi les effets des changements dans la structure productive. Cet aspect du problème est certes reconnu par certaines contributions critiques, telles que celle de J.L. Solow. Néanmoins, dans l'ensemble, la littérature empirique sur la substituabilité entre le capital et l'énergie tend à ignorer ou sous-estimer ces problèmes¹⁴⁶.

Notons également que la soutenabilité faible apparaît d'autant plus problématique de ce point de vue (cf. chapitre 2). Les éléments qui précèdent montrent que la notion de substitution est déjà équivoque lorsque l'on parle uniquement de la substituabilité entre le capital et les ressources naturelles. Or, la soutenabilité faible place la notion de substitution à un niveau encore plus général et abstrait, celui de substituabilité entre capital artificiel et capital naturel. Elle prend ainsi le risque d'accroître encore les difficultés conceptuelles entourant la notion de substitution.

146. À titre d'illustration, Koetse *et al.* (2008) ne mentionnent pas la critique de J.L. Solow dans leur méta-analyse.

Les estimations empiriques comme produit d'un artifice théorique

La situation décrite ci-dessus découle en partie du fait que les travaux empiriques sur l'énergie accordent beaucoup plus d'importance au registre des manipulations. D'après les différentes « fonctions » des modèles proposées par Morgan et Morrison (1999b), la principale fonction en question ici est celle d'un *instrument de mesure*. Ainsi, la fonction de production agrégée est perçue comme un moyen commode d'évaluer quantitativement la relation entre les différents éléments du processus de production. La mesure est ici indirecte, c'est-à-dire que le degré de substituabilité ne se donne pas d'emblée sous une forme accessible. Il nécessite au contraire de passer par des données sur les prix et les quantités des facteurs pour être appréhendé. Cette démarche suppose qu'il existe un lien théorique entre les données disponibles et la relation que l'on souhaite mesurer. Par nature toute mesure indirecte est donc sujette à la question de savoir si l'on mesure bien ce que l'on souhaite mesurer. Si la controverse ci-dessus a attiré tant d'attention, c'est précisément parce que les résultats divergents obtenus soulignent les difficultés à répondre à cette question.

Près de trente ans après le début de la controverse, Frondel et Schmidt (2002) proposent un point de vue très critique sur cette question. Ils affirment que les résultats des estimations sont le produit d'un artifice théorique, dont la source se trouve dans le recours à la fonction de coût duale pour estimer la substituabilité entre le capital et l'énergie. Leur argument s'appuie sur l'expression de l'élasticité prix η_{ij} donnée par la formule (12). Lorsqu'elle est appliquée à l'élasticité de la demande en capital par rapport au prix de l'énergie, celle-ci prend la forme :

$$\eta_{KE} = \frac{\gamma_{KE}}{S_K} + S_E \quad (13)$$

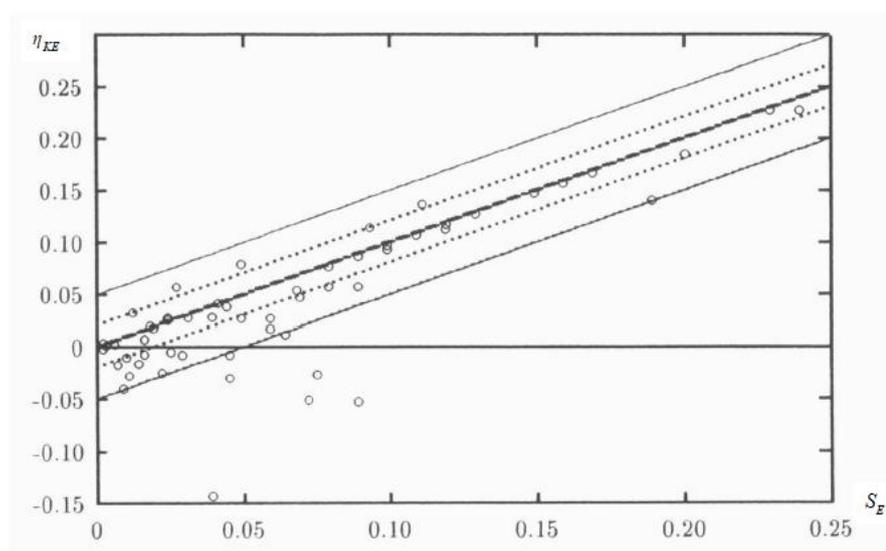
Frondele et Schmidt remarquent alors que d'après cette équation, l'élasticité prix devrait être proche de la part en valeur de l'énergie S_E . En effet, le paramètre estimé du modèle γ_{KE} est en général de faible amplitude¹⁴⁷. En particulier, sa valeur absolue est largement inférieure à la part en valeur du capital S_K . Par conséquent, le premier terme dans la partie droite de l'équation aurait peu d'influence, et ce serait le terme S_E qui dicterait l'amplitude de l'élasticité prix estimée. Dit autrement, lorsque S_E est élevée, l'élasticité prix η_{KE} devrait l'être également. Et lorsque S_E est faible, η_{KE} devrait être proche de 0, voire négative. De plus, cette relation est d'autant plus forte que S_K est grand par rapport à la valeur absolue de γ_{KE} .

Pour tester la pertinence de leur analyse, Frondel et Schmidt vérifient qu'elle est cohérente avec les estimations empiriques réalisées par le passé. Ils considèrent pour cela soixante-neuf estimations, dont ils reproduisent les résultats sur le graphique présenté dans la figure 3.1. Dans ce graphique, les résultats des estimations sont situés en fonctions de la part en valeur S_E sur l'axe des abscisses et de l'élasticité prix η_{KE} sur l'axe des ordonnées. Le trait oblique en gras correspond à la diagonale principale, c'est-à-dire au cas où les deux valeurs en abscisse et en ordonnée sont égales. La distance à cette diagonale

147. Chez Berndt et Wood (1975) par exemple, γ_{KE} est égal à $-0,0102$. Tandis que chez Griffin et Gregory (1976), il est de $0,0167$.

permet donc de visualiser dans quelle mesure les élasticités prix estimées diffèrent de la part en valeur de l'énergie. À un niveau général, les différentes estimations se répartissent de manière relativement claire le long de cette diagonale, validant l'explication avancée par Frondel et Schmidt¹⁴⁸. L'estimation de Berndt et Wood (1975) est celle qui obtient l'écart le plus important, avec une différence de 0,20 entre S_E et η_{KE} . Pour Frondel et Schmidt, cela s'explique avant tout par le fait que $S_K = 0,05$ est faible en comparaison des autres études, ce qui permet à l'élasticité prix de dévier significativement de la part en valeur de l'énergie. Ce cas illustre également le fait que les estimations peuvent conclure à une complémentarité entre l'énergie et le capital uniquement sous des conditions très particulières. Pour que l'élasticité prix soit négative, il faut que S_E et S_K soient faibles, et que le coefficient estimé γ_{KE} soit négatif. Il est donc normal qu'un nombre plus important d'études trouvent que l'énergie et le capital sont substituables.

FIGURE 3.1 – La relation entre l'élasticité prix η_{KE} et la part en valeur de l'énergie S_E



Source : Frondel et Schmidt (2002, 63)

L'argument ci-dessus est compatible avec les explications initialement fournies par Berndt et Wood (1979, 1981). Frondel et Schmidt soulignent notamment que l'omission des matériaux intermédiaires M parmi les facteurs de production entraîne mécaniquement une hausse de la part en valeur des autres facteurs. S_K étant plus élevée, l'élasticité prix sera très proche de S_E , qui est elle-même plus importante. Il est donc fortement

148. Frondel et Schmidt notent en particulier que l'écart entre S_E et η_{KE} est supérieur à 0,05 dans seulement cinq cas. Ces cas correspondent aux points qui se trouvent en-dehors du corridor délimité par les deux traits obliques, fins et continus. Ils reconnaissent cependant que le choix de cet intervalle de 0,05 est arbitraire. Or, on peut penser qu'il est relativement large étant donné que les estimations varient seulement entre $-0,05$ et $0,15$.

probable de conclure à une substituabilité entre l'énergie et le capital¹⁴⁹. À l'inverse, la division entre les estimations sur des séries temporelles et sur des données en coupe transversale apparaît secondaire. Elle n'a un impact que dans la mesure où elle affecte la part en valeur des facteurs, par exemple du fait de l'indisponibilité de certaines données au niveau international. Ainsi, Griffin et Gregory omettent les matériaux intermédiaires M car ils n'auraient pas les données nécessaires pour faire leur estimation en coupe transversale internationale.

L'argument de Frondel et Schmidt fournit donc une explication des divergences entre les différentes estimations. Mais plus fondamentalement, cet argument vise à remettre en question l'idée que ces estimations aient quoi que ce soit à voir avec la structure sous-jacente de la production. Frondel et Schmidt (2002, 72) concluent ainsi que « les inférences obtenues par les analyses empiriques antérieures apparaissent comme étant largement un artefact des parts en valeur et ont peu à voir avec des inférences statistiques concernant les relations technologiques ». Leur explication affecte donc de manière très directe la fonction d'instrument de mesure qu'est censé jouer le modèle agrégé dans ce cadre. Le problème ne se situe pas dans le fait que les données utilisées influencent la mesure obtenue, ce qui est toujours le cas. Il provient davantage du fait que la mesure de l'élasticité prix est déterminée en grande partie par une donnée particulière concernant la part en valeur de l'énergie. Ce qui devait initialement être une mesure indirecte produite par la combinaison de multiples données, se réduit donc à une mesure quasi-directe. Cela ne serait pas problématique si l'on pensait que la donnée en question est effectivement un candidat pertinent pour mesurer la relation considérée. Le réel problème provient donc de l'absence de lien conceptuel fort entre la part en valeur de l'énergie et sa substituabilité avec le capital.

Derrière ce problème, c'est la méthode d'estimation via la fonction de coût duale qui est en cause. En effet, la relation 13 découle de l'hypothèse de dualité sur laquelle est fondée toute la démarche de la littérature en question, et qui est équivalente à l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale (cf. sous-section 3.1.1). En-dehors de cette hypothèse, il n'existe pas de lien clair entre la substituabilité capital-énergie et la part en valeur de l'énergie. Or, l'existence de la fonction de coût duale et ses liens avec la fonction de production agrégée ne constituent pas une évidence factuelle. Il s'agit au contraire du produit d'un *a priori* théorique basé sur l'idée que le secteur de production étudié se comporte dans son ensemble comme un agent qui minimise le coût de production. La fonction de coût duale constitue donc en quelque sorte une étape supplémentaire dans la déconnexion entre le formalisme utilisé et les réalités techniques du processus de production. L'existence même d'une fonction de production agrégée fondée sur des relations techniques au niveau microéconomique suppose déjà des conditions invraisemblables (Fisher, 1969) (cf. chapitre 2). Mais l'hypothèse de dualité ajoute à cela une couche supplémentaire d'opacité entre le formalisme utilisé et le processus de production réel qu'il est censé décrire. La relation très directe entre la substituabilité capital-énergie et la part en valeur

149. Bien que Frondel et Schmidt ne la discutent pas, la question de la construction des données mise en avant par Berndt et Wood a également un impact important sur les parts en valeur de chaque facteur et donc sur le résultat final.

de l'énergie qui en découle ne peut donc être reliée à aucun fondement conceptuel solide. Cette relation constitue plutôt ce que l'on peut qualifier d'« artifice théorique ».

Malgré ces implications méthodologiques, l'article de Frondel et Schmidt semble avoir reçu relativement peu d'attention dans la littérature sur la substituabilité entre l'énergie et le capital¹⁵⁰. Ainsi dans leur méta-analyse de la controverse, Koetse *et al.* (2008) n'en font pas mention. Cependant, la liste des études considérées dans cette méta-analyse ne référence aucun d'article après 2002, alors que de 1975 à 2002, le rythme de publication est soutenu. Cela pourrait indiquer que la contribution de Frondel et Schmidt a semé le doute sur la pertinence générale de ce type d'estimation, au moins temporairement. Les publications reprennent néanmoins après 2008¹⁵¹.

À ma connaissance, l'argument de Frondel et Schmidt n'a pas été directement contesté¹⁵². Il convient donc de s'interroger sur ses conséquences théoriques et empiriques. L'un des moyens les plus évidents de contourner cet argument serait de réaliser des estimations directes des paramètres de la fonction de production sans passer par la fonction de coût. Cependant, d'après Koetse *et al.* (2008, 2238) « l'un des problèmes concernant l'estimation de fonctions de production est que les facteurs sont en général endogènes, violant par là même l'une des conditions basiques pour que l'estimateur des moindres carrés ordinaires ne soit pas biaisé ». Le recours à la fonction de coût permettrait de contourner ce problème, ce qui expliquerait pourquoi la plupart des études procèdent ainsi.

Par ailleurs, au niveau théorique, l'argument de Frondel et Schmidt n'a d'importance que si l'on pense que l'hypothèse de dualité mérite d'être questionnée. Si ce n'est pas le cas, on devrait logiquement obtenir les mêmes résultats que l'on procède à une estimation directe de la fonction de production ou à une estimation indirecte via la fonction de coût associée. Or, cette hypothèse n'est jamais réellement discutée dans la littérature sur la substituabilité entre l'énergie et le capital. Sa remise en cause représente donc une question majeure, qui va bien au-delà du sujet de l'énergie, et concerne les fondements même de l'approche standard.

150. Frondel et Schmidt ont cependant eu une influence en-dehors du cadre restreint de cette littérature. Leur article est notamment cité dans la revue de littérature de Stern (2011) sur le rôle de l'énergie en économie. Celui-ci en fait cependant une interprétation minimaliste qui n'en retient pas réellement la portée critique. À l'inverse, Hourcade *et al.* (2010) s'appuient sur l'argument de Frondel et Schmidt pour rejeter les fonctions de production habituellement utilisées dans les modèles économiques. Ils proposent au contraire d'adopter une représentation beaucoup plus explicite des systèmes énergétiques, dans laquelle peuvent notamment être utilisées des connaissances issues des sciences de l'ingénieur.

151. Voir notamment Ma *et al.* (2008), Kim et Heo (2013), et Dissou *et al.* (2015). Toutes les trois utilisent un modèle KLE avec des fonctions de production Translog ou CES, et estiment les fonctions de coût associées. Elles sont donc concernées par l'argument de Frondel et Schmidt, mais elles n'y font aucune référence.

152. Les auteurs eux-mêmes n'ont pas connaissance d'un contre-argument. Frondel, communication personnelle.

3.1.3 Des divergences sur la relation entre énergie et productivité

En parallèle de la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, d'autres travaux s'intéressent plus directement aux effets du premier choc pétrolier sur la productivité. Ces travaux s'inscrivent toujours dans le cadre de la théorie néoclassique de la production, mais leurs approches ne s'insèrent pas de manière claire dans la controverse qui précède. Ils se trouvent plutôt dans la continuité des travaux de comptabilité de la croissance. D'ailleurs, des auteurs importants dans ce domaine, tels que Denison et Jorgenson, s'intéressent à cette question. Comme dans la controverse sur la substituabilité capital-énergie, les travaux sur la relation entre énergie et productivité montrent des résultats très contrastés. La théorie économique standard n'est donc pas en mesure de fournir un avis unanime sur cette question, et, à la fin des années 1970, les doutes persistent sur l'effet réel du choc pétrolier. Par ailleurs, ces travaux sont importants pour comprendre ensuite comment la théorie néo-thermodynamique de la production d'Ayres et Kümmel se construit en partie en opposition à l'approche standard.

L'un des premiers débats sur l'effet des chocs pétroliers sur l'économie des Etats-Unis a eu lieu dans la revue de la Federal Reserve Bank of St. Louis. Rasche et Tatom (1977a,b) ont initié le sujet en cherchant à évaluer l'effet de la hausse des prix de l'énergie sur la production potentielle, c'est-à-dire la production de plein emploi des capacités. Pour cela, ils partent d'une fonction Cobb-Douglas incluant les trois facteurs K , L et E , ainsi qu'un terme de progrès technique exogène. Cependant, du fait du manque de données concernant la consommation d'énergie dans le secteur productif privé, ils utilisent l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale afin de faire intervenir le prix de l'énergie. Ils aboutissent ainsi à l'équation suivante :

$$Y = (Ae^{rt}K^\alpha L^\beta P_E^{-\gamma})^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (14)$$

Contrairement à la démarche adoptée dans le cadre des débats sur la substituabilité entre capital et énergie, ils ne transforment donc pas intégralement la fonction de production en une fonction de coût. L'équation mixte ci-dessus est ensuite estimée à partir des données du secteur productif privé. Rasche et Tatom s'intéressent notamment à l'élasticité de production de l'énergie γ , qui mesure l'effet d'une variation de la quantité d'énergie sur la production. D'après leur estimation, cette élasticité est de 0,12.

Afin de déduire l'effet du premier choc pétrolier sur les capacités de production, ils comparent la production potentielle associée à leur modèle avec celle calculée par le Council of Economic Advisors (CEA). La production potentielle désigne la production qui pourrait être atteinte si toutes les capacités de production étaient utilisées. Elle est donc supérieure à la production effective et l'écart entre les deux donne une idée des capacités non exploitées dans l'économie. Rasche et Tatom trouvent que le ratio entre la production potentielle issue de leur modèle et celle calculée par le CEA aurait chuté d'environ 5 % entre 1973 et 1976. En d'autres termes, la prise en compte de l'énergie dans la fonction de production amènerait à réévaluer à la hausse l'effet du premier choc pétrolier sur la production potentielle.

En réponse à cette première contribution, Perry (1977) défend au contraire l'idée que l'impact du choc pétrolier a été faible. Pour cela, il s'attaque principalement au choix

d'une forme Cobb-Douglas pour la fonction de production. Il estime que cette forme fonctionnelle amène à surestimer l'effet de la hausse du prix de l'énergie sur la quantité consommée. Il estime quant à lui l'équation suivante, où U désigne le taux d'utilisation des capacités de production :

$$\ln\left(\frac{E}{Y}\right) = A + rt + a \ln(U) \quad (15)$$

Cette équation est censée fournir à Perry la tendance à la diminution de l'énergie consommée par unité produite, aussi appelée intensité énergétique, sur la période antérieure au choc pétrolier. Il en déduit l'effet propre au choc pétrolier en comparant les prévisions qui seraient construites sur la base de cette équation et les données réelles sur la période 1973-1976. Autrement dit, le modèle sert ici de *contrefactuel* permettant de donner une idée de la trajectoire qu'aurait suivi l'économie en l'absence de choc pétrolier. Il conclut que la hausse des prix de l'énergie aurait fait chuter l'intensité énergétique de 2,9 à 4,9 %.

Bien qu'ayant eu globalement moins d'écho que les articles de Rasche et Tatom, l'article de Perry va influencer Denison (1979a). Ce dernier est l'un des principaux auteurs en comptabilité de la croissance, et il publie régulièrement des ouvrages de synthèse sur la mesure de la productivité. Dans l'ouvrage qu'il écrit à la fin des années 1970, il consacre quelques pages à la question de l'effet du premier choc pétrolier. Dans le débat entre Rasche et Tatom, d'un côté, et Perry, de l'autre, Denison prend clairement le parti de Perry. Il ajoute à cela une critique de l'élasticité de production de l'énergie trouvée par Rasche et Tatom. Pour Denison, l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale implique que l'élasticité de production d'un facteur est égale à sa part en valeur dans la production. Cette part est de l'ordre de 5 % pour l'énergie dans le secteur productif privé. Denison évalue donc l'effet du premier choc pétrolier en multipliant la diminution de la consommation d'énergie calculée par Perry et la part en valeur de l'énergie. Il conclut que le premier choc pétrolier a diminué la production potentielle de 0,15 à 0,25 %. Selon lui, le premier choc pétrolier n'a donc pas eu un effet significatif sur la croissance de la productivité dans les années 1970.

Denison s'appuie principalement sur des travaux réalisés par d'autres et ne présente pas un intérêt très personnel pour l'énergie. Il en va autrement de Jorgenson, une autre figure importante de la comptabilité de la croissance. Dès 1973, ce dernier participe au Energy Policy Project de la Ford Foundation, aux côtés notamment de Berndt (Jorgenson *et al.*, 1973). Par la suite, Hudson et Jorgenson (1974) utilisent les données produites par Faucett (1973) dans le cadre du Energy Policy Project pour élaborer un modèle macroéconométrique visant à étudier l'effet des politiques énergétiques. Ce modèle se situe à l'intersection entre l'approche input-output et l'approche néoclassique, dans la mesure où il représente une dizaine de secteurs en interaction les uns avec les autres, chaque secteur étant représenté par une fonction de coût Translog. Sur la base de ce modèle, Hudson et Jorgenson (1978) vont étudier l'effet du premier choc pétrolier aux États-Unis¹⁵³. Ils concluent que la quantité d'énergie consommée a diminué de 8,8 % et le

153. Sur le plan méthodologique, ils procèdent de manière similaire à Perry. Ils construisent un contre-

PNB de 3,2 % du fait du choc pétrolier. Ainsi, selon eux, « la hausse des prix de l'énergie a eu un effet dramatique sur l'économie des États-Unis » (877). À nouveau, cette conclusion est contestée par Denison (1979a). Pour lui, la diminution de la consommation d'énergie n'est pas compatible avec l'effet important suggéré sur la production, étant donné que la part en valeur de l'énergie est faible¹⁵⁴.

En conclusion, les divergences concernant la relation entre l'énergie et la productivité sont moins clairement structurées que celles concernant la substituabilité entre le capital et l'énergie. La diversité des approches et des méthodes rend plus difficile l'identification d'une ligne de fracture claire. Néanmoins, la question de la relation entre la consommation d'énergie et le niveau de production apparaît comme un enjeu central de ce débat. Celui-ci oppose ainsi Rasche et Tatom (1977b) et Hudson et Jorgenson (1978), qui considèrent que la consommation d'énergie a un effet important sur la production, à Perry (1977) et Denison (1979a), qui estiment qu'il est beaucoup plus faible. Derrière cette question, l'élasticité de production de l'énergie joue un rôle central pour estimer cette relation. En particulier, Denison s'appuie sur l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale pour estimer cette élasticité simplement à partir de la part en valeur de l'énergie.

Dans l'ensemble, les travaux discutés dans cette section montrent que les questions énergétiques occupent une place centrale parmi les contributions empiriques sur la production et la croissance des années 1970. Si Denison traite cet aspect rapidement, et tend à en minorer l'importance, d'autres auteurs reconnus dans ce champ, tels que Jorgenson et Berndt, y consacrent bien plus d'attention. De ce fait, à la fin des années 1970, deux positions méthodologiques s'opposent quant à la place qui doit être accordée aux enjeux énergétiques en macroéconomie. La première défend l'idée qu'il faut chercher à intégrer l'énergie au cœur des modèles macroéconomiques. Cette position est bien illustrée par l'adresse présidentielle que Lawrence Klein (1978) prononce devant l'American Economic Association. Il y insiste sur l'idée que la modélisation macroéconomique devrait s'intéresser davantage à la modélisation de la production, et notamment au rôle de l'énergie. Il mentionne notamment les modèles KLEM et les travaux de Jorgenson comme d'importantes contributions sur cette voie¹⁵⁵. Il suggère également que la macroéconomie doit faire face à une série de problèmes nouveaux, parmi lesquels « le développement de nouvelles sources d'énergies plus importantes, la protection de l'environnement, le contrôle de l'épuisement des ressources, l'augmentation de la production agricole, l'équilibre dans l'évolution de la population et d'autres de même nature » (6).

L'autre position méthodologique qui se dessine à cette époque prétend au contraire qu'il est possible d'étudier les phénomènes macroéconomiques sans se préoccuper de

factuel en simulant leur modèle sur la période 1972-1976 sous l'hypothèse que les prix de l'énergie restent identiques à ceux de 1972. La différence entre le résultat de cette simulation et les données réelles permet alors d'estimer les conséquences propres à cette hausse.

154. En considérant que l'élasticité de production de l'énergie est égale à sa part en valeur, et en multipliant par la diminution de la consommation d'énergie, Denison (1979a, 142) considère que l'effet sur le PNB devrait être de 0,3 %, soit sept fois moins que l'effet trouvé par Hudson et Jorgenson.

155. Klein (1978, 6) note également de manière enthousiaste que « de nombreux modèles satellites de l'énergie sont en cours de développement pour prendre en compte les nouveaux procédés de combustion, les grands secteurs de consommation d'énergie et les grands secteurs de production d'énergie ».

l'énergie, et qu'il faut s'intéresser séparément aux questions plus spécifiquement liées à l'énergie. Cette perspective est notamment incarnée par la fable de l'éléphant et du lapin de Hogan *et al.* (1977). Dans cette fable, l'économie est assimilée à un ragoût dans lequel on mélange un lapin (le secteur énergétique) et un éléphant (le reste de l'économie). Une fois mijoté, le ragoût aura presque uniquement le goût d'éléphant. Selon cette fable, la petite taille du secteur énergétique, en comparaison du reste de l'économie, implique donc qu'il ne peut avoir une réelle influence au niveau agrégé. La fable de l'éléphant et du lapin justifie donc une certaine séparation entre les branches de l'économie : d'un côté, la macroéconomie standard ; de l'autre, une branche spécialisée dans l'économie de l'énergie. Des deux positions méthodologiques qui s'opposent à la fin des années 1970, il semble que c'est cette dernière qui l'a emporté. Alors que les questions énergétiques occupent une place centrale dans les années 1970, elles sont reléguées dans les marges de la discipline dans les années 1980.

3.2 La théorie néo-thermodynamique de la production

Les travaux qui précèdent constituent une extension assez directe de la théorie néo-classique. Ils prennent en compte l'énergie comme facteur de production, à l'inverse de la théorie la plus standard. Mais ils restent très proches de cette dernière par leur recours à une fonction de production agrégée et aux hypothèses de dualité et de rémunération à la productivité marginale. La théorie néo-thermodynamique de la production, dont il est question dans cette section, adopte sur ce point une position plus ambiguë. Elle conserve la fonction de production agrégée, mais elle rejette les méthodes d'estimations fondées sur la rémunération à la productivité marginale, car celles-ci amènent à minimiser le rôle de l'énergie dans la croissance. Par ailleurs, elle prétend donner des fondements physiques à la fonction de production agrégée, et elle s'appuie sur les principes de la thermodynamique pour préciser la place de l'énergie dans ce cadre. De ce fait, elle relève clairement de la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). Plus généralement sur le plan théorique et institutionnel, la théorie néo-thermodynamique de la production se situe dans le courant de l'économie écologique.

À la fin des années 1990, la question des rapports entre la conception thermodynamique de l'économie et la fonction de production agrégée n'est pas réellement tranchée (cf. chapitre 2). Certains auteurs font une critique radicale de la fonction de production agrégée, tandis que d'autres envisagent plutôt de l'adapter pour y donner une place plus importante à la dimension physique du processus de production. Dès les années 1980, un programme de recherche initié par Reiner Kümmel s'inscrit dans cette seconde direction (Kümmel, 1982, 1989; Kümmel *et al.*, 1985)¹⁵⁶. En s'appuyant sur la fonction de production agrégée, Kümmel cherche à démontrer l'importance de l'énergie dans la production et la croissance. Il ne trouve pas immédiatement d'écho. Mais, au début des années 2000, Robert Ayres et ses coauteurs s'inspirent des travaux de Kümmel et

156. Kümmel (1982, 202) note qu'il a été en contact avec Jorgenson à l'époque. Cela semble avoir joué un rôle dans son intérêt pour l'économie de l'énergie et constitue une filiation avec les travaux examinés dans la section 3.1.

relancent ce programme de recherche (Ayres, 2001; Ayres *et al.*, 2003; Ayres et Warr, 2005). Ayres dispose alors déjà d'une certaine influence en économie écologique du fait de ses travaux fondateurs sur l'application des principes de conservation de la matière et de l'énergie en économie (Ayres et Kneese, 1969; Ayres, 1978), et de sa contribution fondatrice à l'écologie industrielle (Ayres, 1989). Grâce à cela, ce programme de recherche va connaître un certain dynamisme qui perdure jusqu'à aujourd'hui¹⁵⁷. Pour en saisir les enjeux, il apparaît suffisant de se concentrer sur la période antérieure aux années 2010, qui se conclut par la publication de deux ouvrages de synthèse par Ayres et Warr (2009), et Kümmel (2011)¹⁵⁸.

Il est également important de noter que Kümmel et Ayres ont tous deux initialement une formation en physique. Ce trait distinctif se retrouve à travers les revues dans lesquelles leurs articles sont publiés. La revue qui en accueille le plus est *Energy*. Le premier numéro de cette revue a été publié en 1976, vraisemblablement influencé par les chocs pétroliers. Elle se trouve plus dans le champ de l'ingénierie que de l'économie, bien que les enjeux économiques y occupent une place significative. L'autre revue la plus représentée dans les publications de ce programme de recherche est *Ecological Economics*, dont la première parution date de 1989. Le lien avec l'économie écologique constitue donc bien le principal ancrage institutionnel de cette approche en économie. Ces relations institutionnelles traduisent une forme forte d'interdisciplinarité, propre à l'économie écologique en général (Baumgärtner *et al.*, 2008; Spash, 2012), mais également visible dans le parcours des auteurs en question. Il est d'autant plus nécessaire de caractériser précisément la nature de cette interdisciplinarité entre la physique et l'économie. Notons également qu'Ayres, Kümmel et leurs coauteurs forment à proprement parler une « communauté scientifique ». Ils publient ensemble et organisent des séminaires, ce qui a récemment amené à la constitution d'un réseau de recherche nommé Exergy Economics¹⁵⁹.

Sur le plan théorique, cette approche partage cependant des aspects importants de la théorie néoclassique de la production¹⁶⁰. Elle s'appuie sur les fonctions de production agrégées et l'ensemble des notions qui les accompagnent, en particulier celle d'élasticité de production. Cependant, la théorie néo-thermodynamique de la production procède

157. Ayres a donc joué un rôle central dans le développement de ce programme de recherche. Mais il reconnaît explicitement que les fondements en ont été posés par Kümmel. Ayres, communication personnelle.

158. Au sein de l'économie écologique, d'autres travaux importants sur l'énergie se rapprochent de ceux d'Ayres et Kümmel, notamment ceux de Cleveland *et al.* (1984) et Cleveland *et al.* (2000) sur l'intensité énergétique, et ceux de Stern (1993, 2000) sur la causalité entre énergie et croissance. Ces travaux se situent dans la conception thermodynamique de l'économie et poursuivent également des objectifs empiriques. Mais ils ne se placent pas explicitement dans le formalisme des fonctions de production agrégées ou dans une autre représentation formelle de la production. Or, ce sont précisément les enjeux méthodologiques d'une telle représentation que je cherche ici à apprécier à la lueur des questions énergétiques.

159. Voir notamment le site <https://exergyeconomics.wordpress.com/>.

160. En ce sens, on peut comprendre ce programme de recherche comme une tentative de rétablir le dialogue avec les économistes néoclassiques, là où la conception thermodynamique de l'économie s'était initialement construite en opposition à la théorie néoclassique des ressources. La controverse entre Georgescu-Roegen/Daly et Solow/Stiglitz avait par exemple marqué dans les années 1970 et 1990 une vive opposition entre les deux courants (cf. chapitre 2).

également à un certain nombre de modifications du cadre néoclassique. Celles-ci vont d'une nouvelle forme fonctionnelle à une nouvelle mesure de la variable d'énergie, en passant par une critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale et de l'approche standard du progrès technique. Ces différents aspects sont marqués par la conception thermodynamique de l'économie qui soutient ces travaux. La théorie néo-thermodynamique de la production cherche ainsi à faire reconnaître aux économistes néoclassiques le fait que l'énergie joue un rôle crucial dans la production et la croissance. Son objectif est donc d'abord intellectuel et académique. En particulier, il y est peu fait référence à des questions de politiques économiques, alors que ces dernières constituaient plus clairement l'arrière-plan des travaux empiriques sur l'énergie dans les années 1970.

Cette section s'intéresse donc à la manière dont la théorie néo-thermodynamique de la production tente de construire une synthèse entre la conception thermodynamique de l'économie et les outils formels et empiriques de la théorie néoclassique. Il s'agit à la fois de comprendre les effets de ces outils sur la façon dont le rôle de l'énergie est pensé dans ce cadre. Mais il s'agit aussi de voir comment cette perspective thermodynamique modifie le statut des formalismes utilisés. En ce sens, on s'intéresse à la nature de l'interdisciplinarité entre la physique et l'économie sous-jacente à ces travaux, et aux enjeux méthodologiques qu'elle soulève. Cet examen se nourrit également des enseignements issus de la section 3.1, pour voir dans quelle mesure ce programme de recherche prolonge ou se distingue du précédent, apporte des réponses aux questions déjà soulevées et en pose de nouvelles.

3.2.1 L'énergie comme facteur de production primordial

La motivation principale derrière la théorie néo-thermodynamique de la production est le sentiment que le rôle de l'énergie a été sous-estimé dans l'approche standard. Cette perception est accompagnée la plupart du temps d'une référence à Denison, selon qui « l'énergie n'est pas vraiment un facteur de production, mais est elle-même le produit du travail, du capital, et de la terre » (Denison, 1979b, cité par Kümmel *et al.*, 1985, 288). En réaction à ce type d'affirmation, l'approche thermodynamique précise le rôle primordial de l'énergie dans la production. Pour Kümmel *et al.* (1985, 288), « l'énergie ne peut pas être produite, mais est un don de la nature ». Ce qui est produit par le secteur énergétique c'est la transformation d'une forme brute de l'énergie (pétrole, charbon, etc.) vers une forme utilisable par les autres activités économiques (essence, électricité, etc.). L'opposition se situe donc ici entre une conception physique de l'énergie, mettant l'accent sur son caractère non reproductible, et une conception économique, qui se concentre sur son statut de marchandise produite par d'autres facteurs de production.

L'approche physique de la production constitue plus généralement la matrice conceptuelle de ces travaux, comme l'illustre la citation suivante :

Each process which occurs in the realm of reality accessible to our senses and measuring instruments involves the interaction of energy with matter. Whenever matter is to be organized into useful products, energy must be allowed to act upon it in a controlled way according to a plan. In the industrial process, capital (i.e. machines and all installations necessary for their

protection and operation) and labor are the instruments which direct energy and, in so doing, process information as to how matter is to be raised from the usually lower state of order of the raw materials to the higher state of order of the final products. The price to be paid for this is a higher disorder (entropy) in the environment. (Kümmel, 1982, 190)

Contrairement aux travaux étudiés dans la section 3.1, qui se contentaient d'inclure l'énergie parmi les facteurs de production sans plus de commentaire, la démarche s'appuie ici sur une conception plus élaborée de la production. Celle-ci est envisagée comme une activité de transformation de la matière qui est activée par l'action de l'énergie. De ce point de vue, le capital est avant tout une instance de contrôle de l'énergie qui permet de maîtriser le processus de transformation de la matière. Cette approche s'inscrit donc clairement dans la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). En particulier, elle en reprend l'ontologie hiérarchique consistant à voir la dimension économique de la réalité comme étant encastrée dans la dimension physique. À cet égard, la contribution de Georgescu-Roegen est reconnue comme fondatrice (Kümmel *et al.* 1985, 288 ; Ayres 2001, 824).

Cependant, les travaux dont il est question ici cherchent à faire entrer cette perspective thermodynamique dans le formalisme de la théorie néoclassique de la production, là où Georgescu-Roegen la considérait inadéquate. Cela amène les auteurs en question à adopter une représentation de la production similaire aux travaux étudiés dans la section 3.1, sous la forme d'une fonction de production agrégée, avec K , L et E comme facteurs¹⁶¹ :

$$Y = F(K, L, E, t) \quad (16)$$

Sur le plan méthodologique, les éléments qui précèdent caractérisent cette approche comme une forme forte d'interdisciplinarité entre la physique et l'économie. Cette interdisciplinarité est à double sens. La thermodynamique apparaît surtout importante au niveau théorique. Elle façonne le cadre conceptuel à travers lequel le processus de production est appréhendé. Cette forme d'interdisciplinarité est plus généralement caractéristique de l'économie écologique, qui recherche une intégration conceptuelle forte entre les sciences naturelles et sociales (Baumgärtner *et al.*, 2008). La théorie néoclassique, quant à elle, est mobilisée au niveau analytique. Elle fournit les outils formels qui vont servir à analyser le problème.

Le rôle primordial accordé à l'énergie dans l'approche thermodynamique apparaît néanmoins rapidement comme étant incompatible avec l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Comme on l'a vu dans la section 3.1, cette hypothèse, ou sa variante sous la forme de l'hypothèse de dualité, est omniprésente dans les travaux néoclassiques, où elle est censée dériver du comportement optimisateur des producteurs. Ici, ce sont les implications de cette hypothèse concernant les élasticités de production

161. Dans l'approche physique du processus de production discutée plus haut, la transformation de la matière apparaît comme la finalité du processus. Cependant, celle-ci n'apparaît pas explicitement dans la fonction de production agrégée censée représenter le processus de production. Cette omission est motivée par l'idée que les « matériaux sont considérés comme des partenaires passifs du processus de production qui ne contribuent pas activement à la génération de valeur ajoutée » (Kümmel, 1989, 167).

qui posent problème. Pour le comprendre, considérons une fonction de production $Y = F(X_1, \dots, X_n, t)$. L'élasticité de production du facteur i , notée ϵ_i , mesure l'effet d'une variation de ce facteur sur la production. Le taux de croissance de la production se décompose alors en une somme de termes qui dépendent chacun du taux de croissance d'un des facteurs. En notant $g_Y, g_{X_1}, \dots, g_{X_n}$ les taux de croissance de la production et des facteurs de production, et δ la croissance du progrès technique, on a donc ¹⁶² :

$$g_Y(t) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i g_{X_i}(t) + \delta(t) \quad (17)$$

Dans cette approche, l'élasticité de production est donc conçue comme un moyen d'attribuer à chaque facteur une certaine contribution à la croissance de la production. Mais l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est équivalente au fait que l'élasticité de production de chaque facteur soit égale à sa part en valeur dans la production. En notant S_i la part en valeur du facteur i , on a donc :

$$\epsilon_i = S_i \quad (18)$$

Cette reformulation de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est par la suite désignée sous le nom de « *cost-share theorem* » par Kümmel *et al.* (2010, 150) ¹⁶³. Les dépenses liées à l'énergie représentent en général environ 5 % du PIB. L'hypothèse de rémunération à la productivité marginale implique donc une contribution marginale de l'énergie à la croissance. Celle-ci est incompatible avec l'intuition thermodynamique qui guide la théorie néo-thermodynamique de la production.

Notons néanmoins qu'Ayres et Kümmel surestiment en partie le poids de cet argument dans la littérature standard sur l'énergie. Des citations extraites des travaux de Denison (1979b,a) constituent leur principale référence pour illustrer la manière dont l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est utilisée pour minimiser le rôle de l'énergie. Ce que nous avons vu dans la sous-section 3.1.3 confirme que Denison se contente de cette hypothèse pour estimer l'impact du premier choc pétrolier sur la productivité. Mais Ayres et Kümmel tendent à attribuer cette position à l'ensemble de la littérature standard sur l'énergie. Ainsi, Kümmel (2011, 180) considère que « dans la plupart des modèles (KLE ou KLEM), un faible poids économique est attribué à l'énergie ». Cette affirmation accompagne une référence explicite aux travaux de Hudson et Jorgenson (1974), de Griffin et Gregory (1976), et de Berndt et Wood (1979). Cependant, d'après ce que nous avons vu dans la section 3.1, la situation apparaît plus nuancée. D'une part, les travaux de Jorgenson soutiennent plutôt que le choc pétrolier a eu un impact significatif sur la productivité, et donc que l'énergie a un rôle important dans la croissance. D'autre part, les résultats des estimations de la substituabilité capital-énergie sont très variables, et certains concluent plutôt à une complémentarité entre les deux facteurs. Or,

162. Pour plus de détails sur l'élasticité de production et la décomposition de la croissance, voir l'annexe B.

163. Cette hypothèse est cependant identifiée dès les premières contributions comme un problème en ce qui concerne l'évaluation du rôle de l'énergie dans la production (Kümmel *et al.*, 1985, 305).

si l'énergie et le capital sont des facteurs complémentaires, la mesure de la contribution individuelle de l'un et l'autre à la croissance ne fait plus vraiment sens, puisqu'ils doivent nécessairement croître proportionnellement pour augmenter le niveau de production. À nouveau, l'énergie aurait donc un rôle important dans la croissance.

L'interprétation de la littérature standard que font Ayres et Kümmel apparaît donc hâtive. Ayres reconnaît par ailleurs qu'il ne s'est jamais intéressé de près à la littérature sur la substituabilité capital-énergie¹⁶⁴. Il y a donc une certaine fragmentation entre les deux littératures, standard et thermodynamique. Cette fragmentation est d'autant plus étrange qu'il occulte les similarités entre le problème du *cost-share theorem* et le problème identifié par Frondel et Schmidt (2002). Comme on l'a vu dans la sous-section 3.1.2, Frondel et Schmidt montrent que dans un cadre Translog, l'estimation de l'élasticité du capital par rapport au prix de l'énergie dépend fortement de la part en valeur de l'énergie. Le problème sous-jacent est que l'hypothèse de dualité, équivalent à celle de la rémunération à la productivité marginale, surdétermine le résultat des estimations empiriques. Ces dernières apparaissent donc comme le produit d'un artifice théorique. Dans le cas des élasticités de production, on retrouve le même problème, mais de manière plus aiguë. L'élasticité prix implique en effet un terme qui la fait dévier de la part en valeur, ce qui laisse un doute sur la rigidité de la relation entre les deux. En ce qui concerne les élasticités de production, la relation est directe et sans ambiguïté. Le parallèle entre les deux situations mérite donc d'être souligné, bien qu'Ayres et Kümmel eux-mêmes ne s'y attardent pas.

Malgré ces remarques, la manière dont la théorie néo-thermodynamique de la production contourne l'obstacle de la rémunération à la productivité marginale mérite d'être examinée. Elle constitue l'une de ses principales divergences avec le cadre néoclassique standard. Dans l'approche néoclassique, l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est une conséquence du comportement optimisateur des producteurs. La théorie néo-thermodynamique ne remet pas en cause cette perspective en terme d'optimisation. Mais elle cherche à en modifier le résultat, en introduisant des « contraintes techniques ». Cette approche est suggérée dès le début par Kümmel *et al.* (1985), mais elle est seulement formalisée plus tard par Kümmel *et al.* (2010). Formellement, les contraintes techniques sont représentées par des fonctions des facteurs de production. L'espace des combinaisons *techniquement* possibles des facteurs de production est ainsi défini par le fait que ces fonctions doivent prendre une valeur particulière. Ainsi, le comportement de l'économie devient le résultat d'une optimisation sous contraintes. Les conditions du premier ordre qui en découlent diffèrent de celles qui prévalent en l'absence de contrainte, c'est-à-dire de la rémunération à la productivité marginale. Plus précisément, il est possible de définir ce que l'on appelle des « *shadow prices* », notés s_i . Ces *shadow prices* dépendent des fonctions de contrainte, et ils sont tels que les élasticités de production s'écrivent¹⁶⁵ :

$$\epsilon_i = \frac{X_i}{Y}(p_i + s_i) = S_i + \frac{X_i s_i}{Y} \quad (19)$$

164. Ayres, communication personnelle.

165. Pour des précisions formelles sur les contraintes et les *shadow prices*, voir l'annexe B.

Sur le plan formel, il est donc possible qu'un écart existe entre la part du facteur dans la valeur ajoutée et son élasticité de production :

In summary, equilibrium conditions derived from profit or overall welfare optimization no longer support the cost share theorem if technological constraints on factor combinations are taken into account. (Kümmel *et al.*, 2010, 160)

Cependant, à ce stade, l'argument est purement formel. Pour qu'il soit réellement pertinent, il convient de préciser le type de contraintes qui peuvent effectivement se manifester dans le processus de production. Dans le cas de la fonction de production dépendante de l'énergie (16), deux contraintes sont mises en avant par Kümmel *et al.* (2010). La première concerne le degré d'utilisation du capital¹⁶⁶. Il est fait l'hypothèse que ce degré d'utilisation prend la forme d'une fonction $\omega(K, L, E)$, telle que pour les combinaisons techniquement possibles des facteurs cette fonction est inférieure à 1, soit :

$$\omega(K, L, E) \leq 1 \quad (20)$$

La deuxième contrainte nécessite de définir au préalable le niveau de capital nécessaire pour une automatisation maximale à un niveau de production donné, noté $K_m(Y)$. Kümmel *et al.* suggèrent qu'à chaque instant, il existe une contrainte technique $0 < \rho_T(t) < 1$, qui empêche d'atteindre ce niveau maximal¹⁶⁷. La deuxième contrainte prend donc la forme¹⁶⁸ :

$$\frac{K}{K_m(Y)} \leq \rho_T(t) \quad (21)$$

Pour Kümmel *et al.*, ces contraintes permettent d'assurer que l'optimisation de la production n'aboutit pas à une égalité entre l'élasticité de production de l'énergie et sa part en valeur. Un échange de lettres entre Ayres et Robert M. Solow permet de voir comment cet argument des contraintes techniques est perçu du point de vue néoclassique¹⁶⁹. L'échange est initié par Ayres, qui transmet à Solow une version préliminaire de l'article de Kümmel *et al.* (2010). Au fil des réponses, la discussion se concentre progressivement sur la question des contraintes techniques et de la validité de cet argument pour justifier

166. Cette première contrainte souligne une différence conceptuelle par rapport aux travaux étudiés dans la section 3.1. Dans ces travaux, la mesure du capital prenait en compte le degré d'utilisation des capacités, afin de mesurer les services rendus par le capital. Ici, au contraire, il semble que le capital soit entendu au sens strict d'un ensemble de biens d'équipement. Son degré d'utilisation dépend des quantités d'énergie et de travail avec lesquels il est combiné.

167. Ce formalisme est illustré par la question de l'espace occupé par le stock de capital. En l'absence de miniaturisation, les systèmes informatiques n'auraient pu permettre un degré d'automatisation tel qu'on le connaît actuellement, car les premiers processeurs étaient trop volumineux. Il s'agirait là d'intégrer des éléments techniques qui sont laissés hors de l'analyse par la fonction de production agrégée. Cette démarche se présente donc comme une tentative pour accroître le réalisme de cette représentation formelle de la production.

168. Kümmel *et al.* (2010) proposent des formes fonctionnelles spécifiques pour leurs contraintes, et ils précisent comment les mettre sous la forme d'égalités plutôt que d'inégalités. Voir l'annexe B pour des précisions.

169. Ces lettres sont issues des archives de Solow, disponibles à la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library de l'Université de Duke.

que les élasticités de production soient différentes des parts en valeur des facteurs. Solow n'est pas convaincu par la nature des contraintes mises en avant et par leur existence. Celles-ci sont selon lui pertinentes pour un processus donné, mais elles disparaissent au niveau agrégé du fait des possibilités de substitution¹⁷⁰. Pour le convaincre de la pertinence de l'idée de contraintes techniques, Ayres tente de mimer le raisonnement utilisé dans le manuel de Gregory Mankiw (2010) pour justifier la rémunération à la productivité marginale. Mankiw prend l'exemple d'un processus de production simple, tel que celui du pain. Ayres reprend cet exemple à son compte, et il insiste sur le fait que la quantité d'énergie nécessaire est déterminée dans des proportions relativement précises par la capacité du four à pain. Il propose ensuite d'extrapoler cette contrainte à l'économie dans son ensemble, comme le fait Mankiw pour la rémunération à la productivité marginale¹⁷¹. Dans sa dernière réponse, plutôt que de remettre complètement en cause la contrainte mise en avant par Ayres, Solow lui suggère de traiter le capital et l'énergie comme des facteurs complémentaires¹⁷². Il n'est donc toujours pas convaincu par la formalisation des contraintes proposée par Ayres et Kümmel.

D'un point de vue méthodologique, cet échange souligne donc les difficultés liées au registre de la représentation dans un tel cadre agrégé. Pour pouvoir appréhender et discuter les caractéristiques des processus de production, les auteurs sont obligés de se situer à un niveau désagrégé. Mais la validité de l'extrapolation au niveau agrégé reste incertaine et peut facilement être questionnée de part et d'autre. Dans la sous-section 3.1.2, cette difficulté amenait à questionner la signification de la notion de substitution. Cela mettait en évidence le peu d'attention portée par la littérature empirique à la signification conceptuelle du modèle. À l'inverse, Ayres et Kümmel discutent abondamment la nature du processus de production qu'ils tentent de représenter, et le rôle joué par l'énergie dans ce dernier. Mais dans cette démarche, ils se trouvent confrontés à la difficulté de transposer au niveau agrégé les contraintes techniques qu'ils identifient pour des processus spécifiques. Malgré cette difficulté, l'échange entre Ayres et Solow montre que le premier attache une importance particulière à cet argument et qu'il tente en vain d'en faire reconnaître la validité par le fondateur de la théorie néoclassique de la croissance.

L'objectif de convaincre les économistes néoclassiques du caractère inadapté de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale se manifeste également dans le choix

170. Solow formule les choses ainsi : « Everything turns on the particular constraints, and I have to confess that I don't find very general speculations to be useful, especially in a service-dominated economy. An explicit model would avoid such complications. » (Solow, archives, box 104, dossier : 2008 Mar. 11-May 13)

171. Ayres raisonne ainsi : « I also note that the amount of heat required is fairly precise; too little heat and the bread will not bake, while too much and it will burn. This looks to me like a constraint. Admittedly the extrapolation to a whole economy is great leap, but if Mankiw's example is valid, then my extension should be valid also. » (Solow, archives, box 105, dossier : 2009 Jan. 5-27). Cette illustration montre par ailleurs que la contrainte technique concernant l'utilisation des capacités s'apparente à une reformulation de l'idée de complémentarité entre le capital et l'énergie.

172. Solow formule les choses ainsi : « Presumably there is some substitutability possible between energy flow and other inputs. If there is not, which you seem to suggest with respect to baking bread, that is just a technicality; there are well known ways of dealing with fixed coefficients. » (Solow, archives, box 105, dossier : 2009 Jan. 5-27)

de ne pas remettre en cause plus généralement l'idée que les agents et l'économie dans son ensemble optimisent le niveau de la production. Kümmel *et al.* (2010, 154) remarquent que si cette hypothèse est rejetée, « la rémunération à la productivité marginale l'est également, et il n'y a pas de raison de croire dans la faible élasticité de production de l'énergie ». Sans le dire explicitement, ils semblent penser que cet argument est trop radical et incapable de convaincre des économistes néoclassiques. À l'inverse, ils pensent que leur approche s'insère mieux dans le cadre standard. L'échange avec Solow montre cependant qu'elle n'est pas pour autant convaincante pour les économistes néoclassiques. Par ailleurs, mis à part cet échange, Ayres et Kümmel n'ont jamais reçu de réponse à leur critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale¹⁷³.

Dans l'ensemble, la formulation d'une critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale présente donc certaines difficultés conceptuelles. Cette critique s'avère pourtant un préalable nécessaire pour donner un sens au reste de la démarche entreprise par Ayres et Kümmel. Une fois levée l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, il devient envisageable d'estimer directement les fonctions de production pour évaluer empiriquement l'élasticité de production de l'énergie. Cependant, les difficultés conceptuelles liées à la critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale ne sont pas tant le fait de l'approche adoptée par Ayres et Kümmel que de la notion de fonction de production agrégée elle-même. En particulier, comme dans la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, on retrouve le manque de prise conceptuelle qu'offre ce formalisme. Dès lors qu'il s'agit d'appréhender des caractéristiques précises des processus de production, le passage au niveau agrégé se révèle problématique. Ces difficultés invitent à examiner plus en détails la manière dont la fonction de production agrégée est reconceptualisée par la théorie néo-thermodynamique de la production.

3.2.2 Une conception physique de la fonction de production agrégée

Dans la théorie néo-thermodynamique de la production, la notion de contrainte technique, avancée à l'encontre de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, n'est qu'une facette d'une reconceptualisation plus générale de la fonction de production agrégée. Cette reconceptualisation passe par la promotion d'une nouvelle forme fonctionnelle jugée plus adéquate d'un point de vue physique. Il est également suggéré que les variables agrégées de la fonction de production peuvent être mesurées de manière strictement physique. La théorie néo-thermodynamique de la production change ainsi les fondements de la fonction de production, afin d'en renforcer la dimension physique. Néanmoins, nous allons voir que cette nouvelle manière d'appréhender la fonction de production agrégée soulève de nombreuses questions quant à sa pertinence conceptuelle.

Dès les débuts de la théorie néo-thermodynamique de la production, Kümmel (1982) cherche une nouvelle forme fonctionnelle jugée plus adaptée aux caractéristiques du processus de production. Cette fonction, dite « linéaire exponentielle » ou « Linex », prend

173. Ayres et Kümmel, communication personnelle.

la forme suivante :

$$Y = F(K, L, E) = AE \exp\left(-a \frac{L + E}{K} + ac \frac{L}{E}\right) \quad (22)$$

Cette fonction est présentée comme une alternative aux fonctions Cobb-Douglas, CES ou Translog, couramment utilisées dans la théorie de la production néoclassique. Alors que ces dernières sont en général choisies pour leurs propriétés formelles, Kümmel entend fonder son choix sur des hypothèses jugées physiquement et techniquement réalistes. Il impose notamment deux conditions aux limites censées refléter les propriétés asymptotiques du processus de production. La première condition stipule que le capital ne peut pas fonctionner sans une dépense minimale d'énergie ou de travail. Formellement, cette condition se traduit par le fait que l'élasticité de production du capital, notée α , tend vers 0 si les ratios travail/capital et énergie/capital tendent vers 0 :

$$\frac{L}{K} \rightarrow 0, \frac{E}{K} \rightarrow 0 \Rightarrow \alpha(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (23)$$

La deuxième condition suggère qu'en se rapprochant du stade d'automatisation intégrale du processus de production, le travail devient inutile à la production. Kümmel précise qu'il existe un paramètre c qui donne la quantité d'énergie par unité de capital utilisée au stade d'automatisation intégrale $K_m(Y)$. Par conséquent, lorsque K tend vers $K_m(Y)$ et E vers $cK_m(Y)$, l'élasticité de production du travail, notée β , tend vers 0 :

$$K \rightarrow K_m(Y), E \rightarrow cK_m(Y) \Rightarrow \beta(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (24)$$

Ces conditions aux limites sont satisfaites par la fonction Linex. Plus exactement, cette forme fonctionnelle est construite pour satisfaire ces conditions¹⁷⁴. Par ailleurs, ces conditions aux limites relèvent des mêmes aspects du processus de production que les contraintes techniques de la sous-section 3.2.1. La première condition porte sur le niveau d'utilisation des capacités de production. Là où la première contrainte (20) fixait une borne supérieure, elle s'intéresse plutôt aux caractéristiques du processus de production lorsque le niveau d'utilisation est faible. La deuxième condition porte sur le niveau d'automatisation du processus de production. Là où la deuxième contrainte (21) fixait un plafond indépassable inférieur au stade d'automatisation intégrale, cette condition précise les caractéristiques de ce stade d'automatisation intégrale. Il y a donc une certaine cohérence conceptuelle entre ces conditions et les contraintes, qui relève plutôt de la complémentarité que de la redondance. Cependant, elles sont de ce fait également sujettes aux réserves méthodologiques formulées vis-à-vis des contraintes. En particulier, ce type de caractéristiques techniques n'est bien appréhendé qu'au niveau d'un processus de production spécifique. La signification de ces conditions au niveau agrégé est incertaine.

Au-delà de la forme de la fonction de production agrégée, la démarche visant à se rapprocher le plus possible de la dimension physique du processus de production transforme la signification des variables elles-mêmes. Pour Kümmel (1982, 190), les notions de

174. Pour plus de détails sur la manière dont la fonction Linex est obtenue à partir de ces conditions, voir l'annexe B.

« capacité physique et de traitement de l'information fournissent les concepts nécessaires pour agréger et mesurer les facteurs et la production industrielle »¹⁷⁵. Bien que cette conception physique des variables agrégées soit suggérée dès les débuts de ce programme de recherche, ce n'est que plus tard qu'elle est présentée explicitement comme une réponse aux critiques dont fait l'objet la fonction de production agrégée. Kümmel (2011, 252-253) mentionne notamment les critiques de Robinson (1953) et de Fisher (1969) (cf. chapitre 2). Néanmoins, l'idée d'une agrégation physique est purement conceptuelle. Elle ne mène pas à une nouvelle manière de construire les données empiriques. En effet, Kümmel fait l'hypothèse *ad hoc* que le rapport entre la valeur monétaire et la mesure physique en termes d'information et d'énergie est stable au cours du temps. Les deux mesures seraient donc proportionnelles au cours du temps, et pour estimer la fonction de production sur des séries temporelles, on peut se contenter des mesures monétaires habituelles. Le problème est que la validation de cette hypothèse supposerait de pouvoir effectivement construire la nouvelle mesure physique, ce que l'hypothèse vise précisément à éviter en lui substituant la mesure monétaire. Cet argument est donc problématique sur le plan méthodologique.

Cette tentative de reformuler les concepts de capital et de production agrégés dans des termes physiques traduit à nouveau l'ambition d'une intégration conceptuelle forte. Cependant, elle atteint ici un point qui entre en contradiction avec l'ontologie anti-réductionniste de la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). En effet, l'ensemble des catégories économiques liées à la production sont ramenées à des catégories physiques. L'argument d'une équivalence entre la mesure monétaire et la mesure physique est particulièrement significatif de ce point de vue. Plutôt qu'une articulation équilibrée entre les dimensions physique et économique du processus de production, cette démarche s'apparente à une subsumption de la seconde par la première. Cette situation traduit une difficulté plus générale liée à la fonction de production agrégée. Dans ce formalisme, il apparaît difficile d'adopter une démarche intermédiaire qui articulerait les dimensions physique et économique de la production, tout en les distinguant. La procédure d'agrégation tend à « aplatir » cette distinction, ou tout au moins à la rendre floue.

La question de la mesure la plus adéquate concerne également l'énergie. Contrairement à la plupart des travaux empiriques étudiés dans la section 3.1, dans la théorie néo-thermodynamique de la production, cette mesure est dès le départ conçue de manière purement physique. La mesure la plus traditionnelle est celle en termes d'énergie thermique, par exemple les *British thermal units* (BTU)¹⁷⁶. Elle permet d'agréger naturellement les différentes ressources énergétiques entre elles par leur pouvoir calorifique.

175. Il suggère notamment de mesurer le capital en termes de quantité d'information gérée par seconde multipliée par le travail physique exercé par seconde, lorsque les machines sont utilisées au maximum de leur capacité. Cette mesure est censée donner des fondements conceptuels solides à la variable de capital agrégé.

176. Le BTU est une unité anglo-saxonne définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une livre anglaise d'eau d'un degré Fahrenheit à la pression constante d'une atmosphère. Bien que ne faisant pas partie du Système international (SI) des unités, elle est régulièrement utilisée pour mesurer des ressources énergétiques. Elle correspond à environ 1055 Joules en unités SI pour l'énergie.

Néanmoins, la question qui se pose est de savoir si cette mesure est conceptuellement pertinente en ce qui concerne le rôle de l'énergie dans la production. C'est sur ce point que la contribution d'Ayres à la théorie néo-thermodynamique de la production a été la plus importante. Ayres considère en effet que l'« exergie » représente une mesure plus adéquate des flux et des stocks d'énergie (cf. chapitre 1^{er}). L'exergie mesure la capacité d'une ressource énergétique à générer du travail mécanique, et contrairement à l'énergie elle ne se conserve pas :

Energy is not “used up” in physical processes, it is merely degraded from available to less and less available forms. On the other hand, is dissipated (used and destroyed) in all transformation processes. The measure of exergy destruction is the production of a thermodynamic quantity called entropy (second law of thermodynamics). (Ayres et Warr, 2005, 186)

Ainsi, les pertes d'exergie tout au long de la chaîne des transformations énergétiques ne participent pas réellement à la production finale. C'est la raison pour laquelle Ayres et Warr proposent de mesurer l'exergie « utile » U , qui correspond à la part rendant effectivement un service final¹⁷⁷. Cette mesure est censée capturer au mieux la capacité de transformation de la matière mise à disposition du processus économique. En pratique, elle est construite en multipliant l'exergie totale utilisée par un procédé technique par un indicateur d'efficacité de ce procédé. La mesure en termes d'exergie utile s'appuie donc directement sur la littérature des ingénieurs pour reconstituer les variations de l'efficacité dues aux améliorations techniques. En ce sens, elle intègre dans la théorie de la production un réel contenu technique et représente une étape supplémentaire dans l'intégration entre l'économie et la thermodynamique. Plus précisément, la thermodynamique fournit ici non seulement un cadre conceptuel, mais également des outils de mesure qui donnent une dimension plus opérationnelle à la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}).

L'idée que l'exergie utile représente la meilleure manière d'intégrer l'énergie dans la théorie de la production est cependant questionnée par Cleveland *et al.* (2000), alors même que ces auteurs partagent par ailleurs une approche thermodynamique du processus de production. Ils reconnaissent que la mesure des ressources énergétiques à l'aide de l'exergie a l'avantage d'être bien définie d'un point de vue conceptuel et de refléter la qualité thermodynamique d'une ressource. Mais ils suggèrent que la qualité thermodynamique n'est pas la seule dimension de la qualité d'une ressource énergétique. Selon eux, il convient aussi de prendre en compte d'autres propriétés des ressources énergétiques, telles que la densité et la flexibilité. Pour cette raison, eux-mêmes reprennent la méthode d'agrégation de Divisia utilisée par Berndt et Wood (1975)¹⁷⁸.

177. Ayres et Warr utilisent le terme « *useful work* », que l'on serait tenté de traduire en « travail utile ». Cette traduction présente cependant un risque de confusion avec le travail humain L . Le problème se pose moins en anglais, car le travail humain est désigné par le terme « *labour* ». D'autres auteurs, tels que Court (2018), utilisent le terme « *useful exergy* » pour désigner la même notion, dont la traduction littérale pose moins de problème. C'est la raison pour laquelle, parler d'« exergie utile » semble plus approprié ici.

178. Cleveland *et al.* justifient le recours à la méthode d'agrégation de Divisia par l'idée que les prix

Ce débat ne semble pas avoir eu réellement de suite, mais il soulève deux remarques. Premièrement, on retrouve ici la dualité entre les dimensions physique et économique de la production. D'une part, la critique de Cleveland *et al.* vise le fait que la mesure en termes d'exergie n'est pas exhaustive du point de vue des propriétés physiques. D'autre part, cette critique invite à inclure des éléments proprement économiques, tels que la flexibilité des usages. Contrairement au réductionnisme physique de la théorie néo-thermodynamique de la production, on assiste alors à un réductionnisme économique qui suggère que ces propriétés très hétérogènes sont bien reflétées par les prix. Deuxièmement, la critique de Cleveland *et al.* met à nouveau en évidence la dualité entre agrégation et désagrégation. L'idée sous-jacente est que si l'exergie utile est effectivement une mesure pertinente de la contribution de l'énergie à un processus de production donné, son agrégation masque la diversité des processus en question. Mais on peut à l'inverse se demander si le spectre plus large de propriétés censées être capturées par les prix participe effectivement au caractère productif de l'énergie. Quoi qu'il en soit, on retrouve ici la problématique de la construction des données identifiée dans la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital (cf sous-section 3.1.1). Dans ce cadre, le problème portait principalement sur la mesure du capital, tandis que la mesure de l'énergie n'avait pas fait l'objet d'une attention plus poussée. Dans le cas de la théorie néo-thermodynamique de la production, c'est au contraire l'énergie qui est au centre des discussions concernant la construction des données.

Pour conclure cette sous-section, on peut donc noter que la théorie néo-thermodynamique de la production procède à une reconceptualisation de la fonction de production agrégée qui cherche à en renforcer la dimension proprement physique. La forme fonctionnelle Lindex tout autant que les variables du modèle, notamment le capital et l'énergie, sont fondées sur des caractéristiques et des mesures physiques. La recherche d'une intégration interdisciplinaire forte se traduit ainsi par une forme de réductionnisme physique. Sur le plan méthodologique, cette démarche se distingue également de la littérature empirique standard sur l'énergie par un accent beaucoup plus important mis sur les fondements conceptuels du modèle utilisé. Mais la fonction de production agrégée apparaît peu adéquate de ce point de vue. Il en résulte une difficulté à relier entre elles l'élaboration conceptuelle, fondée essentiellement sur un raisonnement à un niveau désagrégé, et la formulation d'hypothèses abstraites dans un cadre formel agrégé. Malgré cela, Kümmel présente sa conception physique de la fonction de production agrégée comme une base solide et une réponse aux critiques de cette dernière. Il lui attribue ainsi un degré de réalisme considérable :

In summary, aggregation of output, capital, routine labor, and energy in physical terms is possible. These physical terms represent work performance and information processing—the basic elements of economic production. They

reflètent une conception plus large des différences de qualités entre les ressources énergétiques. Plus précisément, selon eux, « les différences de prix sont expliquées par des différences dans les attributs tels que la rareté physique, la capacité à produire de l'exergie utile, la propreté, la facilité de conservation, la sécurité, la flexibilité d'usage, les coûts de conversion, et ainsi de suite » (2000, 306). Ils incluent donc la qualité thermodynamique dans un spectre plus large, là où Ayres et Warr en font le seul déterminant de la contribution de l'énergie à la production.

are the response to the conceptual criticism of Joan Robinson and others. And since they are related by cause and effect according to the laws of nature, they also satisfy the necessary condition for state functions. [...] Thus, there is some engineering justification for the standard assumption that twice-differentiable macroeconomic production functions do make sense in the real economy. (Kümmel, 2011, 259-260)

Ayres et Warr (2009, 177) adoptent également la forme fonctionnelle Linex et se réfèrent explicitement à la conception physique de la fonction de production agrégée défendue par Kümmel. Pour autant, ils reconnaissent explicitement les faiblesses de ce formalisme :

In some ways, the case against using aggregate production functions of a very few variables seems overwhelming; certainly stronger than the case for using them. The major reason for taking this approach, despite problems, is that it is familiar and both relatively transparent and relatively convenient. The conclusions, if any, must, necessarily, be considered carefully in the light of the criticisms. (Ayres et Warr, 2009, 181)

Dans cette dernière citation, le réalisme épistémologique fait donc place à un pragmatisme méthodologique, qui s'appuie sur des considérations analytiques et empiriques¹⁷⁹. Bien qu'ils admettent être davantage convaincus par une approche conceptuelle désagrégée, Ayres et Warr choisissent donc de recourir à la fonction de production agrégée pour mesurer la contribution de l'énergie à la croissance. Ils adoptent une position instrumentaliste inspirée de Friedman (1953) pour justifier cette démarche¹⁸⁰ :

On the contrary, we postulate (in the spirit of Milton Friedman (1953)) that if an assumed relationship explains (that is, reproduces) the empirical observations, one need not worry too much about the realism of every one of the underlying assumptions. [...] In short, we argue that a postulated functional relationship among aggregates (capital, labor and mass/exergy—or useful work) flows is an adequate representation of the real world, at least for the purposes of explaining economic growth. (Ayres et Warr, 2009, 183)

Il y a là un certain retournement méthodologique. Jusque-là, la légitimité de la fonction de production agrégée semblait reposer exclusivement sur sa relation avec l'approche thermodynamique de la production. Autrement dit, le registre de la représentation dominait la justification du modèle. Or, Ayres et Warr reconnaissent ici les limites de cette démarche, sans pour autant remettre en question la pertinence des modifications apportées au cadre néoclassique standard. Le registre des manipulations devient alors la source principale de légitimité, et en particulier les fonctions d'instrument de mesure et de test

179. Ayres et Warr comparent en particulier l'approche par la fonction de production agrégée avec celle des matrices input-output. Sur le plan analytique, le principal problème posé par ces dernières serait qu'elles ne permettent pas de rendre compte d'une forme de substituabilité entre les facteurs de production. Sur le plan empirique, elles soulèvent des questions relatives à la disponibilité des données et l'absence d'une mesure claire de la contribution de chaque facteur à la croissance.

180. Plus précisément, ils adoptent la lecture traditionnelle de la position de Friedman. Comme l'a montré Mäki (2009b), il est cependant possible d'en formuler d'autres interprétations.

empirique. En l'occurrence, il s'agit de savoir dans quelle mesure leur fonction de production agrégée est capable de reproduire la croissance de la production constatée dans les données empiriques. Cette question soulève de nouveaux enjeux méthodologiques qui sont abordés dans la sous-section suivante.

3.2.3 Les estimations économétriques : instruments de mesure et tests empiriques

La théorie néo-thermodynamique de la production d'Ayres et Kümmel poursuit deux objectifs au niveau empirique. Le premier est de montrer que l'élasticité de production de l'énergie est supérieure à sa part en valeur. Dès lors que l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est jugée invalide par ces auteurs, il devient nécessaire de réaliser une estimation directe des paramètres de la fonction de production pour en déduire cette élasticité. C'est donc la fonction du modèle comme instrument de mesure qui est mobilisée dans ce cas. Le deuxième objectif est de fournir une meilleure explication de la croissance que celle de la théorie néoclassique. Cet objectif a une dimension statistique, au sens où il implique de confronter le modèle estimé et les données empiriques afin d'en apprécier le degré d'adéquation. Mais il a également une dimension théorique qui réside dans ce qui est conçu comme une bonne explication de la croissance. Il importe de saisir ces deux aspects pour comprendre la fonction remplie ici par le modèle, à savoir celle de fournir un test empirique de la théorie.

Ayres et Kümmel critiquent la notion de progrès technique telle qu'elle est utilisée dans la théorie néoclassique de la croissance. Dans les travaux empiriques, le progrès technique, aussi appelé « productivité totale des facteurs » (TFP), est calculé comme le résidu de croissance non expliquée par la croissance des facteurs de production. La contribution de Solow (1957) est fondatrice dans ce domaine. Considérant uniquement les facteurs travail et capital, il s'appuie sur la décomposition de la croissance donnée par la formule (17). Il suppose alors que l'élasticité de production de chaque facteur est égale à sa part en valeur. Cela permet de calculer la contribution du progrès technique comme la différence entre la croissance de la production et celles des facteurs multipliées par leurs élasticités. Il en conclut que 87 % de la croissance de la productivité du travail aux États-Unis entre 1909 et 1949 peut être attribuée au progrès technique, et le reste au capital.

Ayres et Kümmel opposent à cette approche standard une compréhension du progrès technique qui se concentre sur l'utilisation de l'énergie dans le processus de production. Leur perspective se divise cependant en deux aspects distincts. D'une part, avec l'introduction de l'exergie utile, le progrès technique est associé à l'amélioration de l'efficacité thermodynamique. L'efficacité thermodynamique détermine la proportion de l'énergie primaire qui va effectivement rendre un service économique et non être dissipée en pure perte au cours des transformations. Le travail d'investigation détaillée mené par Ayres *et al.* (2003) permet de construire un indicateur de cette efficacité qui soit fondé sur des données d'ingénierie. En ce sens, il constitue ce qui se rapproche le plus d'une mesure directe du progrès technique. D'autre part, Kümmel *et al.* (2002) cherchent à modéliser la diffusion des innovations. Pour cela, ils vont permettre aux paramètres a et c de la fonc-

tion Linex (22) de varier dans le temps, alors qu'ils étaient auparavant considérés comme étant constants. Plus précisément, ils expriment ces paramètres à l'aide des fonctions logistiques suivantes :

$$a(t) = \frac{a_1 - a_2}{1 + \exp(-a_3(t - a_4))}, a_1 > a_2 \quad (25)$$

$$c(t) = \frac{c_1 - c_2}{1 + \exp(-c_3(t - c_4))}, c_1 < c_2 \quad (26)$$

Dans les deux cas, exergie utile et fonctions logistiques, la finalité est d'offrir une meilleure explication de la croissance. Cette démarche implique de confronter la fonction de production Linex avec les données empiriques. Avant d'en venir aux résultats, il est nécessaire de souligner les difficultés statistiques auxquelles fait face une estimation directe de la fonction de production agrégée. Alors que ces difficultés sont peu présentes dans les premiers travaux, une discussion plus complète du sujet est fournie par Ayres et Warr (2009, 200-205). Le principal problème est lié au fait que les différentes séries temporelles ont une tendance commune très marquée à la croissance, qui fausse les estimations économétriques¹⁸¹. Pour y faire face, il est possible de passer au logarithme la fonction de production Linex et d'estimer la relation qui en découle, afin de considérer des variables dépourvues d'une tendance exponentielle. Mais cela ne résout pas tout. En effet, Ayres et Warr constatent que malgré cette transformation, les séries temporelles considérées ne sont pas stationnaires entre 1900 et 2005, c'est-à-dire qu'elles sont encore marquées par des changements structurels au cours du temps¹⁸². Ils identifient en particulier une rupture structurelle commune à toute les variables autour de la Seconde Guerre mondiale, qui les incite à estimer leur modèle de part et d'autre de cet événement. Mais là encore, les séries temporelles évoluent de manière très similaire, ce qui pose possiblement un problème de colinéarité, c'est-à-dire que les variables explicatives sont fortement corrélées entre elles. Pour Ayres et Warr (2009, 203), ce problème découle du fait que les différentes variables du modèle « mesurent le même phénomène (la croissance économique) et par conséquent sont dans une certaine mesure redondantes ». Cela implique notamment l'existence de multiples solutions à la procédure d'optimisation utilisée pour estimer la fonction Linex¹⁸³.

Ces difficultés statistiques sont d'autant plus importantes que l'estimation directe des fonctions de production agrégées est incontournable pour la théorie néo-thermodynamique de la production. C'est grâce à cette méthode qu'elle entend montrer

181. Il semble d'ailleurs que ce soit cette difficulté qui, dans les travaux empiriques sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, justifiait de passer par l'estimation d'une fonction de coût plutôt que par l'estimation directe de la fonction de production (Koetse *et al.*, 2008, 2238).

182. De manière générale, une série temporelle est dite stationnaire si ses propriétés statistiques ne sont pas affectées au cours du temps. En l'occurrence, Ayres et Warr s'intéressent à la stationnarité « en covariance », c'est-à-dire qu'ils cherchent à savoir si l'espérance, la variance, et l'auto-corrélation des termes de la série temporelle sont indépendants du temps.

183. Étant donné la structure de la fonction Linex, il n'est pas possible d'utiliser des méthodes classiques telles que les moindres carrés ordinaires pour estimer ses paramètres. La fonction Linex est donc estimée à l'aide de méthodes d'optimisation non linéaires, telles que la méthode de Levenberg-Marquardt (Kümmel, 2011, 267).

que le rôle de l'énergie est plus important que ce que laisse penser sa part en valeur. L'argument théorique des contraintes techniques, qui remet en question l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, ne fait qu'ouvrir à une telle possibilité. Il demande à être confirmé empiriquement. De ce point de vue, les différentes estimations réalisées débouchent sur une conclusion commune : l'élasticité de production de l'énergie est significativement plus élevée que sa part en valeur. Cependant, derrière cette conclusion se trouvent des résultats assez variables. Pour le voir, on peut comparer les résultats obtenus pour les États-Unis après 1980. D'une part, Ayres et Warr (2009, 212) trouvent des élasticités de production du capital et de l'énergie proches de 0,5, avec une fonction Linex et une mesure en termes d'exergie utile. De l'autre, Kümmel (2011, 211) aboutit à une élasticité d'environ 0,7 pour le capital, et 0,3 pour l'énergie, avec une fonction Linex et une mesure en termes d'énergie thermique. Dans les deux cas, l'élasticité de production du travail est quasi nulle¹⁸⁴. Ces divergences montrent que les résultats des estimations empiriques dépendent fortement de la spécification du modèle.

Hormis l'estimation des élasticités de production, l'autre question empirique importante est de savoir avec quel degré de précision le modèle estimé reproduit les données empiriques. Cette question implique de s'intéresser à l'évolution du résidu qui mesure l'écart entre le modèle estimé et les données empiriques. Outre l'ampleur de cet écart, il est important de savoir s'il est structurellement négatif ou positif, ce qui peut indiquer l'omission d'une variable explicative¹⁸⁵. Dans le cas de Kümmel (2011, 212), le modèle estimé ne montre pas d'écart significatif avec les données empiriques, et les résidus ne semblent pas corrélés. Mais dans le cas d'Ayres et Warr (2009, 210), pour les États-Unis, le modèle estimé est significativement inférieur aux données sur la fin de la période, et les résidus sont fortement corrélés.

Anticipant les critiques, Ayres et Warr (2009, 213) reconnaissent qu'un « statisticien professionnel, voyant [leurs] résultats, pourrait les considérer avec scepticisme ». Ils remarquent notamment qu'avec « suffisamment de paramètres, il est possible de modéliser quasiment n'importe quoi ». Au passage, il est intéressant de noter que cet argument est notamment formulé par Georgescu-Roegen (1971, 340), qui le résume de manière métaphorique en affirmant que « l'on peut toujours prouver que dans n'importe quelle bûche il existe une belle Madone ». Autrement dit, il est toujours possible d'épouser les formes d'une courbe empirique si le modèle est suffisamment flexible. Pour la théorie néo-thermodynamique de la production, cette critique est doublement importante, car Georgescu-Roegen est à la fois le fondateur de la conception thermodynamique de l'économie et un statisticien de formation. On peut donc douter de l'affirmation d'Ayres et Warr (2009, 142) selon laquelle, « après quelques réticences, Georgescu-Roegen aurait été d'accord avec l'approche adoptée ici ».

Sur un plan plus technique, il est important de noter que le nombre de paramètres du

184. On pourrait penser que ces résultats divergents s'expliquent par le fait qu'une part plus importante du progrès technique est endogénéisée par la variable d'exergie utile dans le modèle d'Ayres et Warr. Mais sur cette même période, le progrès technique exogène estimé par Kümmel est très faible, et ne peut donc expliquer l'écart entre les deux élasticités de production de l'énergie.

185. En termes statistiques, il s'agit de tester l'auto-corrélation des résidus, à l'aide notamment de la statistique de Durbin-Watson.

modèle d'Ayres et Warr monte à huit lorsqu'ils utilisent les fonctions logistiques. Selon eux, ce nombre de paramètres reste cependant faible comparé à l'amplitude temporelle sur laquelle l'estimation est réalisée. De ce point de vue, les meilleurs résultats obtenus par Kümmel pourraient s'expliquer en partie par le fait que la période considérée est presque deux fois plus courte dans son cas¹⁸⁶. Ces remarques ont donc à voir avec les critères qui permettent de juger de la qualité empirique du modèle. Le critère principal est le degré d'adéquation entre le modèle estimé et les données empiriques. Mais celui-ci ne fait sens que si le rapport entre le nombre de paramètres et l'amplitude temporelle est similaire entre deux estimations. Sur ce point, le passage de deux à huit du nombre total de paramètres du modèle fragilise la pertinence des résultats empiriques.

Les éléments qui précèdent fournissent une vision globale de la théorie néothermodynamique de la production. Pour approfondir les enjeux méthodologiques sous-jacents à cette approche, il convient de distinguer à nouveau les registres de la représentation et des manipulations. En ce qui concerne la représentation, la théorie néothermodynamique de la production tente de réinterpréter la fonction de production agrégée en insistant sur la dimension physique du processus de production. Cela passe par l'idée de contraintes techniques, les conditions aux limites de la fonction Linex, la conceptualisation du capital agrégé en termes d'énergie et d'information, et la construction de la variable d'exergie utile. Mais cette conception physique de la production se heurte au choix d'une représentation agrégée qui lui offre peu de prise conceptuelle. Les hypothèses abstraites qui sont incorporées dans ce formalisme sont difficiles à relier aux réalités matérielles qu'elles sont censées traduire.

De ce fait, le choix de cette représentation agrégée est *in fine* renvoyé aux manipulations qu'elle permet de mettre en œuvre, et en particulier aux méthodes d'estimations empiriques. D'une part, les variables agrégées du modèle trouvent leur contrepartie empirique dans les agrégats statistiques de la comptabilité nationale. Cette correspondance s'avère cependant sujette à des débats qui mènent à la modifier significativement. Par exemple, en ce qui concerne la mesure de l'énergie, l'exergie utile remplace une mesure plus traditionnelle en unités thermiques. D'autre part, les fonctions agrégées offrent un nombre réduit d'indicateurs, tels que les élasticités de production, censés synthétiser les caractéristiques générales du processus économique.

Ce dernier point est intimement lié à la fonction d'instrument de mesure remplie par le modèle, au sens de Morgan et Morrison (1999b). L'attention porte en particulier sur la mesure de l'élasticité de production de l'énergie, qui est censée refléter la plus ou moins grande importance de l'énergie pour la production et la croissance. De ce point de vue, l'objectif de l'approche thermodynamique est de s'écarter de la surdétermination théorique qui caractérise l'estimation de cette élasticité dans le cadre néoclassique, du fait de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Ce faisant, elle est contrainte de recourir à une méthode d'estimation directe de la fonction de production qui pose de nombreux problèmes. Le plus important est certainement que le degré d'adéquation entre

186. Pour les États-Unis, le modèle de Kümmel est estimé sur la période 1960-1996. Ayres et Warr quant à eux estiment leur modèle sur les deux sous-périodes 1900-1941 et 1948-2005, pour tenir compte de la rupture structurelle liée à la Seconde Guerre mondiale.

le modèle estimé et les données empiriques est fortement lié à la structure des données et au nombre important de paramètres. Cette analyse confirme donc le point de vue de Pottier (, 143-144) selon qui, les résultats des estimations économétriques de fonctions de production agrégées « seraient pour partie des artifices numériques ». Par ailleurs, cette difficulté affecte également la deuxième fonction attribuée au modèle, à savoir celle de produire un test empirique de la théorie. Car si l'on soupçonne que l'adéquation du modèle estimé et des données empiriques relève d'un artifice numérique, on ne peut l'accepter comme une authentique épreuve de falsification de la théorie.

Pour échapper partiellement à ce problème, il semble nécessaire de réduire au maximum le nombre de paramètres du modèle. De ce point de vue, on aurait pu penser que l'introduction de la variable d'exergie utile permettrait justement de se passer des fonctions logistiques. En effet, elle intègre directement les gains d'efficacité thermodynamique, qui sont censés représenter une part importante du progrès technique dans cette perspective. On peut alors s'étonner du choix d'Ayres et Warr (2009) de présenter une estimation réalisée à l'aide des fonctions logistiques, tout en affirmant que sans elles l'adéquation entre le modèle estimé et les données reste très bonne. D'un point de vue méthodologique, il semblerait plus pertinent de s'en tenir à une estimation avec seulement deux paramètres, au lieu de huit, si cela n'affecte pas fondamentalement les résultats¹⁸⁷.

Plus généralement, ces remarques questionnent l'articulation sous-jacente entre théorie, modèle et données dans la théorie néo-thermodynamique de la production. La conception physique de la fonction de production marque une imprégnation forte du modèle par la théorie. Mais on a vu que cette démarche était limitée par la nature agrégée du modèle (cf. sous-section 3.2.2). La pertinence du modèle est alors en partie renvoyée à sa capacité à reproduire l'évolution des données empiriques. Or, cet aspect s'avère difficile à juger du fait des questions soulevées ci-dessus concernant la structure des séries temporelles et le nombre de paramètres du modèle. Il en résulte un doute sur la cohérence méthodologique globale de la démarche adoptée par la théorie néo-thermodynamique de la production¹⁸⁸.

187. Ayres et Warr (2005) ont réalisé une estimation de ce type auparavant. Mais comme ils le notent eux-mêmes, celle-ci « a mis en évidence une forte auto-corrélation des résidus » (207). Cependant, il est important de noter que cette estimation concernait toute la période 1900-1998. Or, ils ont montré par la suite que la Seconde Guerre mondiale représentait une rupture structurelle qui nécessite d'estimer le modèle sur les deux sous-périodes, de part et d'autre de cet événement.

188. Précisons que cette discussion méthodologique concerne d'abord et avant tout les travaux de la théorie néo-thermodynamique de la production publiés avant les années 2010. Cette limite temporelle est nécessaire pour circonscrire l'objet d'étude. Elle apparaît pertinente, car elle s'achève avec les ouvrages d'Ayres et Warr (2009) et de Kümmel (2011), qui fournissent une première synthèse. Ce programme de recherche s'est depuis poursuivi de manière soutenue (Warr et Ayres, 2012; Ayres et Voudouris, 2014; Lindenberger *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018; Keen *et al.*, 2019). Ces nouvelles contributions apportent des modifications substantielles, à la fois sur le plan théorique et en ce qui concerne les méthodes empiriques. Le prolongement à ces nouveaux travaux des analyses développées dans cette section nécessiterait donc un examen détaillé. On peut cependant penser que les difficultés méthodologiques identifiées sont suffisamment profondes pour qu'elles perdurent dans ces contributions plus récentes.

3.3 Conclusion

En conclusion, on peut souligner une certaine continuité dans les enjeux méthodologiques soulevés par les deux ensembles de travaux étudiés dans ce chapitre, l'approche standard de l'énergie et la théorie néo-thermodynamique de la production. Cette continuité trouve sa source dans l'outil formel commun aux différentes approches, à savoir la fonction de production agrégée. Il est également important de noter que cette continuité a lieu malgré des divergences notoires sur d'autres aspects théoriques (l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale) et empiriques (l'estimation des fonctions de production ou de coût).

En ce qui concerne le registre de la représentation, la principale difficulté associée à la fonction de production agrégée est qu'elle donne peu de prise conceptuelle pour rendre compte des aspects physiques du processus de production. Dans la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, cette difficulté se traduit par une déconstruction progressive de la notion de substitution. La substitution peut être brute ou nette, de court terme ou de long terme. Elle peut être mesurée par les élasticités prix, les AES ou les MES. Surtout, elle peut être liée à un réel changement technique ou à une simple modification de la structure de la demande, sans que l'on soit en mesure de percevoir la différence au niveau agrégé. Ce caractère équivoque de la notion de substitution traduit l'incapacité de la fonction de production agrégée à saisir la diversité et la complexité des mécanismes à l'œuvre. À lui seul, ce constat fragilise considérablement la possibilité de fournir une interprétation fiable des résultats empiriques.

Les enjeux liés au registre de la représentation apparaissent de manière encore plus claire dans la théorie néo-thermodynamique de la production de par sa volonté de renforcer la dimension physique de la fonction de production agrégée. Dans les travaux d'Ayres et Kümmel, cette volonté se manifeste par l'idée de contraintes techniques, les conditions aux limites de la fonction Linex, la conceptualisation du capital agrégé en termes d'énergie et d'information, et la construction de la variable d'exergie utile. Le problème intrinsèque à cette démarche est que ces notions ne peuvent être bien appréhendées qu'au niveau désagrégé, où le processus de production peut être identifié clairement à un système physique. Dès lors que l'on se situe au niveau agrégé, elles perdent de leur force. La formulation d'hypothèses abstraites sur la fonction de production peine à rendre compte des contraintes et des conditions aux limites. Pour les besoins empiriques, la mesure physique du capital est finalement ramenée à la mesure monétaire traditionnelle sur la base d'une hypothèse *ad hoc*. L'agrégation en termes d'exergie utile apparaît quant à elle comme une opérationnalisation intéressante des principes de la thermodynamique. Mais certains lui reprochent de ne pas refléter l'intégralité des propriétés qui donnent sa valeur économique à une ressource énergétique. Derrière ces difficultés se trouve celle de l'articulation entre les dimensions physique et économique du processus de production. Or, la fonction de production agrégée contraint à adopter une vision unidimensionnelle de la production, soit intégralement économique, soit intégralement physique. Elle ne permet pas de distinguer ces deux dimensions et de les articuler ensemble de manière plus satisfaisante.

Dans les deux approches, standard et thermodynamique, cela amène à mettre davantage l'accent sur les manipulations permises par la fonction de production agrégée, et plus particulièrement sur les méthodes empiriques qui l'accompagnent. Cependant, dans les deux cas, les estimations empiriques soulèvent des questions quant à la nature réelle ou artificielle de leurs résultats. Dans le cas de la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, les élasticités prix sont étroitement reliées *a priori* aux parts en valeur des facteurs dans la production. De ce fait, l'estimation empirique du modèle apparaît secondaire, et le résultat est surdéterminé par l'hypothèse de dualité, équivalente à celle de la rémunération à la productivité marginale. La construction des données relatives aux quantités et aux prix des facteurs de production acquière au contraire un rôle crucial, puisque la mesure de l'élasticité prix se déduit presque directement de ces dernières. Le fait que les données utilisées influencent la mesure obtenue est trivial et nécessaire. Mais le fait qu'une donnée particulière influence directement la mesure est plus problématique. Ce qui devait être une mesure indirecte produite par la combinaison de l'ensemble des données se réduit à une mesure quasi-directe. Le problème est que cette mesure ne repose sur aucun lien conceptuel fort entre la part en valeur de l'énergie et sa substituabilité avec le capital, mais uniquement sur l'hypothèse de dualité. En ce sens, elle constitue un artifice théorique.

La théorie néo-thermodynamique de la production tente quant à elle de contourner ce problème en procédant à une estimation directe de la fonction de production agrégée. Celle-ci se révèle problématique du fait de la structure des données et du nombre de paramètres employés pour réaliser cette estimation. Le résultat obtenu est probablement le fruit d'un artifice numérique plutôt que la traduction d'une relation technique sous-jacente. Cette difficulté affecte directement la fonction d'instrument de mesure du modèle, puisque l'on ne peut pas garantir que l'élasticité de production de l'énergie estimée est une mesure fiable de la relation entre l'énergie et la production totale. Ce problème concerne également la deuxième fonction attribuée au modèle dans la théorie néo-thermodynamique de la production, à savoir celle d'offrir un test empirique de la théorie. Car si l'on soupçonne que l'adéquation du modèle estimé et des données empiriques relève d'un artifice numérique, on ne peut l'accepter comme une authentique épreuve de falsification de la théorie.

Dans l'ensemble, ces difficultés théoriques et empiriques ne sont pas propres à la question de l'énergie, et elles posent des questions qui touchent de manière plus générale à la théorie de la production et à la modélisation économique. Cependant, l'énergie les révèle de manière d'autant plus éclatante qu'elle renvoie à la dimension physique du processus économique. On pourrait en effet penser *a priori* qu'il suffit pour l'intégrer dans la théorie économique de s'appuyer sur la physique et l'ingénierie, et qu'elle dispose en ce sens d'une certaine extériorité à la discipline. Or, cette conception naïve des relations interdisciplinaires est mise en échec par le fait que les outils formels et empiriques de la discipline économique ont une influence décisive sur ce processus d'intégration. L'écart entre la conception purement physique du problème et son incorporation dans la théorie économique donne alors à voir des difficultés méthodologiques importantes.

Cette analyse permet également de jeter un regard nouveau sur l'un des aspects de la

controverse entre Georgescu-Roegen/Daly et Solow/Stiglitz (cf. chapitre 2). Cet aspect concerne la place des méthodes empiriques pour trancher le débat de la substituabilité entre le capital et les ressources. Rappelons notamment que Stiglitz (1979) suggère explicitement que cette question peut être résolue par des estimations empiriques de la fonction de production. Or, ce chapitre montre que les estimations économétriques de fonctions de production produisent des résultats artificiels, qu'elles soient directes ou indirectes. La perspective méthodologique consistant à penser que les hypothèses théoriques des modèles de croissance peuvent facilement être soumises à des tests empiriques est donc mise en échec.

Sur le plan institutionnel, cela amène également à souligner une certaine fragmentation au sein de l'économie des ressources naturelles. Cette fragmentation est particulièrement marquante entre les modèles théoriques avec ressources épuisable et les estimations empiriques de la substituabilité capital-énergie. Ainsi, Berndt et Wood (1975) ne mentionnent pas les travaux de Solow (1974b) et Stiglitz (1974c), alors que les résultats empiriques des premiers remettent en cause les hypothèses des seconds. Réciproquement, Stiglitz (1979) ne mentionne pas les résultats de Berndt et Wood, alors même qu'il suggère de tester empiriquement les hypothèses des modèles néoclassiques. Cette ignorance mutuelle pourrait être mise sur le compte de la proximité temporelle entre ces travaux, qui ne leur permet peut-être pas d'avoir immédiatement connaissance les uns des autres. Mais même à la fin des années 1990, dans le débat suscité par la controverse entre Georgescu-Roegen/Daly et Solow/Stiglitz, Pearce (1997, 295) affirme que « le problème est empirique ». Après quoi, il cite une unique référence sur la substituabilité des métaux, sans avoir vraisemblablement conscience des problèmes que rencontrent les travaux empiriques sur la substituabilité capital-énergie depuis plus de 20 ans. De même, Daly reconnaît qu'il ne s'est jamais réellement intéressé aux travaux empiriques sur la question¹⁸⁹. Il y a donc une véritable fragmentation des savoirs au sein du champ, en particulier entre les travaux théoriques et les travaux empiriques.

Par ailleurs, les difficultés rencontrées par la théorie néo-thermodynamique de la production invitent à se demander si une autre représentation formelle de la production pourrait offrir une perspective différente pour appréhender la dimension physique de la production, et son articulation avec la dimension proprement économique. Cette question est latente en économie écologique à la fin des années 1990 (cf. chapitre 2). La position concernant la fonction de production agrégée est alors ambiguë. Certains auteurs envisagent de l'adapter pour y donner une place plus importante à la dimension physique du processus de production, tandis que d'autres proposent une critique plus radicale. Les travaux d'Ayres et de Kümmel s'inscrivent dans la première voie, et vont permettre à la fonction de production agrégée de s'installer en économie écologique dans les années qui suivent. Les tenants de la deuxième voie quant à eux présentent la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen comme une alternative plus appropriée, sans pour autant en explorer réellement les fondements et les implications. Il apparaît donc nécessaire d'examiner plus en détail ce que la théorie flux-fonds apporte à la compréhension des relations entre les dimensions physique et économique de la production. C'est l'objet du chapitre 5. Mais

189. Daly, communication personnelle.

auparavant, il est important de faire un détour pour bien saisir la conception de la modélisation qui est celle de Georgescu-Roegen. En effet, la question de la place des modèles dans la discipline économique se trouve au cœur de la réflexion méthodologique qu'il mène à partir de la fin des années 1960. La théorie flux-fonds étant construite à la même époque, elle est directement influencée par cette réflexion.

Chapitre 4

Georgescu-Roegen et la méthodologie de l'économie mathématique

If I finally realized that I was running against one current or another, it was not from any crossing of intellectual swords with my fellow economists, who have systematically shunned such an encounter, but from their personal attitudes toward me. I was a darling of the mathematical economists as long as I kept contributing pieces on mathematical economics. Several things radically changed their mood, especially that of the econometricians.

—Nicholas Georgescu-Roegen (1992)

COMME l'illustre la citation ci-dessus, issue d'un de ses essais autobiographiques, les relations de Georgescu-Roegen avec l'économie mathématique ont été assez conflictuelles. Sa propre personnalité a certainement joué un rôle dans cette situation. Ainsi, comme le rapporte Daly (1995, 154), « ses dernières années [ont] été marquées par l'amertume et le repli sur soi, causés en partie par l'incapacité de la profession à reconnaître son travail comme il le méritait vraiment, et en partie par sa propre personnalité irascible et généralement exigeante ». Cependant, au-delà de ce tempérament difficile, il est clair qu'il y a derrière les rapports entre Georgescu-Roegen et l'économie mathématique une question méthodologique plus profonde. Alors qu'il est reconnu comme un contributeur important de l'économie mathématique dans l'entre-deux-guerres et après la Seconde Guerre mondiale, il en devient de plus en plus critique dans les années 1960. Son principal ouvrage, *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), est en quelque sorte l'aboutissement de ce cheminement. Le titre de cet ouvrage, et le fait que Georgescu-Roegen se concentre par la suite sur les questions environnementales, ont en partie fait passer au second plan sa réflexion méthodologique. Pourtant, loin de se réduire à une réflexion sur les aspects physiques du processus économique, *The Entropy Law and the Economic Process* contient l'exposé le plus complet de sa conception de la science économique et de la place des mathématiques au sein de cette dernière.

Pour bien saisir les enjeux de cette contribution méthodologique, il faut dans un premier temps revenir sur la manière dont le parcours de Georgescu-Roegen s'insère dans les transformations de la discipline économique au cours du 20^e siècle. La distinction entre une période d'entre-deux-guerres « pluraliste » et l'après Seconde Guerre mondiale marquée par la consolidation d'une « orthodoxie néoclassique » est particulièrement importante (Morgan et Rutherford, 1998). Georgescu-Roegen est un témoin et un acteur de cette transformation, et sa réflexion méthodologique apparaît comme une réaction à cette dernière. Elle illustre ainsi la permanence de divergences au sein de l'économie mathématique sur l'orientation à donner à la discipline. Cela invite également à s'intéresser de plus près à ses liens avec d'autres économistes mathématiciens et la manière dont ils reçoivent son approche critique. Cette mise en perspective contextuelle permet ainsi d'identifier les points de sa méthodologie qui nécessitent particulièrement d'être clarifiés.

Ce chapitre se situe donc quelque peu en décalage avec le reste de la thèse. Il n'y est pas directement question de ressources naturelles, d'énergie ou de thermodynamique. Ce détour par la méthodologie de Georgescu-Roegen et la question du rôle des mathématiques en économie est cependant nécessaire pour mieux appréhender sa théorie flux-fonds

de la production dans le chapitre suivant. Il développe en effet cette dernière à la même époque où il affine sa réflexion méthodologique, à partir du milieu des années 1960. Sa réflexion méthodologique et la théorie flux-fonds occupent par la suite une place importante dans *The Entropy Law and The Economic Process* (1971). Enfin, ces deux aspects de la pensée de Georgescu-Roegen servent de cadre à ses travaux des années 1970 sur les aspects physiques du processus économique. Par ailleurs, la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen présente un intérêt en soi. Contrairement à de nombreux économistes, pour Georgescu-Roegen, les questions méthodologiques ne sont pas une préoccupation annexe. C'est la raison pour laquelle il y consacre son principal ouvrage. Celui-ci constitue ainsi une contribution majeure à la méthodologie économique et mérite que l'on s'y intéresse.

Il est d'autant plus important de revenir en détail sur la méthodologie de Georgescu-Roegen que cette facette de son travail a été peu étudiée jusqu'à présent. Parmi les rares influences, les travaux de Philip Mirowski (1989b) sur les relations entre la mécanique et la théorie néoclassique constituent l'un des développements les plus poussés d'une intuition formulée par Georgescu-Roegen. Mirowski montre le rôle qu'a joué la fascination pour la mécanique dans l'introduction des mathématiques en économie. Peu après, Mirowski (1992) fournit le premier aperçu général de la contribution de Georgescu-Roegen à l'économie. Il y donne une idée de sa perspective méthodologique, mais il reste incomplet en ce qui concerne sa conception de la modélisation mathématique. En dehors de cela, on ne trouve pratiquement aucune mention du travail de Georgescu-Roegen dans les principales revues et livres sur la méthodologie économique, tels que l'anthologie éditée par Hausman (2007). La réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen a également eu peu d'écho en économie écologique, alors que ce courant est celui qui se revendique le plus de son approche. De manière plus générale, la question du rôle des modèles mathématiques a été très peu abordée en économie écologique. Ainsi, elle n'est pas étudiée de manière approfondie dans les deux principales contributions récentes à la philosophie de l'économie écologique (Baumgärtner *et al.*, 2008; Spash, 2012).

Dans la continuité de cette thèse, la méthodologie de Georgescu-Roegen est étudiée à l'aide des catégories fournies par la littérature en histoire et philosophie de la modélisation économique. J'utilise en particulier la distinction entre les registres de la *représentation* d'un système donné et des *manipulations* du modèle. En comparaison des autres chapitres, j'apporte davantage d'éléments sur le contexte dans lequel Georgescu-Roegen évolue, afin de mieux saisir sa position quant au rôle des mathématiques en économie. Cette démarche s'appuie sur la littérature historique concernant les transformations de l'économie aux États-Unis au cours du 20^e siècle (Morgan et Rutherford, 1998; Mirowski, 2002; Weintraub, 2002; Dütte et Weintraub, 2014). Elle passe aussi par un examen plus approfondi des archives de Georgescu-Roegen, disponibles à la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library de l'Université de Duke, et en particulier de sa correspondance avec d'autres économistes mathématiciens.

Dans l'ensemble, cette analyse montre que la méthodologie de Georgescu-Roegen met l'accent sur le registre de la représentation, et que sa principale critique envers l'économie mathématique vise le manque de signification économique d'un nombre de modèles

économiques. Il remet également en cause la capacité de l'économétrie à fournir des tests empiriques des théories économiques. Pour lui, l'utilité première des modèles est de permettre de clarifier certains raisonnements et d'en valider la cohérence logique. Mais les raisonnements en question doivent reposer sur des fondements conceptuels ancrés dans l'observation des mécanismes réels, et non dans des préoccupations purement mathématiques. Cette perspective place clairement Georgescu-Roegen en opposition avec l'approche axiomatique qui domine la discipline économique après la Seconde Guerre mondiale. Mais sa critique de l'économétrie le situe également en-dehors d'une tradition mettant davantage l'accent sur les méthodes empiriques. En définitive, son approche est plus proche de celle d'économistes tels que Marshall et Wicksell, pour lesquels les modèles ont avant tout la fonction de rendre un raisonnement plus clair et rigoureux.

Pour montrer cela, la section 4.1 retrace la carrière de Georgescu-Roegen en économie, en parallèle des transformations de la discipline, puis elle s'intéresse à la réception de sa contribution méthodologique dans les années 1970. Cela invite ensuite, dans la section 4.2, à étudier plus en détail sa méthodologie. Cet examen commence par la distinction entre concepts dialectiques et concepts arithmomorphiques, et il se poursuit par l'identification des principes qui doivent guider la construction des modèles selon Georgescu-Roegen.

4.1 De l'économie mathématique à sa critique

4.1.1 Un mathématicien au cœur des transformations de l'économie au 20^e siècle

Afin de mieux comprendre l'intérêt de prêter attention à la méthodologie de Georgescu-Roegen, il est d'abord utile de rappeler sa carrière en économie, en se concentrant sur les aspects liés à l'économie mathématique¹⁹⁰. Georgescu-Roegen est né en Roumanie en 1906. Ses bons résultats à l'école lui donnent accès à une bourse pour faire son doctorat en statistique à la Sorbonne en France, sous la direction d'Émile Borel¹⁹¹. Sa thèse porte sur les composantes cycliques des séries chronologiques. Elle est par la suite publiée dans le *Journal de la société française de statistique* (1930). Georgescu-Roegen passe ensuite un an au Royaume-Uni pour travailler avec Karl Pearson, dont la perspective épistémologique, exposée dans *The Grammar of Science*, l'influence durablement. Puis, il revient alors en Roumanie, où il est nommé professeur de statistique à l'Université de Bucarest.

C'est avec cette solide formation en mathématiques et en statistique que Georgescu-Roegen vient pour la première fois aux États-Unis en 1934, grâce à un financement de la Rockefeller Foundation. Dans cette période d'entre-deux-guerres, aux États-Unis, l'économie se caractérise par un certain « pluralisme » méthodologique et théorique (Morgan et

190. L'essentiel des éléments biographiques qui suivent sont issus des différents écrits autobiographiques de Georgescu-Roegen (1989; 1992; 1993). Il y fournit notamment de nombreux détails sur son initiation à l'économie lors de son premier séjour aux États-Unis, à la fin des années 1930.

191. Borel est à l'époque un mathématicien de premier plan, tant au niveau intellectuel qu'institutionnel. Il contribue par exemple aux fondements des théories de la mesure et des probabilités, et il crée l'Institut Henri-Poincaré.

Rutherford, 1998). Les institutionnalistes, tels que Thorstein Veblen, Wesley C. Mitchell et John R. Commons, ont une influence importante, mais leurs intérêts et leurs méthodes restent très diversifiés. Outre leur aura académique, ils ont également un certain impact sur les politiques de planification mises en œuvre pendant le New Deal. Par ailleurs, à la suite de John B. Clark, la théorie néoclassique s'est ancrée aux Etats-Unis. Dans l'entre-deux-guerres, elle est portée par des économistes tels que Frank Knight et Irving Fisher. Les divergences entre le courant institutionnaliste et la théorie néoclassique sont principalement méthodologiques. Ils portent sur le caractère plus ou moins abstrait de leurs théories¹⁹². Cependant, au niveau institutionnel, ces divergences ne jouent pas un rôle central à cette époque. Les critères de légitimité scientifique reposent davantage sur des qualités personnelles que sur des grands principes méthodologiques. Par ailleurs, institutionnalistes et néoclassiques se côtoient au sein de l'American Economic Association (AEA), et certains économistes combinent les deux approches dans leurs travaux.

Le département d'économie de Harvard, où Georgescu-Roegen va passer un an et demi, est très représentatif de ce pluralisme méthodologique et théorique. Il est à cette époque l'un des départements les plus renommés¹⁹³. Mais ses membres les plus éminents, tels que Frank W. Taussig, Edward H. Chamberlin et Joseph Schumpeter ne s'insèrent clairement ni dans le courant institutionnaliste ni dans le courant néoclassique. Schumpeter est certainement la personnalité la plus influente du département d'économie de Harvard dans les années 1930 et 1940 (Mason, 1982). Arrivé d'Allemagne en 1932, il est fortement influencé par l'école historique allemande, et sa principale contribution est une analyse institutionnelle et historique du changement économique et des cycles. Bien qu'il soit lui-même peu compétent en mathématiques, il s'intéresse à l'approche de Walras et aux développements formels de la théorie néoclassique¹⁹⁴. Ainsi, Schumpeter fait partie des membres fondateurs de l'Econometric Society, créée en 1930 pour promouvoir l'utilisation des mathématiques et des statistiques en économie. Parmi les autres membres fondateurs, on trouve Ragnar Frisch, Irving Fisher, Charles F. Roos, Harold Hotelling, Henry Schultz, Karl Menger, ou encore François Divisia. Schumpeter est également à l'initiative du premier cours d'introduction à l'économie mathématique enseigné à Harvard à partir de 1933. Il l'enseigne lui-même avant de laisser la place à Wassily Leontief, également arrivé en 1932 à Harvard. Malgré cela, à cette époque, « la principale faiblesse du département [d'économie de Harvard] réside dans l'application des mathématiques à l'économie » (Mason, 1982, 430).

C'est pourtant là que Georgescu-Roegen va faire ses premiers pas en économie mathématique en 1934. Initialement, il est censé travailler au sein du Harvard Economic

192. Les institutionnalistes privilégient une approche par des problèmes concrets avec une montée en généralité progressive. À l'inverse, l'approche néoclassique part d'une théorie et de méthodes abstraites, qui sont ensuite appliquées à des problèmes particuliers.

193. Harvard est par exemple parmi les trois premières institutions ayant le plus de publications dans l'*American Economic Review* (AER), des années 1920 aux années 1940 (Backhouse, 1998).

194. Dans son hommage, après le décès de Schumpeter, Samuelson (1951, 99) témoigne ainsi de ses difficultés avec les mathématiques : « But nonetheless he was quite aware of his own lack of facility with mathematics and cheerfully admitted the difficulties he had in mastering and retaining mathematical techniques. »

Barometer. Mais il apprend en arrivant que celui-ci a été fermé, faute d'avoir prédit la crise de 1929. Il entre alors en contact avec Schumpeter, car celui-ci enseigne le cours sur les cycles économiques. Georgescu-Roegen pense que la méthode statistique développée dans sa thèse pourrait être utile dans l'analyse des cycles économiques. Cependant, sous l'influence de Schumpeter, il s'intéresse plutôt aux développements en économie mathématique. Il participe notamment à la rencontre hebdomadaire organisée par Schumpeter sur le sujet, où il fait connaissance entre autres avec Oskar Lange, Nicholas Kaldor et Leontief. C'est également à cette époque qu'il rencontre Paul Samuelson, alors que celui-ci vient d'arriver à Harvard pour finir ses études (Samuelson, 1999). Ils resteront très proches par la suite¹⁹⁵.

C'est dans ce contexte que Georgescu-Roegen fournit en un temps relativement court quatre contributions importantes à la formalisation de la théorie néoclassique¹⁹⁶. Dans les deux premiers articles, il s'intéresse aux facteurs limitants dans la théorie de la production (1935a) et aux courbes d'indifférence dans la théorie du consommateur (1935b). À la demande de Taussig, il intervient également pour résoudre analytiquement une controverse entre Arthur C. Pigou et Milton Friedman au sujet de l'élasticité de demande (Pigou *et al.*, 1936). Mais sa principale contribution durant cette période est son article intitulé « The Pure Theory of Consumer's Behavior » (1936). Celui-ci traite de la question de l'intégrabilité, c'est-à-dire des conditions dans lesquelles un ensemble de préférences peut effectivement être décrit par une fonction d'utilité. Son approche est déjà plus large qu'une simple préoccupation mathématique. Il s'intéresse aux fondements méthodologiques de la théorie du consommateur et aux observations qui peuvent être utilisées pour construire cette théorie (Lenfant, 2012). Dans cette perspective, les mathématiques sont un outil utile pour clarifier les conditions dans lesquelles les fonctions d'utilité existent. Mais selon Georgescu-Roegen, en dernière analyse, la question de savoir si ces conditions sont remplies ou non nécessite de faire appel à des observations factuelles ou à une analyse introspective de nos propres comportements.

Ces contributions valent à Georgescu-Roegen une place parmi les pionniers de l'économie mathématique, à l'époque et encore aujourd'hui. Cependant, comme indiqué précédemment, l'économie est alors encore très pluraliste aux États-Unis. Pour Georgescu-Roegen, l'approche formelle représente clairement la voie la plus simple pour s'introduire en économie, étant donné sa formation. Mais dans ce contexte pluraliste, ses contributions ne peuvent être interprétées comme une adhésion à une forme d'orthodoxie néoclassique, qui n'existe pas encore en tant que telle. Elles lui ouvrent néanmoins une carrière prometteuse, marquée par une proposition de rejoindre le département d'économie de Harvard et un projet de traité d'économie théorique avec Schumpeter¹⁹⁷. Mais Georgescu-Roegen

195. Durant son séjour aux États-Unis, Georgescu-Roegen fait également un tour des principales universités. Il rencontre Schultz à Chicago, rend visite à Roos à la Cowles Commission dans le Colorado, présente dans le séminaire de Griffith C. Evans en Californie, et discute avec Hotelling et Fisher sur le chemin du retour vers Harvard.

196. Afin de souligner la rapidité de cette ascension, il convient de préciser que trois d'entre elles furent publiées dans le *Quarterly Journal of Economics* (QJE) et la dernière dans la *Review of Economic Studies* (RES).

197. Ce projet est rapporté non seulement par Georgescu-Roegen (1992, 132), mais également par

rejette l'offre afin de retourner en Roumanie en 1937, où il estime pouvoir être utile à son pays natal. Ce choix est d'autant plus étonnant dans un contexte où de nombreux universitaires européens suivent le chemin inverse (Hagemann, 2011).

En Roumanie, Georgescu-Roegen retrouve son poste de professeur de statistique et travaille en parallèle comme directeur adjoint de l'Institut central de statistique en charge d'organiser les statistiques économiques. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, il devient Secrétaire général de la Commission d'armistice, et il participe aux négociations concernant les réparations que la Roumanie doit verser à l'URSS. Parallèlement, il s'implique dans la vie politique en tant que membre du Conseil national du Parti national paysan¹⁹⁸. Toutes ces activités lui laissent peu de temps pour travailler sur des questions théoriques en économie. *A posteriori*, il qualifie lui-même cette période d'« hibernation intellectuelle » (1993, 3).

Lorsque les communistes arrivent au pouvoir en Roumanie, Georgescu-Roegen doit fuir en raison de ses liens avec les pays occidentaux et de son rôle de défenseur de la souveraineté roumaine dans les négociations d'armistice. Il revient aux États-Unis en juillet 1948 grâce à l'aide de Leontief, qui lui offre un poste temporaire au sein de son Harvard Economic Project. La situation est cependant très différente de celle de l'entre-deux-guerres. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'économie est entrée dans une phase de transformation profonde qui accorde davantage de poids aux mathématiques et aux statistiques dans la discipline (Morgan et Rutherford, 1998). La formalisation mathématique devient progressivement le standard de l'objectivité, alors que cette dernière était davantage associée à une attitude personnelle avant la guerre. Cette transformation a été stimulée pendant la guerre par l'application des théories économiques formalisées à divers problèmes pratiques. La vision de l'Econometric Society l'emporte progressivement¹⁹⁹. Cette vision consistait initialement à combiner de manière étroite les théories formalisées et leur confrontation avec les données empiriques. Mais le programme se scinde progressivement en deux, avec d'un côté l'économie mathématique et de l'autre l'économétrie.

Une autre institution joue un rôle moteur dans cette transformation : la Cowles Commission for Research in Economics, créée en 1932 par l'investisseur Alfred Cowles, avec pour objectif de mieux prédire le comportement des marchés financiers. Dès les débuts, la Cowles est étroitement liée à l'Econometric Society, via notamment Fisher, Hotelling et Frisch (Düppe et Weintraub, 2014). À partir de 1939, elle s'installe à l'Université de Chicago. Mais c'est à partir de 1943, et l'arrivée de Jacob Marschak en qualité de di-

Samuelson (1999, xiii), qui mentionne que « Schumpeter admirait ardemment Nicholas et lui a proposé de se joindre à lui pour écrire un grand traité théorique ».

198. Le Parti national paysan est créé en 1926 par la fusion d'un parti conservateur et d'un parti agrarien plus progressiste. Il se présente comme une alternative à la domination du Parti national libéral. Sa position politique ambiguë l'amène à soutenir la monarchie de Carol II entre 1930 et 1940, puis à s'opposer au régime fasciste au pouvoir en Roumanie durant la Seconde Guerre mondiale. Temporairement influent à la sortie du conflit, il est vivement réprimé par le régime communiste, puis interdit à partir de 1947.

199. Cette transformation est notamment visible à travers les publications des trois principales revues d'économie, l'AER, le QJE, et le *Journal of Political Economy* (JPE) (Backhouse, 1998). Les publications théoriques y progressent fortement entre 1930 et 1960, passant de 20 % à 45 % du total. Sur la même période, au sein de ces publications théoriques, l'utilisation des mathématiques progresse encore plus fortement, passant de 20 % à 70 %.

recteur, qu'elle devient réellement importante dans le programme de formalisation de la théorie économique. La Cowles s'intéresse un temps aux questions empiriques, au travers notamment des travaux de Lawrence Klein. Mais elle se concentre progressivement sur l'économie mathématique pure. En 1948, ce tournant est symbolisé par l'arrivée à sa tête de Tjalling Koopmans, qui devient le porte voix de cette orientation méthodologique. Il s'engage notamment dans une controverse avec le National Bureau of Economic Research (NBER), dont il juge l'approche trop « athéorique » (Koopmans, 1947, 1949; Vining, 1949)²⁰⁰. Quelques années plus tard, Koopmans expose de manière plus complète sa perspective dans *Three Essays on the State of Economic Science* (1957), qui devient la référence méthodologique de la Cowles.

Pour financer les activités de la Cowles, Koopmans se rapproche de la RAND Corporation. La RAND est un ancien département de recherche opérationnelle de l'U.S. Air Force, devenu en 1948 un institut de recherche autonome, mais toujours financé par l'armée. Elle joue également un rôle important dans la promotion de l'économie mathématique, pendant et après la guerre. C'est dans ce contexte que la Cowles organise en juin 1949 une conférence intitulée « Activity Analysis of Production and Allocation », qui apparaît rétrospectivement comme un événement structurant pour la communauté des économistes mathématiciens d'après-guerre (Düppe et Weintraub, 2014). Les trois principaux groupes représentés dans la conférence sont les membres de la Cowles, tels que Koopmans, Kenneth Arrow et Herbert Simon, ceux associés à la RAND, comme Samuelson et George Dantzig, et ceux de Princeton, notamment Oskar Morgenstern. Georgescu-Roegen est le seul à venir de Harvard, Leontief lui-même n'assistant pas à la conférence. Les aspects théoriques de l'analyse input-output constituent pourtant l'un des sujets centraux de la conférence, aux côtés de la théorie des jeux et de la programmation linéaire. La conférence permet ainsi la diffusion des outils mathématiques qui seront par la suite au cœur des développements de l'économie mathématique dans les années suivantes, notamment de la théorie de l'équilibre général. De manière plus générale, cette conférence constitue « l'acte de naissance d'une nouvelle communauté épistémique », dans laquelle le recours aux mathématiques devient une évidence pour garantir une certaine rigueur à l'analyse économique (Düppe et Weintraub, 2014, 479).

Pour Weintraub (2002), la transformation à l'œuvre en économie à cette époque tient moins à l'introduction de nouveaux outils mathématiques, qu'à un changement d'*image* associée aux mathématiques. Par image, il entend une certaine conception de la rigueur mathématique. Au cours du 19^e siècle, la vision dominante de la rigueur mathématique était fondée sur l'existence d'un substrat physique au raisonnement mathématique. Le raisonnement devait donc être en prise directe avec ce qui était perçu comme la perception sensorielle du monde. Mais, au début du 20^e siècle, une série de paradoxes en physique et en mathématiques amène à des transformations profondes. L'image dominante devient alors celle de l'axiomatisation, qui consiste à identifier un ensemble aussi restreint que possible d'axiomes, à partir desquels les autres propositions sont déduites logiquement. Cette approche privilégie ainsi la structure formelle de la théorie plutôt que les relations avec l'expérience factuelle. Ses plus éminents représentants sont David Hilbert et les

200. Sur ce sujet, voir notamment Mirowski (1989a).

membres du groupe Bourbaki²⁰¹. L'influence de l'approche axiomatique en économie passe notamment par des mathématiciens tels que John von Neumann, disciple de Hilbert, et Gérard Debreu, formé dans la tradition bourbakiste. Selon Weintraub, c'est cette conception de l'usage des mathématiques qui va devenir dominante en économie après la Seconde Guerre mondiale²⁰².

Georgescu-Roegen est un témoin, et un acteur, de ce moment historique dans la transformation de la discipline économique. Lors de la conférence de la Cowles, il présente trois contributions, ultérieurement publiées dans les actes de la conférence (Koopmans, 1951). Ces contributions portent sur les propriétés des modèles linéaires de Leontief et de von Neumann, ainsi que sur la modélisation des phénomènes de relaxation dynamique. Georgescu-Roegen insiste en particulier pour que sa démonstration du théorème de non-substitution soit reconnue comme ayant été obtenue de manière indépendante à celle de Samuelson (Düppe et Weintraub, 2014)²⁰³. Cette insistance reflète ainsi la nécessité pour lui de retrouver une certaine légitimité au sein du milieu universitaire, après des années d'absence. Il publie par ailleurs un état des lieux de l'analyse input-output dans *The Review of Economics and Statistics* (1950a). Ainsi, Georgescu-Roegen retrouve rapidement une place dans la communauté des économistes mathématiciens.

Les opportunités prestigieuses qui se présentaient à lui avant la guerre ne sont cependant plus d'actualité. Georgescu-Roegen n'est plus le jeune économiste mathématicien prometteur des années 1930. Schumpeter n'est plus aussi influent à Harvard, et il décède en janvier 1950. Le département d'économie de Harvard lui-même a accumulé un retard important en matière d'économie mathématique, alors que cette dernière devient centrale dans la discipline. De ce fait, son influence chute dans les années 1950, au profit notamment du département d'économie du Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Backhouse, 1998). La filiation entre les deux départements est cependant importante. Les anciens doctorants de Harvard, Samuelson d'abord, puis Robert M. Solow, vont fortement contribuer à la renommée du MIT. Dans le même temps, ils conservent des liens forts avec leur institution d'origine (Cherrier, 2014).

Georgescu-Roegen obtient néanmoins un poste de professeur d'économie à l'Université de Vanderbilt dès la fin de l'année 1949. Il y passe le reste de sa carrière. Dans ce département d'économie de taille modeste, il occupe une place centrale (Suprinyak, 2018). Vanderbilt devient dans les années 1950 une université pionnière en économie du développement. Cela fait écho aux propres préoccupations de Georgescu-Roegen pour ce sujet, suscitées par son expérience en Roumanie. Il insiste notamment sur le caractère

201. Hilbert est un mathématicien allemand, reconnu comme l'un des mathématiciens les plus influents du 20^e siècle. Il a notamment fourni de nouvelles bases axiomatiques à la géométrie. Il est également célèbre pour son « programme de Hilbert », élaboré à partir de 1900, et visant à une refondation des mathématiques. Le groupe Bourbaki est un groupe de mathématiciens français formé à partir de 1935. L'une de ses principales contributions est la rédaction d'une série d'ouvrages visant à présenter une vision d'ensemble des mathématiques dans une perspective axiomatique.

202. Le fait qu'elle devienne dominante ne signifie qu'elle est la seule acceptable, mais plutôt qu'elle est celle qui recueille le plus prestige au sein de la discipline.

203. Ce théorème porte sur un modèle de Leontief dans lequel certaines possibilités de substitution sont présentes dans les différents secteurs. Il montre que sous certaines conditions, les changements dans la structure de la demande n'engendrent pas pour autant de substitution.

inapproprié de la théorie néoclassique, et en particulier de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, dans le cadre d'une économie sous-développée (1966b [1955]). Cependant, dans les années 1950, ses publications restent principalement consacrées à la théorie du choix. Elles traitent par exemple du phénomène d'hystérèse (1950b), de l'incertitude (1954), et des effets de seuil (1958b). Ces contributions sont méthodologiquement compatibles avec les développements de l'économie mathématique, bien que certaines de leurs innovations théoriques soient assez originales dans la littérature (Hands, 2006).

En 1950, Georgescu-Roegen est élu Fellow de l'Econometric Society et il est nommé éditeur associé d'*Econometrica*. Dans ce cadre, il est notamment en charge du processus de révision de l'article d'Arrow et Debreu, dans lequel ils présentent leur modèle d'équilibre général. Cet article apparaît *a posteriori* comme l'une des principales réalisations du programme axiomatique en économie. Georgescu-Roegen reçoit deux avis contradictoires de la part des rapporteurs, de sorte qu'il lui revient de trancher. Il prend la décision d'accepter le papier. Cette décision favorable s'accompagne cependant d'une série de dix-sept remarques qui, selon Weintraub et Gayer (2001, 435), « ouvrent plus ou moins la voie à bon nombre des questions qui seront ensuite abordées dans les discussions méthodologiques sur ce que l'on a appelé le modèle Arrow-Debreu ». Georgescu-Roegen (1960a) développe par la suite certaines de ces critiques. Il affirme notamment que le modèle Arrow-Debreu est inutile en pratique, car il suppose que chaque agent a une dotation initiale suffisante pour survivre indépendamment de tout échange²⁰⁴.

Cette critique souligne l'attention que Georgescu-Roegen porte aux relations entre les hypothèses d'un modèle et les caractéristiques du monde réel. Cette voie l'amène progressivement à questionner de manière plus générale la possibilité de formaliser mathématiquement divers aspects de la théorie économique. Suivant Mirowski (1992), l'article intitulé « The Nature of Expectations and Uncertainty » (1958a) apparaît comme une étape importante dans cette direction. Dans cet article, Georgescu-Roegen suggère que la formalisation des anticipations nécessite au préalable une discussion philosophique des différentes conceptions de la probabilité. Pour lui, les mathématiques peuvent être un outil utile pour discuter de manière rigoureuse certaines questions conceptuelles uniquement si les fondements conceptuels eux-mêmes sont clairs. Or, la formalisation mathématique ne permet de saisir que certains aspects des anticipations, et non l'intégralité de l'expérience humaine à laquelle elles font référence. Il résume cela dans la dernière phrase de l'article, où il affirme qu'il y a « une limite à ce que nous pouvons faire avec les nombres, comme il y a une limite à ce que nous pouvons faire sans eux » (1958a, 29).

Ces préoccupations méthodologiques occupent de plus en plus de place dans les travaux de Georgescu-Roegen au cours des années 1960. Il tente de donner des bases philosophiques solides à sa critique envers une certaine dérive de l'économie mathématique. L'introduction qu'il écrit pour un recueil d'articles intitulé *Analytical Economics* (1966a) est sa première contribution approfondie sur ce sujet²⁰⁵. Dans l'avant-propos qu'il écrit

204. Rétrospectivement, Georgescu-Roegen (1992) considère que cette critique a joué un rôle important dans sa marginalisation ultérieure.

205. La même année, Georgescu-Roegen (1976b [1966]) publie également un article écrit pour une conférence en hommage à Corrado Gini. La première partie est consacrée à une critique des « Excès du

pour ce volume, Samuelson (1966a) montre combien cette contribution est accueillie de manière ambiguë par les économistes mathématiciens. D'une part, il présente Georgescu-Roegen comme « un érudit parmi les érudits, un économiste parmi les économistes ». Samuelson estime que son introduction est un « essai long et profond qui touche aux fondements mêmes de la possibilité d'une science économique purement quantitative » (vii). Il défie même « tout économiste averti de rester complaisant après avoir médité sur cet essai » (ix). Mais, d'autre part, Samuelson suggère que les critiques passées de l'économie mathématique, telles que celles de Marshall, Pigou, et Keynes, ont été battues en brèche par les succès ultérieurs de cette approche. Même s'il ne le dit pas explicitement, cela laisse penser que la critique de Georgescu-Roegen pourrait subir le même sort.

En résumé, dans cette première période allant des années 1930 aux années 1960, la position de Georgescu-Roegen par rapport à l'économie mathématique est ambiguë à deux égards. Au niveau institutionnel, son retour en Roumanie constitue une rupture significative dans sa carrière, au moment même où l'économie se transforme en profondeur, et l'économie mathématique monte en puissance. Même s'il s'est rapidement réintégré dans la communauté par la suite, cela affecte sa carrière ultérieure et lui donne moins d'influence dans la discipline. En ce qui concerne les aspects intellectuels, sa conception spécifique du rôle des mathématiques en économie l'amène à prendre ses distances avec un certain nombre de développements en économie mathématique. De son article sur l'intégrabilité, questionnant l'existence des fonctions d'utilité, à sa discussion des anticipations, en passant par ses remarques critiques sur le modèle Arrow-Debreu, il est clair que ses préoccupations méthodologiques sont présentes de longue date, même si elles apparaissent pour la première fois de manière explicite dans son introduction à *Analytical Economics*. Par conséquent, tant sur le plan institutionnel qu'intellectuel, Georgescu-Roegen se trouve dans une position ambiguë, à la fois à l'intérieur et distant par rapport à l'économie mathématique.

4.1.2 La réception de la critique de Georgescu-Roegen

L'introduction d'*Analytical Economics* est le premier pas vers une présentation plus développée de la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen dans *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Cet ouvrage traite en partie des aspects physiques des activités économiques, et de l'importance des lois de la thermodynamique pour en rendre compte (cf. chapitre 1^{er}). Cependant, il ne se réduit pas à cette seule dimension. De manière plus générale, Georgescu-Roegen y développe sa conception de la science économique en la mettant en perspective avec la philosophie des sciences²⁰⁶. Dans ce cadre, le rôle des mathématiques et des méthodes quantitatives occupe une place centrale. Son point de vue sur la question est examiné plus en détail dans la prochaine section. Pour le moment, la citation suivante résume bien sa critique de l'utilisation des modèles mathématiques en économie, dont il en reconnaît néanmoins l'utilité dans certaines conditions

formalisme mathématique ». Les autres sections portent sur des questions économétriques.

206. Pour cela, Georgescu-Roegen discute les idées de philosophes, tels que Platon, Aristote, Friedrich Hegel et Henri Bergson, ainsi que celles de scientifiques, tels que Henri Poincaré, Emile Borel, Alfred North Whitehead et Bertrand Russel.

spécifiques²⁰⁷ :

Lest this position is misinterpreted again by some casual reader, let me repeat that my point is not that arithmetization of science is undesirable. Whenever arithmetization can be worked out, its merits are above all words of praise. My point is that wholesale arithmetization is impossible, that there is valid knowledge even without arithmetization, and that mock arithmetization is dangerous if peddled as genuine. (Georgescu-Roegen, 1971, 15)

À la même époque, des critiques similaires de l'économie mathématique sont formulées par d'autres économistes ayant participé à son essor. C'est notamment le cas de Leontief. Ce dernier laissait déjà percevoir une certaine opposition à la perspective méthodologique développée par Koopmans à la Cowles dans les années 1950 (Akhabbar, 2019). Tout en adhérant à la nécessité de formaliser la théorie dans un cadre analytique, il critique la focalisation de la Cowles sur les propriétés mathématiques abstraites des modèles. Cette critique vise aussi la manière très formelle dont la Cowles traite du modèle input-output, à l'image des contributions de la conférence de 1949 (Koopmans, 1951). Leontief insiste au contraire sur la nécessité de construire les modèles de sorte que les données empiriques puissent y être aisément introduites. Il critique au passage l'idée que les méthodes économétriques soient en mesure de fournir des tests empiriques des théories. C'est dans cette perspective que s'insère le dispositif input-output, et l'important travail de collecte et d'organisation des données qui l'accompagne. Cette critique prend une tournure plus directe dans le discours présidentiel que Leontief prononce devant l'AEA en décembre 1970 :

Uncritical enthusiasm for mathematical formulation tends often to conceal the ephemeral substantive content of the argument behind the formidable front of algebraic signs. [...] By the time it comes to interpretation of the substantive conclusions, the assumptions on which the model has been based are easily forgotten. But it is precisely the empirical validity of these assumptions on which the usefulness of the entire exercise depends. (Leontief, 1971, 1-2)

Les similitudes avec la critique de Georgescu-Roegen sont très importantes. Tout d'abord, Leontief et Georgescu-Roegen sont tous deux préoccupés par la tendance de la modélisation économique à se transformer en exercice purement mathématique sans signification économique. Ils mettent ainsi l'accent sur le réalisme des modèles. Deuxièmement, Leontief soutient que les tests économétriques ne fournissent pas une norme satisfaisante de validation empirique parce qu'ils reposent sur des hypothèses invérifiables concernant les caractéristiques stochastiques, un problème également soulevé par Georgescu-Roegen (1976b [1966]). Troisièmement, Leontief suggère que la structure de l'économie change constamment, faisant écho à l'ontologie évolutionnaire sous-jacente à l'approche de Georgescu-Roegen (cf. chapitre 1^{er}). Enfin, Leontief préconise de franchir les frontières conventionnelles de l'économie et de créer des relations interdisciplinaires avec l'ingénierie, à l'instar de l'intérêt de Georgescu-Roegen pour la thermodynamique.

207. Ici, la notion d'« arithmétisation » doit être comprise au sens large comme toute forme de formalisation mathématique. Un examen plus détaillé en sera fourni dans la sous-section 4.2.1.

Malgré ces nombreux points communs, Georgescu-Roegen (1975, 365f, 41) mentionne seulement brièvement la critique de Leontief, et ils ne semblent pas avoir essayé de collaborer plus étroitement sur cette question. En particulier, rien dans la correspondance entre Georgescu-Roegen et Leontief, disponible dans les archives du premier à la David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library de l'Université de Duke, ne traite de ces questions. Pourtant, certains de leurs échanges datent de cette période. Une raison possible est qu'au-delà de ces points communs, il y a aussi d'importantes divergences. En particulier, Leontief accorde beaucoup d'importance aux méthodes empiriques, tandis que Georgescu-Roegen s'intéresse davantage aux questions conceptuelles. Une autre raison possible tient davantage à leurs relations personnelles, et notamment à un certain ressentiment de la part de Georgescu-Roegen envers Leontief. Ce point est également abordé plus loin²⁰⁸.

De manière générale, le livre de Georgescu-Roegen ne retient pas l'attention des économistes mathématiciens. Aucun d'entre eux ne publie de recension du livre ou ne réagit publiquement de toute autre manière. Ce silence mérite par exemple d'être comparé à la réaction qu'avait suscitée la brève critique de l'économie mathématique formulée par David Novick (1954). Cette critique avait déclenché une vive réponse des économistes mathématiciens les plus éminents, tels que Samuelson, Solow et Koopmans (Samuelson *et al.*, 1954)²⁰⁹. Ce débat s'inscrivait dans une phase de consolidation de l'économie mathématique, dans laquelle il était encore nécessaire de défendre la légitimité de cette approche. Au début des années 1970 au contraire, la critique de Georgescu-Roegen, bien que plus développée, ne semble pas très inquiétante pour les économistes mathématiciens, dont l'approche est devenue dominante dans la discipline.

Ce silence est d'autant plus intrigant que Georgescu-Roegen occupe encore à l'époque une position plutôt favorable dans la discipline, comme en témoignent deux distinctions prestigieuses : il est Richard T. Ely Lecturer en décembre 1969, et il devient Distinguished Fellow de l'AEA en 1971. Cette année-là, les deux autres récipiendaires de cette distinction, créée en 1965, sont Leontief et Koopmans. On récompense donc à la fois le principal défenseur de l'orientation standard en économie mathématique et ceux qui la critiquent. Le texte qui accompagne la nomination de Georgescu-Roegen ne s'y trompe pas. Il mentionne à la fois ses contributions à l'économie mathématique et ses considérations critiques sur le sujet :

No American economist has more successfully combined in his training and publications the fields of economics, mathematics, and statistics. Yet Georgescu-Roegen has remained a signal defender of the view that many important problems are beyond the reach of numbers. (American Economic Association, 1972)

208. Parmi les critiques de l'économie mathématique, Georgescu-Roegen (1975, 365f, 41 ; 1979d, 321) évoque également à plusieurs reprises un discours de Ragnar Frisch au premier congrès mondial de l'Econometric Society en 1965. Cependant, là encore la référence est brève, et il ne semble pas y avoir eu de constitution d'un front commun. Le discours de Frisch a par ailleurs été publié plus tard dans un volume en l'honneur de Sir Roy Harrod (Frisch, 1970).

209. Voir Mirowski (2002, 396-406) pour plus de détails sur ce débat. Georgescu-Roegen (1979d, 318) se référera plus tard à ce précédent.

Malgré cela, aux États-Unis, les recensions de son livre sont écrites par des physiciens, des institutionnalistes, et des économistes inclassables, tels que Kenneth Boulding. Frank Adelman (1972), un physicien, écrit une recension pour le *Journal of Economic Literature*²¹⁰. Quatre autres compte-rendus paraissent dans le *Journal of Economic Issues* (Schlegel *et al.*, 1973), un journal identifié au courant institutionnaliste. Une recension est également écrite par Robert A. Solo (1974), qui se définit lui-même comme « un hérétique extérieur à la forteresse » de l'économie mathématique²¹¹. Enfin, Boulding (1972) publie une recension de l'ouvrage de Georgescu-Roegen dans *Science*²¹².

Les différentes recensions accueillent favorablement l'ambition philosophique générale du livre de Georgescu-Roegen. Adelman (1972, 458) remarque que l'ouvrage « porte bien davantage sur la philosophie qui doit inévitablement sous-tendre les théories et modèles valables et utiles de l'activité économique, que sur la loi de l'entropie ». Boulding (1972, 1099) note que le livre devrait être recensé par « un économiste, un thermodynamicien et un philosophe de sciences ». Par conséquent, même si la plupart des compte-rendus consacrent une certaine attention aux aspects purement physiques du processus économique, le sujet qui y occupe le plus de place est bien la perspective méthodologique de Georgescu-Roegen et son rapport à l'économie mathématique. Adelman est généralement d'accord avec les vertus et les limites des mathématiques mises en avant par Georgescu-Roegen. Il suggère néanmoins que les critères permettant de départager les bonnes et mauvaises pratiques de modélisation demanderaient à être clarifiées. De même, Boulding (1972, 1099-1100) dit avoir de la « sympathie » pour la critique de Georgescu-Roegen envers l'économie mathématique, même s'il déplore que l'approche dialectique de ce dernier ne « fournit pas vraiment de substitut »²¹³. Solo note quant à lui les similitudes avec le discours de Leontief en 1970, et il souligne que ces deux contributions sont d'autant plus importantes qu'elles viennent de pionniers de l'économie mathématique. Dans l'ensemble, la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen est donc bien accueillie par ces auteurs. Ils perçoivent très clairement sa portée critique envers l'économie mathématique. Ils soulignent néanmoins le caractère très général de cette critique et la difficulté à en cerner les conséquences pratiques.

210. Frank et Irma Adelman (1959) ont effectué la première simulation informatique d'un modèle macroéconomique, le modèle Klein-Goldberger. Mis à part cela, la contribution de Frank Adelman à l'économie est limitée. Irma Adelman a réalisé des travaux importants en macroéconomie et en économie du développement.

211. Pour éviter tout doute, il faut préciser ici qu'il n'y a pas d'erreur typographique, et qu'il ne s'agit pas de Robert M. Solow.

212. D'autres notes de lecture sont publiées en dehors des États-Unis. En France, par exemple, deux recensions sont publiées dans la *Revue d'économie politique* (Guitton, 1972) et la *Revue économique* (Green, 1974). De manière générale, Georgescu-Roegen entretient des liens étroits avec certains économistes français, tels que François Perroux et Henri Guitton. Il est également professeur invité à l'Université de Strasbourg à la fin des années 1970.

213. Notons néanmoins que Boulding s'oppose vivement à la critique de Georgescu-Roegen envers la fonction de production néoclassique. Il s'agit là d'une réaction à l'attaque formulée par Georgescu-Roegen à son égard : « To quote Boulding again, a "basic transformation function of an enterprise is its *production function*, which shows what quantities of inputs (factors) can be transformed into what quantities of output (product)." In this short sentence, there is packed almost every misleading notion that surrounds the conception of process in the economic literature. » (Georgescu-Roegen, 1971, 235)

À l'inverse, l'ouvrage de Georgescu-Roegen a reçu peu d'attention de la part des économistes mathématiciens. À ma connaissance, dans les années 1970, aucun commentaire n'a été fait par un économiste plus ou moins lié à l'économie mathématique dans une publication officielle²¹⁴. Dans cette situation, il paraît particulièrement important de voir ce que l'on peut trouver à cet égard dans les archives de Georgescu-Roegen. Cependant, cette démarche se révèle également décevante. L'un des rares éléments est une lettre datée du 7 décembre 1973, dans laquelle John Hicks mentionne qu'il est « très en sympathie avec [la] position générale » de Georgescu-Roegen, après avoir lu son livre (Georgescu-Roegen, archives, box 23, dossier : Hicks, John, 1973-1975). Cependant, cet avis favorable porte principalement sur la question des aspects irréversibles et évolutifs du processus économique. Hicks n'aborde pas directement les questions méthodologiques liées à la modélisation mathématique²¹⁵. L'autre endroit où l'on pourrait s'attendre à trouver des éléments sur le sujet est la conférence en l'honneur de Georgescu-Roegen qui se tient en 1975 à Vanderbilt, et qui réunit Joseph Spengler, Simon Kuznets, John Chipman, James Moore, Boulding, Hicks et Samuelson²¹⁶. Cependant, une fois de plus, aucune de leurs contributions n'est directement liée aux questions méthodologiques soulevées par Georgescu-Roegen, comme le montre les actes de la conférence (Tang *et al.*, 1976).

Deux explications complémentaires à cette absence de réaction peuvent être identifiées. La première est plutôt institutionnelle, au sens où elle repose sur la position de Georgescu-Roegen par rapport aux autres économistes mathématiciens. Georgescu-Roegen reste attaché à faire reconnaître ses contributions à l'économie mathématique. Ainsi, dans une lettre à Samuelson datée du 31 août 1974, il se plaint du fait que Leontief « ne [l']a jamais cité malgré [sa] contribution importante aux modèles input-output statiques et dynamiques » (Georgescu-Roegen, archives, box 25, dossier : Samuelson, Paul, 1953-1989). Par ailleurs, Georgescu-Roegen continue à discuter de questions mathématiques techniques avec Hicks et Samuelson, en relation avec certains de leurs travaux. Dans une lettre datée du 3 mars 1975, Georgescu-Roegen discute la représentation de la théorie ricardienne proposée par Hicks et propose à ce dernier huit pages d'analyse du système différentiel correspondant (Georgescu-Roegen archives, box 23, dossier : Hicks, John, 1973-1975)²¹⁷. De même, dans une lettre datée du 2 mars 1976, Georgescu-Roegen envoie à Samuelson ses commentaires sur l'article présenté par ce dernier lors de la conférence en l'honneur de Georgescu-Roegen. Là encore, Georgescu-Roegen discute certains détails mathématiques et conclut que l'article montre « ce que Samuelson peut faire lorsqu'il s'empare d'une idée simple sur laquelle d'autres pourraient s'endormir à tout

214. Nous examinerons cependant plus loin la réaction de Rashid (1981) à une publication ultérieure de Georgescu-Roegen.

215. Notons que Georgescu-Roegen a une opinion très favorable de la pratique de l'économie mathématique par Hicks, comme il le notera plus tard : « In my earliest contributions I even ran with the current, which was then to expand the legitimate use of mathematics in economics, a program in which I have never ceased to believe and for which my exemplar is Sir John Hicks. » (1992, 155-156)

216. Jan Tinbergen est aussi invité, mais il ne peut pas venir. Il contribue néanmoins au livre publié par la suite.

217. L'article en question sera par la suite publié par Hicks et Hollander (1977), accompagné de remerciements pour l'aide de Georgescu-Roegen.

jamais ou à laquelle ils ne penseraient même pas » (Georgescu-Roegen, archives, box 25, dossier : Samuelson, Paul, 1953-1989). Dans l'ensemble, ces éléments montrent que Georgescu-Roegen est toujours désireux de faire partie de la communauté des économistes mathématiciens et d'être reconnu par eux. Il est possible que cet attachement ait brouillé le message qu'il tentait d'adresser au même moment à travers sa critique méthodologique de l'économie mathématique.

En outre, Georgescu-Roegen vise rarement personnellement des figures importantes de l'économie mathématique. Il se peut donc qu'aucun d'entre eux ne se sente directement concerné par sa critique. Une exception à cette remarque se trouve dans son article intitulé « *Methods in Economic Science* » (1979d), dans lequel il présente une version condensée et actualisée de sa position méthodologique. À cette occasion, il affirme que « l'exemple le plus frappant de mathématisation vide de sens a été publié avec l'aide directe de nul autre que Koopmans » (318). Le modèle en question est celui représentant un marché avec un continuum d'agents, d'abord formulé par Aumann (1964) et ensuite étendu par Brown et Robinson (1972)²¹⁸. Georgescu-Roegen critique ce modèle au motif qu'un continuum d'agents, infini par définition, ne peut être considéré comme une approximation satisfaisante d'un marché réel, nécessairement fini. Il reproche à Koopmans d'avoir soutenu l'article de Brown et Robinson devant la National Academy of Science. Cet exemple, ainsi que ses relations avec Hicks et Samuelson, montrent que la critique de Georgescu-Roegen ne vise pas directement les travaux des fondateurs de l'économie mathématique. Il reproche surtout à ces derniers de ne pas s'opposer à la tendance qui conduit par la suite à ce qu'il considère comme un dévoiement de l'économie mathématique. Notons que cette attaque envers Koopmans donnera lieu à l'une des rares réponses aux critiques de Georgescu-Roegen, non de la part de Koopmans lui-même, mais de la part de Salim Rashid (1981), un ancien étudiant de Koopmans. Rashid soutient que l'idée d'un marché avec un continuum d'agents est utile afin de résoudre certains problèmes d'indétermination dans le cas d'un nombre fini d'agents. Cependant, il reconnaît que Georgescu-Roegen a été « la conscience méthodologique de la profession pendant plus d'une décennie » (183), et que ses « arguments [n'ont] reçu aucune réponse satisfaisante » (186).

Les ambiguïtés dans la manière dont Georgescu-Roegen interagit avec les économistes mathématiciens ont certainement joué un rôle dans l'absence de réelle réaction à sa critique méthodologique. Cependant, une explication encore plus importante se dégage de l'avant-propos de Samuelson à un livre en l'honneur de Georgescu-Roegen, publié après son décès :

After the age of 60 he moved ahead from his mainstream mathematical economics researches into a new phase. It is not easy to be both profound and at the same time clear. What is his new kind of economics that goes beyond the Newton-Bacon logic of observation and theoretical rationalization thereof,

218. Formellement, un continuum d'agents est simplement un ensemble d'agents indexé par l'ensemble des nombres réels. C'est-à-dire que chaque nombre réel correspond à un agent, qui exprime ses offres et ses demandes sur le marché. Comme l'ensemble des nombres réels, l'ensemble des agents ainsi considéré est donc nécessairement infini, et même indénombrable.

and which asserts that “B can be both A and non-A?” What will be the fruits of a methodology that rejects the “superstition as dangerous as the animism of old: that of the Almighty Arithmophonic [*sic*] Concept’? (Samuelson, 1999, xiii)

Samuelson suggère que la position méthodologique de Georgescu-Roegen n’est pas claire. En particulier, son approche philosophique du sujet, qui repose sur la distinction entre concepts arithmomorphiques et concepts dialectiques, apparaît comme un obstacle à la compréhension des implications plus pratiques. Ceci incite à réexaminer en détail la méthodologie de Georgescu-Roegen afin de clarifier la nature de sa critique de l’économie mathématique.

4.2 La méthodologie de Georgescu-Roegen

La section précédente a montré que la perspective méthodologique de Georgescu-Roegen a été dans une large mesure ignorée par les économistes mathématiciens de son époque. De manière tout aussi étonnante, cette perspective a fait l’objet de peu de discussions parmi ceux qui se revendiquent de l’héritage intellectuel de Georgescu-Roegen. Il est notamment important de souligner que la question du rôle des modèles mathématiques a été très peu abordée en économie écologique, et *a fortiori* que la réflexion de Georgescu-Roegen sur le sujet n’y a pas été examinée en détail. On trouve de brèves analyses de cette question dans les ouvrages qui proposent une vision générale de l’approche de Georgescu-Roegen (Beard et Lozada, 1999; Missemmer, 2013), mais aucun d’entre eux ne fournit vraiment une compréhension fine de sa position par rapport à la modélisation mathématique. Au contraire, ils tendent parfois à en faire une interprétation simpliste, selon laquelle les concepts dialectiques seraient définitivement impropres à toute modélisation :

Important economic categories, including such concepts as “commodity,” “expectation,” and “money,” are dialectical rather than arithmomorphic ideas, and do not exhibit the discrete boundaries necessary to adequately represent them by real numbers. (Beard et Lozada, 1999, 22)

La position de Georgescu-Roegen sur ce sujet est cependant loin d’être univoque, et cette section montre qu’une autre interprétation est possible. Selon cette interprétation, la pertinence d’une formulation mathématique dépend d’une procédure de simplification progressive de la réalité. Dans cette procédure, les concepts dialectiques jouent un rôle central, mais ils ne constituent pas *a priori* un obstacle insurmontable à toute formalisation.

La méthodologie de Georgescu-Roegen est également abordée par des auteurs plus directement intéressés par la question des modèles économiques, y compris dans une perspective critique (Mirowski, 1992; Maneschi et Zamagni, 1997). Mais là encore, l’analyse n’est pas poussée très loin. Mirowski fournit néanmoins des éléments intéressants pour mieux appréhender la perspective de Georgescu-Roegen. Contrairement à Beard et Lozada, il note que Georgescu-Roegen « n’a pas suggéré de se passer des modèles mathématiques tout court » (1992, 96).

La seule contribution à prendre réellement pour objet la position de Georgescu-Roegen par rapport aux modèles mathématiques est celle de Khan (2014). Cependant, Khan adopte un cadre d'analyse très particulier, fondé sur l'approche développée par Wollheim en histoire de l'art, et qui éloigne considérablement de préoccupations plus traditionnelles en méthodologie économique. À l'inverse, la perspective de Georgescu-Roegen est examinée ici au prisme de la littérature en histoire et philosophie de la modélisation économique présentée dans l'introduction générale, et en particulier des deux registres de la représentation et des manipulations. Par ailleurs, pour illustrer son propos, Khan se concentre sur la controverse autour des modèles avec un continuum d'agents de Aumann (1964) et Brown et Robinson (1972), soutenus par Koopmans. Cette controverse donne effectivement à voir certains aspects intéressants de l'approche de Georgescu-Roegen. Mais il s'agit clairement d'un sujet anecdotique et marginal dans ses travaux. La théorie flux-fonds de la production fournit une illustration beaucoup plus développée sa méthodologie, comme on le verra dans le chapitre 5.

Il apparaît donc nécessaire de réaliser un examen détaillé de la méthodologie de Georgescu-Roegen et de la place qu'elle accorde à la modélisation mathématique. *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) représente la source la plus importante pour cela, bien que d'autres contributions puissent fournir des informations supplémentaires (1966a, 1976b, 1979d). Pour autant, il ne s'agit pas de faire une exégèse intégrale de cet ouvrage, qui couvre de nombreux aspects de la philosophie des sciences et de l'économie. Seuls les aspects pertinents pour comprendre la méthodologie de Georgescu-Roegen et sa conception du rôle des modèles mathématiques sont pris en compte²¹⁹.

4.2.1 Arithmomorphisme et dialectique

La réaction de Samuelson mentionné plus haut montre qu'il est tout d'abord nécessaire de clarifier le sens de la distinction qu'opère Georgescu-Roegen entre les concepts « arithmomorphiques » et les concepts « dialectiques ». Pour commencer, Georgescu-Roegen caractérise les concepts qui sont discrètement distincts comme étant arithmomorphiques. Ce néologisme est fondé sur la racine grecque *arithmos* (« nombre »), car pour Georgescu-Roegen, « tout nombre réel particulier constitue l'exemple le plus élémentaire d'un concept discrètement distinct » (1971, 44). Selon lui, même si l'on parle du « continuum » des nombres réels, chaque nombre se distingue parfaitement des autres, non seulement au niveau des symboles, mais également au niveau conceptuel²²⁰. Cependant, il ne faut pas en conclure que l'idée d'arithmomorphisme s'applique uniquement à des domaines mathématiques ayant trait aux nombres. Georgescu-Roegen voit simplement dans les nombres l'illustration d'une propriété plus générale de distinction discrète, qui constitue selon lui l'essence de la logique, et donc des mathématiques dans leur en-

219. Ces aspects sont principalement discutés dans les chapitres 2, 3, 4 et 11 de *The Entropy Law and the Economic Process*.

220. L'argument de Georgescu-Roegen est fondé sur le fait qu'en mathématiques, le continuum des nombres réels peut être construit à partir de la distinction discrète entre 0 et 1 par étapes logiques successives. Voir Beard et Lozada (1999) pour une discussion plus complète de cet aspect.

semble²²¹. Par conséquent, dans un langage plus conventionnel, on peut interpréter la notion d'arithmomorphisme comme un synonyme de « logico-mathématique ».

Les concepts dialectiques, quant à eux, « sont entourés d'une pénombre à l'intérieur de laquelle ils se chevauchent avec leur opposé » (1971, 44). Par exemple, Georgescu-Roegen estime que la « vie » en sciences naturelles appartient à cette catégorie parce qu'« il y a des virus cristallins qui constituent une pénombre entre la matière vivante et la matière inerte ». En économie, il considère que le concept de « besoin » appartient à la même catégorie, car « tout besoin particulier [...] se transforme imperceptiblement en un autre ». Notons au passage que, dans la perspective de Georgescu-Roegen, la notion de concept dialectique s'applique tout autant aux phénomènes naturels qu'aux phénomènes sociaux²²². Par ailleurs, dans ce cadre, la notion de « continuum » prend un sens différent. Il ne s'agit pas d'un ensemble d'éléments distincts, tels que les nombres réels, mais d'une succession d'entités qui se recouvrent les unes les autres. Georgescu-Roegen considère notamment que la perception la plus élémentaire du temps relève de cette conception. Par ailleurs, selon lui, les lois de la logique ne s'appliquent pas aux concepts dialectiques, car ils ne respectent pas le principe de non-contradiction selon lequel « B ne peut être à la fois A et non-A » (1971, 46)²²³.

La première question que pose cette distinction est celle du langage. Comme le reconnaît Georgescu-Roegen, les mots sont aussi discrètement distincts que les chiffres. Plus généralement, « le fondement élémentaire de la distinction discrète est la distinction entre deux symboles écrits » (1971, 43). Ces symboles sont utilisés comme substituts aux concepts dialectiques et arithmomorphiques afin de communiquer. Toutefois, ce n'est que dans le cas des concepts arithmomorphiques que « la propriété de distinction discrète concerne non seulement les symboles mais aussi les concepts » (44). À l'inverse, lorsque les concepts dialectiques sont représentés par des mots, leur sens n'est pas complètement épuisé et un certain flou demeure²²⁴. Autrement dit, « la pensée est si fluide que même l'affirmation la plus faible, à savoir que nous pouvons inventer un mot pour chaque pensée, est absurde » (44). Il ne faut donc pas penser que la distinction discrète des symboles implique celle des concepts lorsqu'il s'agit de notions dialectiques.

Georgescu-Roegen (1971, 44) s'oppose ainsi à la tendance du « positivisme logique » à réduire toute activité scientifique à des propositions pouvant s'exprimer dans le vocabulaire de la logique. L'origine de cette tradition de philosophie des sciences est généralement

221. On pense notamment à la topologie ou à l'algèbre qui, au niveau le plus général, ne nécessitent pas de supposer l'existence des nombres réels.

222. Par la suite, je parle du « monde » en général lorsqu'une proposition s'applique à la fois aux phénomènes naturels et aux phénomènes sociaux. Lorsque ce n'est pas le cas, je précise auquel de ces deux groupes de phénomènes renvoie la proposition en question.

223. Georgescu-Roegen ajoute que, « même si la ligne suivie par le présent argument s'inspire de la logique de Hegel, elle ne suit pas Hegel à tous égards » (1971, 46f, 27). L'une des différences réside dans le fait que pour Georgescu-Roegen, même si un concept dialectique se confond avec son contraire, il s'en distingue aussi partiellement. Par exemple, il affirme que, « dans la plupart des cas, nous pouvons décider si une chose [...] représente un organisme vivant ou une matière inerte » (1971, 47).

224. Ce point est notamment souligné par Khan (2014, 68), qui estime que Georgescu-Roegen « a une compréhension sophistiquée du fait que le langage touche et rate en même temps, qu'il guide et induit en erreur ».

associée aux travaux du Cercle de Vienne, du début des années 1920 au début des années 1940 (Caldwell, 1980). Les points de vue des personnes ayant contribué aux réflexions du Cercle de Vienne sont très divers. Néanmoins, son orientation générale peut se résumer à l'idée de débarrasser la science de toute proposition métaphysique. Pour cela, le positivisme logique défend l'expression des théories dans le langage de la logique et des mathématiques, ainsi que la confrontation directe ou indirecte des propositions avec les faits. Cette perspective a été relativement influente en économie, où elle est entrée en résonance avec les transformations de la discipline après la Seconde Guerre mondiale. Mais, pour Georgescu-Roegen, le positivisme logique apparaît inadéquat dans la mesure où il tend à nier la complexité des perceptions humaines, et cherche à les réduire systématiquement à des concepts arithmomorphiques. Selon lui, il convient au contraire de reconnaître le caractère fondamentalement dialectique de toute tentative d'appréhender le monde, ce qui empêche d'en rendre compte uniquement à l'aide de propositions logiques.

Par ailleurs, si les concepts dialectiques n'ont pas la clarté et la précision des concepts arithmomorphiques, cette différence peut se révéler un avantage dans certains cas. En particulier, selon Georgescu-Roegen, les concepts dialectiques sont plus à même de rendre compte des phénomènes liés à un « changement qualitatif ». Dans sa perspective, le changement qualitatif est le produit d'une évolution qui conduit imperceptiblement à l'apparition d'entités radicalement nouvelles. En d'autres termes, le changement qualitatif n'est pas un mouvement le long d'états successifs discrètement distincts, mais un phénomène qui se produit dans la pénombre entourant la frontière des concepts dialectiques. Par conséquent, « le changement qualitatif échappe à la formalisation arithmomorphique » (1971, 63). Seuls les concepts dialectiques peuvent être utiles pour l'appréhender. On retrouve ainsi la dimension évolutionnaire de l'approche de Georgescu-Roegen (cf. chapitre 1^{er}). L'idée de changement qualitatif s'inspire en particulier de la manière dont les mutations produisent peu à peu des espèces radicalement différentes en biologie. Georgescu-Roegen étend cette perspective au processus économique, comme l'illustre l'idée qu'il existe « un spectre continu de formes qui se glissent les unes dans les autres au fur et à mesure que le processus économique évolue et finit par devenir aussi différent qu'un oiseau l'est d'un ver » (330). Cela l'amène notamment à une critique de la définition conventionnelle de la théorie économique associée à Lionel Robbins, selon laquelle la théorie économique consiste à étudier la façon dont des moyens rares donnés permettent d'atteindre des fins données. À l'inverse, pour Georgescu-Roegen, les aspects les plus importants du processus économique sont liés aux changements qualitatifs des moyens disponibles et des objectifs poursuivis.

Fondamentalement, cet édifice philosophique repose sur une conception inductiviste de la connaissance, due notamment à l'influence de Pearson. Georgescu-Roegen le reconnaîtra de manière très explicite par la suite :

From Karl Pearson's splendid *Grammar of Science* and from my listening to him for more than one year, I reached two philosophical tenets. [...] Second, given the human cosmological condition, I construed that for us nature consists of just what we can perceive. Beyond, there are only hypothesized abstractions about which a metaphysician may say anything with complete

certitude, since nothing is controllable. (Georgescu-Roegen, 1992, 129)

Dans cette perspective, la connaissance doit s'appuyer sur notre capacité à percevoir les choses par les sens et à organiser ces perceptions avec l'intellect. Georgescu-Roegen (1971, 75) critique ainsi la croyance selon laquelle « les phénomènes naturels peuvent être réduits à l'enregistrement de signaux ». Il soutient à l'inverse que l'esprit « est un instrument d'observation aussi indispensable que tout instrument physique ». Pour lui, les catégories mentales que nous construisons à partir de ces perceptions sensorielles coupent artificiellement le monde en morceaux, mais elles doivent être reconnues comme fondamentalement dialectiques. Par conséquent, le « raisonnement dialectique », comme l'appelle Georgescu-Roegen, doit être le point de départ de toute exploration scientifique du monde.

Pour résumer, la distinction entre concepts arithmomorphiques et dialectiques apparaît comme étant de nature *ontologique*. C'est-à-dire qu'elle renvoie à la nature la plus fondamentale du monde qui nous entoure. D'une part, la distinction discrète est présentée comme une propriété élémentaire de la logique et des mathématiques. D'autre part, le recouvrement entre les entités apparaît comme une caractéristique du monde *réel*. Cette distinction ontologique implique aussi une distinction *épistémologique*, c'est-à-dire ayant trait à la nature de la connaissance que nous pouvons avoir dans les deux cas. Notre connaissance de la logique et des mathématiques peut être absolue et définitive, car les concepts arithmomorphiques sont sans équivoque et permettent d'effectuer des preuves rigoureuses. Mais notre connaissance du monde est nécessairement imparfaite et temporaire, du fait de la pénombre qui entoure les concepts dialectiques et du changement qualitatif qui en émerge.

4.2.2 Fonctions des modèles

Dans le cadre ontologique qui précède, un modèle est la transposition d'un raisonnement dialectique sous une forme arithmomorphique. Pour Georgescu-Roegen, les fonctions que peut remplir une telle transposition ne sont cependant pas les mêmes selon le type de phénomènes auquel on s'intéresse. Il insiste notamment sur les conditions très différentes d'utilisation des modèles en physique et en économie. En économie, il considère que les concepts arithmomorphiques ne peuvent qu'aider à construire un « simili analytique » du raisonnement dialectique, c'est-à-dire un modèle qui en mime le déroulement, afin d'en vérifier la cohérence logique²²⁵. La notion de « simili » reflète l'idée que la transposition du raisonnement dialectique dans un modèle mathématique ne peut être qu'imparfaite et ne supprime donc pas la distinction entre concepts arithmomorphiques et dialectiques²²⁶. Plus précisément, Georgescu-Roegen suggère qu'un simili analytique peut remplir deux fonctions : « mettre en lumière d'importantes erreurs dans les œuvres d'économistes littéraires qui ont raisonné dialectiquement » ; « illustrer certains points d'un argument dialectique afin de les rendre plus compréhensibles » (1971, 337). Autre-

225. Le terme « analytique » est utilisé par Georgescu-Roegen comme synonyme d'« arithmomorphique ».

226. Ce point est examiné plus en détail dans la sous-section 4.2.3.

ment dit, les modèles mathématiques permettent de penser de façon plus claire et plus rigoureuse. Sous cette forme, l'argument est relativement banal et peu controversé en économie mathématique²²⁷. Par ailleurs, il est clair que Georgescu-Roegen suit effectivement cette voie dans ses travaux en économie mathématique. Outre ses travaux sur la théorie du choix, on peut mentionner ici son article sur la théorie marxiste de l'effondrement du capitalisme (1960b). Partant du modèle de Bauer-Sweezy, censé formaliser rigoureusement l'intuition de Marx, Georgescu-Roegen souligne un problème dimensionnel qui sape la légitimité du modèle. Il propose alors une reformulation du modèle, plus cohérente selon lui avec la théorie marxiste du capitalisme. Dans ce cadre, il démontre qu'il n'y a aucune nécessité à ce que l'économie s'effondre à long terme. Le modèle sert donc ici à remettre en question la validité logique de l'intuition de Marx.

Cependant, cette conception relativement consensuelle du rôle des modèles mathématiques doit être comprise à la lumière d'une position plus originale en ce qui concerne les méthodes empiriques. En effet, Georgescu-Roegen conteste le fait qu'un modèle économique permette de tester empiriquement une théorie. Selon lui, en physique, ce type de test empirique est rendu possible par des instruments de mesure permettant de déterminer la précision du modèle. Mais il estime qu'en sciences sociales, « il n'existe pas de norme objective de précision » (1971, 333). Sa critique vise en particulier l'économétrie. Rappelons que Georgescu-Roegen a d'abord été formé comme statisticien, et qu'il a eu une expérience pratique des données économiques dans le cadre de ses fonctions de directeur adjoint de l'Institut central de statistique en Roumanie. Cependant, il a peu contribué au programme économétrique après s'être tourné vers l'économie, illustrant son scepticisme à ce sujet²²⁸. Il considère en effet que le degré d'ajustement entre un modèle estimé économétriquement et les données empiriques ne peut être considéré comme une norme scientifique satisfaisante. Il illustre son point de vue avec la métaphore suivante : « on peut toujours prouver qu'à l'intérieur d'une bûche il y a une belle Madone » (340). Autrement dit, un bon ajustement avec les données peut tout à fait être le produit d'un artifice numérique sans aucune portée scientifique.

En ce sens, il est clair que Georgescu-Roegen aurait eu un profond désaccord méthodologique avec les travaux d'Ayres et Kümmel. En particulier, l'affirmation d'Ayres et Warr (2009, 142) selon laquelle, « après quelques réticences, Georgescu-Roegen aurait été d'accord avec [leur] approche » apparaît très contestable. Elle traduit une certaine ignorance des positions méthodologiques de Georgescu-Roegen, qui illustre le manque d'attention portée à la question des modèles en économie écologique. Par ailleurs, l'analyse des travaux d'Ayres et Kümmel proposée dans cette thèse tend à donner raison à Georgescu-Roegen. Il est fortement possible que leurs résultats empiriques soient le fruit d'un artifice numérique plutôt que la conséquence d'une relation technique réellement existante (cf. chapitre 3).

227. Par exemple, la plupart des économistes qui répondent à l'attaque de Novick évoquent cet argument (Samuelson *et al.*, 1954). À titre d'illustration, Klein (360) affirme que « la clarté de pensée caractérise l'économie mathématique ».

228. Georgescu-Roegen a néanmoins exposé son point de vue sur l'économétrie à plusieurs reprises (1952, 1976b [1966]). Dans ces différentes contributions, il développe une critique similaire à celle qui suit.

La position de Georgescu-Roegen à l'égard d'autres méthodes empiriques que l'économétrie est moins claire. On peut notamment se demander ce qu'il en est des méthodes développées par Leontief dans son cadre input-output, et qui sont précisément construites en opposition à la méthode économétrique (Akhabbar, 2019). De manière plus générale, la critique de Georgescu-Roegen vise principalement la fonction de test empirique associée aux modèles, mais elle ne dit rien de la fonction d'instrument de mesure (Morgan et Morrison, 1999b). Toutefois, le fait qu'il ne mentionne pas de telles applications empiriques parmi les objectifs de la modélisation suggère qu'il ne les considère pas comme étant pertinentes.

À nouveau, ces éléments soulignent l'opposition de Georgescu-Roegen à la philosophie des sciences héritée du positivisme logique. Outre l'accent mis sur la formalisation, le positivisme logique suppose également qu'il est possible de tester empiriquement les énoncés scientifiques. C'est la raison pour laquelle, on parle également parfois d'« empirisme logique » (Caldwell, 1980). Cette procédure de test empirique des théories est d'abord envisagée en termes de *vérification*, c'est-à-dire la possibilité de dire si une théorie est vraie. Cependant, suite à la critique de Karl Popper, les tests empiriques sont plutôt appréhendés en termes de *falsification*, c'est-à-dire la possibilité de dire si une théorie est fautive. Dans cette dernière approche, la validation d'une théorie est donc toujours provisoire, dans l'attente de découvrir un résultat négatif. Cette conception poppérienne de la science est notamment influente en économie, où elle s'incarne par exemple dans la méthodologie de Friedman (1953)²²⁹. C'est la raison pour laquelle, il est important de souligner que les critiques de Georgescu-Roegen à l'égard des tests empiriques le situent en opposition à la perspective de Popper et de Friedman. Pour Georgescu-Roegen, il n'existe pas en économie de critères pour dire si une théorie est empiriquement validée ou non. Par conséquent, il invite à abandonner l'ambition de faire de la discipline une science empirique.

L'une des conséquences de la perspective qui précède est que, selon Georgescu-Roegen, les modèles économiques doivent être utilisés avec prudence en matière de politique économique. En effet, dès lors qu'ils ne peuvent être rigoureusement validés et calibrés à partir de données empiriques, la portée prédictive des modèles est limitée. Contrairement à la situation qui prévaut en physique, les modèles économiques ne peuvent donc pas servir de « guides automatiques pour l'action » (1971, 333). Cela ne signifie pas pour autant qu'ils ne fournissent pas quelques clefs de lecture utiles pour comprendre les phénomènes économiques auxquels peuvent être confrontés les décideurs politiques. Mais ces analyses doivent être utilisées avec « délicatesse et sensibilité » dans la mise en œuvre de mesures visant à répondre à des problèmes économiques concrets. En d'autres termes, Georgescu-Roegen considère que les modèles économiques permettent uniquement de fournir des prédictions d'ordre *qualitatif*, c'est-à-dire des analyses relativement générales et imprécises des conséquences d'une politique économique donnée.

Cette position est bien illustrée par la contribution de Georgescu-Roegen (1976c) au débat sur les problèmes d'inflation en Amérique Latine, l'une de ses rares incursions dans

229. J'entends par là l'interprétation traditionnelle de la position de Friedman, en termes d'instrumentalisme. Comme l'a montré Mäki (2009b), il est possible d'adopter d'autres interprétations.

le domaine de la politique macroéconomique. Son analyse débute par une critique de la théorie de l'inflation développée par Friedman, qui repose selon lui sur une conception walrasienne de l'économie. Or, dans la lignée de sa critique du modèle Arrow-Debreu (cf. sous-section 4.1.1), Georgescu-Roegen considère que les hypothèses du modèle walrasien sont incompatibles avec la réalité des économies latino-américaines. Il propose alors un cadre semi-formalisé, s'appuyant notamment sur des représentations graphiques, pour articuler les questions monétaires à celles de la répartition entre les classes sociales et de la structure des secteurs de production. Sa démarche aboutit à une recommandation de politique économique visant à restreindre l'importance du secteur de production des biens de luxe pour permettre l'expansion de celui des biens plus standards, et en parallèle à favoriser l'augmentation des salaires aux dépens des classes les plus favorisées²³⁰. Les mesures économiques proposées découlent donc d'une compréhension générale et semi-formalisée des mécanismes à l'œuvre derrière le phénomène d'inflation, plutôt que d'une analyse empirique fondée sur un modèle ayant prétention à saisir le problème de manière à la fois complète et précise.

Ces éléments permettent donc de mieux cerner les *fonctions* que Georgescu-Roegen attribue aux modèles. Néanmoins, ils ne disent pas comment les modèles doivent être *construits* pour remplir ces fonctions. Avant d'en venir à cette question dans la section suivante, il est utile de synthétiser les principaux traits de la méthodologie de Georgescu-Roegen mis en évidence ci-dessus. Tout d'abord, cette méthodologie repose sur les fondements ontologiques étudiés dans la sous-section 4.2.1, et en particulier sur la distinction entre concepts dialectiques et arithmomorphiques. Georgescu-Roegen considère que notre compréhension de la réalité économique doit s'appuyer sur nos perceptions les plus élémentaires et que celles-ci sont fondamentalement dialectiques. Il reconnaît néanmoins qu'un simili analytique de raisonnement dialectique peut être utile pour vérifier la cohérence logique du raisonnement en question et en faciliter la compréhension. Dans un vocabulaire plus traditionnel, on peut en quelque sorte dire que Georgescu-Roegen insiste sur la différence entre la théorie, au sens d'un ensemble de concepts descriptifs de la réalité, et le modèle, comme ensemble de concepts et symboles mathématiques. Cela peut paraître banal. Mais comme on l'a vu, la théorie néoclassique tend au contraire à opérer une fusion de la théorie et du modèle, aux dépens de la première (cf. chapitre 2). En ce sens, l'insistance de Georgescu-Roegen sur le fait que la théorie doit être élaborée de manière autonome et en amont du modèle n'est pas si trivial.

La méthodologie de Georgescu-Roegen est également concernée par ce qui a été défini dans l'introduction générale comme relevant du registre des *manipulations* du modèle. Plus précisément, dans le cadre des fonctions épistémiques des modèles identifiées par Morgan et Morrison (1999b), l'approche de Georgescu-Roegen correspond à la fonction d'exploration théorique des modèles. Il considère les modèles comme des outils qui aident à réfléchir de manière plus rigoureuse à un problème bien délimité. À l'inverse, il prend ses distances avec les fonctions empiriques des modèles. Il rejette en particulier l'idée que l'économétrie puisse fournir des tests empiriques des théories. Enfin, en ce qui concerne

230. Pour une mise en contexte et une analyse plus approfondie de la contribution de Georgescu-Roegen au débat sur l'inflation en Amérique Latine, voir de Carvalho et Suprinyak (2019).

l'idée que les modèles peuvent servir d'instrument pour concevoir et mettre en œuvre des politiques économiques, Georgescu-Roegen considère que les modèles ne peuvent fournir un plan d'action précis. Selon lui, les modèles apportent uniquement une compréhension générale des mécanismes à l'œuvre. Par conséquent, ils doivent être utilisés avec prudence dans la construction de mesures qui visent à répondre à un problème donné.

4.2.3 Principes de construction des modèles

La sous-section précédente a permis de mieux cerner les fonctions attribuées aux modèles dans la méthodologie de Georgescu-Roegen. Il est maintenant nécessaire d'examiner la critique de l'économie mathématique à laquelle donne lieu cette approche, et les principes qu'elle propose pour y répondre. La principale critique que Georgescu-Roegen adresse à l'économie mathématique est résumée par l'idée qu'un « modèle arithmomorphe n'a de valeur que s'il existe un raisonnement dialectique à tester » (1971, 341). En d'autres termes, sa critique ne vise pas les modèles en général. Elle vise plus spécifiquement les modèles qui ne reposent pas sur un examen conceptuel, préalable et attentif, du problème considéré. Dans un vocabulaire plus standard, cette critique suggère que certains « travaux passent pour les contributions économiques les plus valorisées, alors qu'il ne s'agit que de simples exercices mathématiques, non seulement sans substance économique, mais également sans valeur mathématique » (1979d, 317). Comme mentionné plus haut, parmi les exemples spécifiques que Georgescu-Roegen utilise pour illustrer sa critique, on trouve des modèles du marché avec un continuum d'agents tels que ceux de Aumann (1964) et Brown et Robinson (1972). En d'autres occasions, il se montre également critique du chemin pris par la théorie du choix, et notamment de l'utilisation qui est faite du concept d'utilité (1976b, 256). Cependant, l'illustration la plus présente dans ses travaux des années 1970 est certainement la critique de la théorie de la production, et en particulier de la fonction de production néoclassique. Cette question est abordée plus en détail dans le chapitre 5.

Étant donné la nature relativement banale de cette critique, on peut se demander pourquoi Georgescu-Roegen adopte une approche philosophique aussi élaborée de la question. Deux hypothèses peuvent être suggérées ici. Il y a tout d'abord son intérêt personnel pour la philosophie des sciences, conséquence de son parcours intellectuel des mathématiques à l'économie, et surtout de sa rencontre avec des personnalités telles que Pearson. *A posteriori*, il décrit lui-même cette caractéristique comme une « addiction épistémologique » (1992, 158). En ce sens, l'approche philosophique du sujet est simplement sa façon d'aborder les questions soulevées par l'économie mathématique. Une deuxième explication, plus spéculative, est que les formulations antérieures de cette même critique sous une forme plus directe n'ont pas réussi à convaincre les économistes mathématiciens. C'est notamment le cas de la critique de Novick, déjà mentionnée plus haut. Par conséquent, il est possible que Georgescu-Roegen ait cru qu'il pourrait donner plus de poids à cette critique en lui donnant des fondements philosophiques plus profonds. Mais en définitive, les économistes mathématiciens ne se sont pas montrés plus réceptifs à la critique sous cette forme. Ils l'ont tout simplement ignorée.

Cependant, l'approche de Georgescu-Roegen ne se limite pas à cette seule dimension

critique. Il fournit également plusieurs principes de construction des modèles censés garantir leur pertinence et échapper à un dévoiement dans des préoccupations purement formelles. Je propose de résumer ces principes sous la forme de trois étapes, respectivement intitulées *idéalisisation*, *isolement* et *arithmétisation*. Pour commencer, le raisonnement dialectique est le point de départ nécessaire de toute démarche scientifique selon Georgescu-Roegen. Il est donc légitime de se demander comment il conçoit cette première étape. Sur ce point, sa position vis-à-vis de la critique que Wesley C. Mitchell adresse à la théorie néoclassique est instructive. Mitchell critique le haut niveau d'abstraction de la théorie néoclassique, qu'il illustre par l'idée que « des individus imaginaires arrivent sur des marchés imaginaires avec des demandes et des offres pré-établies » (Mitchell 1925, cité par Georgescu-Roegen, 1971, 319). Georgescu-Roegen considère que cette critique est inadéquate. Il estime au contraire que « l'abstraction est l'outil le plus précieux dans n'importe quelle science ». Plus loin, il suggère que la première tâche de l'économie devrait être de construire un « idéal-type » qui rendrait claires et compréhensibles les caractéristiques d'une réalité économique donnée. Il fait ainsi explicitement référence à l'approche de Max Weber, qui consiste à extraire de la réalité l'une de ses composantes élémentaires, quand bien même celle-ci ne s'y trouve jamais sous une forme pure²³¹.

Pour ces raisons, cette étape de la méthodologie de Georgescu-Roegen peut être qualifiée d'*idéalisisation*. Comme il le reconnaît, elle représente déjà une certaine forme de simplification par abstraction. Mais il insiste sur le fait qu'elle doit être réalisée en relation étroite avec la réalité économique. Par conséquent, on peut dire que l'approche de Georgescu-Roegen est *minimalement réaliste*, au sens de Mäki (2012). Dans cette perspective, on considère que nous avons une perception plus ou moins directe des entités et phénomènes qui constituent l'objet d'étude de l'économie. Cette caractéristique vaut à la fois pour les aspects physiques du processus économique, tels que « la terre, le travail et le capital », et pour ses aspects sociaux, tels que « les préférences, les anticipations, la cupidité et la peur » (Mäki, 2012, 8-9). Cependant, la démarche par laquelle nous produisons des connaissances économiques implique un certain degré d'abstraction, intégrée dans les concepts les plus élémentaires.

Selon la méthodologie de Georgescu-Roegen, une fois ces concepts idéalisés soigneusement élaborés, ils peuvent être utilisés pour fournir une compréhension dialectique d'un problème spécifique. Ce raisonnement dialectique peut ensuite être transposé en un simili analytique afin de vérifier sa cohérence logique et de faciliter sa compréhension. Cependant, pour remplir efficacement ces fonctions, Georgescu-Roegen (1971, 340) estime qu'il est nécessaire de construire des modèles « simples d'esprit » (« *simple-minded* »). Il critique, par exemple, les modèles macroéconomiques complexes, composés de centaines de variables et d'équations, du fait qu'ils dépassent « notre contrôle mental ». Or, en raison du manque d'instruments de mesure adéquats, tels que ceux disponibles en physique, Georgescu-Roegen estime que ce contrôle mental est le seul moyen d'assurer la perti-

231. Dans la littérature contemporaine en philosophie de l'économie, Weber est également identifié comme l'une des sources d'inspiration importantes en ce qui concerne la notion d'idéalisation. À titre d'exemple, Morgan et Knuutila (2012, 61-62) soulignent que Weber considérerait l'*Homo œconomicus* et le marché comme des idéaux-types valables.

nence du modèle. Par conséquent, il suggère que l'activité de modélisation nécessite de « sélectionner quelques éléments importants parmi la multitude de faits encombrants ». En d'autres termes, seul un ensemble restreint d'entités et de relations devrait être représenté dans un modèle. Il s'agit donc là d'une seconde forme de simplification, pour laquelle la notion d'*isolement* semble être la plus appropriée.

Le principe d'isolement suggère notamment que Georgescu-Roegen n'est pas un partisan du recours systématique à la simulation numérique de modèles économiques. Les méthodes de simulation sont utilisées dès les années 1960 en économie, suite au développement des premiers ordinateurs (Morgan, 2004). Cependant, c'est réellement dans les années 1990 qu'elles deviennent plus répandues dans la discipline (Fontana, 2006; Backhouse et Cherrier, 2017). Georgescu-Roegen exprime rarement son point de vue sur cette méthode²³². C'est principalement dans le cadre de ses relations avec le Club de Rome qu'il se montre très critique envers l'utilisation de simulations informatiques (Levallois, 2010). Il reproche au Club de Rome de faire de cet outil un argument d'autorité, sans en reconnaître les limites. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui l'amènent à quitter le Club de Rome alors qu'il y a été admis comme membre pendant un certain temps. Sans que cela soit réellement explicite, on peut penser que les simulations informatiques n'ont pas vraiment de place dans la méthodologie de Georgescu-Roegen. Le recours aux simulations numériques de modèles mathématiques est nécessaire lorsque qu'une solution analytique n'est pas disponible ou qu'une étude qualitative ne fournit pas suffisamment d'information. Cette situation fait écho à l'idée d'une perte de « contrôle mental » dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, et laisse penser qu'il n'y serait pas favorable²³³.

La troisième étape importante de la méthodologie de Georgescu-Roegen concerne la transposition effective du raisonnement dialectique en un simili analytique. Cette étape peut être qualifiée d'*arithmétisation*. À cet égard, Georgescu-Roegen considère notamment que le simili analytique « doit être formulé avec la plus grande rigueur » et qu'il « n'y a pas de place en "théorie pure" pour les concepts pseudo-arithmomorphiques tels que l'indice des prix, le coût de la vie, la production agrégée et autres » (1971, 338). Autrement dit, il faut que chaque concept au niveau arithmomorphique corresponde à un concept au niveau dialectique, et donc à une entité dont nous avons une perception plus ou moins directe. Il doit y avoir une forme de *cohérence structurelle* entre les deux niveaux, dialectique et arithmomorphique. À l'inverse, les exemples de concepts « pseudo-arithmomorphiques » mentionnés ci-dessus sont d'abord des constructions statistiques. Ils ne peuvent être reliés à aucune entité réellement existante dans le monde, et pour cette raison, ils n'ont pas leur place dans un modèle théorique.

Notons cependant que Georgescu-Roegen emploie ci-dessus la notion de « théorie pure ». L'une des manières d'interpréter cette notion est de penser qu'elle renvoie à des modèles qui ont uniquement une fonction d'exploration conceptuelle. Implicitement, il semble que Georgescu-Roegen serait plus indulgent avec des modèles ayant une visée

232. Georgescu-Roegen (1971, chap. 3) discute abondamment du rôle des ordinateurs, mais il se concentre sur la question de sa comparaison avec l'intelligence humaine, sans réellement mentionner la question des simulations.

233. En ce sens, on peut penser que la position de Georgescu-Roegen sur cette question est proche de celle exprimée par Stiglitz (1979) (cf. chapitre 2).

empirique, même si, comme on l'a vu plus haut, il accorde peu de place aux méthodes empiriques dans sa méthodologie. Ces remarques introduisent une idée intéressante : le registre des manipulations et celui de la représentation ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Plus précisément, selon les fonctions auxquelles l'on destine un modèle, on sera plus ou moins exigeant quant à ses fondements conceptuels. Si l'on conçoit un modèle de « théorie pure », alors l'exigence conceptuelle doit être maximale. Si l'on conçoit un modèle empirique, alors un certain relâchement conceptuel est nécessaire pour permettre une correspondance entre les variables du modèle et les données disponibles. Cette perspective suppose néanmoins de reconnaître *en amont* quels sont les objectifs poursuivis par le modèle que l'on souhaite construire.

Les contraintes liées à l'étape d'arithmétisation peuvent également être approfondies à travers la discussion que Georgescu-Roegen consacre à la distinction entre variables ordinales et cardinales. Une variable est dite ordinale si elle sert à ordonner différentes situations, c'est-à-dire si elle sert à dire que telle situation est supérieure à telle autre selon un critère donné. Une variable cardinale est une variable ordinale à laquelle il est possible d'appliquer des opérations d'addition et de soustraction d'une manière qui ait un sens par rapport au phénomène considéré. Georgescu-Roegen insiste sur le fait que la propriété de cardinalité requière des conditions très fortes. En particulier, elle suppose « l'abstraction de toute variation qualitative », c'est-à-dire que le phénomène considéré doit pouvoir être réduit à un ensemble d'éléments qualitativement identiques (1971, 97). C'est à cette seule condition que l'on peut affirmer qu'il existe bien une entité commune sous-jacente à la variable cardinale, qui puisse être effectivement ajoutée ou soustraite²³⁴. Georgescu-Roegen s'oppose notamment à une conception cardinale de l'utilité, car il considère qu'il n'existe pas de « réservoir où s'accumulent les utilités et les désutilités d'une personne [...] considérées comme une relation entre un objet externe et l'état d'esprit de l'individu » (98). Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, l'entité peut toujours faire l'objet d'une mesure ordinale, mais il n'est pas possible d'appliquer les opérations d'addition et de soustraction²³⁵. Cela restreint donc considérablement le type de manipulations dont la variable en question peut faire l'objet dans un modèle.

Les étapes d'idéalisation, d'isolement et d'arithmétisation qui précèdent constituent les principes directeurs de la méthodologie de Georgescu-Roegen. Toutefois, elles soulèvent certaines tensions, dont deux au moins peuvent être soulignées. Tout d'abord, il est légitime de se demander comment la cohérence structurelle entre les concepts dialectiques et arithmomorphiques s'articule avec la distinction initiale établie entre ces deux strates ontologiques²³⁶. Une réponse partielle à ce problème émerge de l'approche de

234. En physique, par exemple, le volume d'un composé donné, tel que de l'eau, constitue bien une variable cardinale. Au contraire, pour Georgescu-Roegen (1971, 146), l'entropie n'est qu'une variable « faiblement cardinale », c'est-à-dire que seule la différence entre deux états entropiques d'un système a un sens. L'addition de deux états entropiques pour un *même* système n'a pas de sens. Cela ne remet pas en question le fait que l'entropie d'un système constitué de deux sous-systèmes soit égale à la somme des entropies des deux sous-systèmes. En physique, cette dernière propriété est dite d'*extensivité*.

235. Pour illustrer le manque d'attention portée à ces questions, Georgescu-Roegen (1971, 99) mentionne notamment le cas « des économistes qui additionnent des utilités escomptées ».

236. Il est d'autant plus important de souligner cette difficulté que Georgescu-Roegen est loin d'être

Georgescu-Roegen. Elle repose sur l'idée qu'un concept arithmomorphique ne donne à voir qu'une facette du concept dialectique qu'il vise à représenter. Georgescu-Roegen considère ainsi que « le spectre dialectique des désirs humains [...] a depuis longtemps été couvert par le concept numérique et terne d'« utilité » » (1971, 52). Cela ne signifie pas que le concept d'utilité est selon lui inutile, comme en atteste son intérêt de longue date pour le sujet. Il met simplement en garde contre l'idée que le concept d'utilité puisse épuiser la complexité des désirs humains. Cela amène également Georgescu-Roegen à considérer que plusieurs concepts arithmomorphiques peuvent correspondre à un même concept dialectique, et plus précisément à différentes facettes de ce dernier. Il illustre cet aspect à travers les conceptions « laplacienne » et « fréquentiste » des probabilités, dont il estime qu'elles sont deux traductions analytiques possibles du même concept dialectique d'« aléatoire ». Dit autrement, ces deux conceptions des probabilités « sont les deux extrémités d'un même pont entre l'entendement humain et le monde réel » (59). Cette perspective permet en théorie d'articuler la distinction dialectique/arithmomorphique et l'idée de cohérence structurelle. Cependant, la question demeure de savoir comment choisir en pratique parmi différentes représentations analytiques possibles d'un même concept.

La deuxième tension perceptible dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, est celle entre réalisme et simplicité. En général, en économie, le recours à des entités abstraites, telles que des variables agrégées, est conçu comme une manière de simplifier la réalité pour obtenir un modèle plus facilement manipulable (cf. chapitres 2 et 3). Or, cette démarche est vivement critiquée par Georgescu-Roegen. Il considère par exemple que les différents biens d'équipement « ne sont pas tous qualitativement identiques et n'ont donc pas de mesure commune » (1971, 244), remettant ainsi en cause l'idée de capital agrégé. Il insiste au contraire sur le fait que chaque entité du modèle doit avoir un référent réel bien défini. Pour préserver la simplicité des modèles, il suggère plutôt d'écarter les éléments de la réalité qui paraissent les moins pertinents pour étudier le problème considéré. De ce fait, un modèle correspond toujours à un problème spécifique. Il n'a pas une validité universelle. Cela n'empêche pas d'établir certains grands principes théoriques *a priori*, qui vont structurer une *famille* de modèles partageant des traits communs. Mais dans chaque situation, il faut s'interroger sur les éléments particuliers qu'il est pertinent d'inclure dans un modèle visant à répondre à une question particulière. Cette interprétation de la position de Georgescu-Roegen offre une première idée de la manière dont il envisage l'articulation entre réalisme et simplicité. Elle ne répond cependant pas à la question de savoir, en pratique, quels critères permettent de dire que tel aspect de la réalité doit être représenté dans le modèle et tel autre peut être laissé de côté. Notons que les deux tensions identifiées ci-dessus soulignent des lieux potentiels de friction dans la mise en pratique de la méthodologie de Georgescu-Roegen, mais elles n'en remettent pas en question la pertinence *a priori*.

Dans l'ensemble, les étapes d'idéalisation, d'isolement, et d'arithmétisation fournissent des lignes directrices cohérentes pour la construction de modèles. Par ailleurs, au-delà de ces lignes directrices, la méthodologie de Georgescu-Roegen impose égale-

clair sur le sujet. Ainsi, en certaines occasions, il suggère au contraire que les concepts arithmomorphiques et dialectiques « sont séparés par un gouffre infranchissable » (1979d, 322).

ment des limites plus strictes à la modélisation. C'est-à-dire qu'elle précise les situations dans lesquelles la construction d'un modèle n'est pas souhaitable. Tout d'abord, Georgescu-Roegen considère que certains concepts dialectiques sont irrémédiablement incompatibles avec toute forme d'arithmétisation. En particulier, il utilise à de nombreuses reprises l'exemple du concept de « démocratie »²³⁷. Cependant, il ne fournit pas réellement d'exemple clair d'une telle dichotomie insurmontable en économie. Il affirme, par exemple, qu'en ce qui concerne « les anticipations et les préférences individuelles, il y a de bonnes raisons de penser que les nombres réels ne sont pas toujours suffisants pour cataloguer un ensemble de qualités » (1971, 76)²³⁸. Mais cela correspond plutôt à l'idée que les concepts arithmomorphiques ne peuvent représenter qu'une facette des concepts dialectiques, et non que toute correspondance est complètement inappropriée²³⁹. La portée de cette limite dans le domaine économique reste donc floue.

Les dernières limites mises en avant par Georgescu-Roegen tiennent aux domaines spatiaux et temporels de pertinence d'un modèle donné. À cet égard, Georgescu-Roegen est d'accord avec la critique que les écoles historique et institutionnaliste adressent à l'économie néoclassique. Ces courants soulignent en particulier que la volonté de construire une théorie économique abstraite et universelle tend à masquer la diversité des systèmes économiques réellement existants. Georgescu-Roegen (1971, 342) note ainsi que « si les comportements économiques étaient indépendants des facteurs culturels, il ne serait pas possible de rendre compte de l'immense variabilité des réalités économiques dans le temps et l'espace ». Il considère par exemple que la théorie de l'utilité « reflète un trait institutionnel propre [...] aux grandes communautés urbaines des sociétés industrialisées », où « seuls les biens et services dont un individu peut jouir personnellement influencent sa satisfaction » (324). À l'inverse, à partir notamment de son expérience en Roumanie, il considère que, « dans les communautés paysannes, le bonheur de l'individu dépend non seulement des quantités de biens et services à sa disposition mais aussi d'autres variables sociales ». Il souligne ainsi que les réalités économiques en différents endroits et à différents moments sont qualitativement différentes. Elles doivent donc être appréhendées par des cadres théoriques et analytiques différents.

Cette même perspective façonne la manière dont Georgescu-Roegen conçoit les changements qui affectent une économie donnée au fil du temps. Il met notamment l'accent sur la distinction entre les aspects « dynamiques » et les aspects « évolutionnaires ». Les aspects dynamiques correspondent aux changements quantitatifs qui se produisent

237. Georgescu-Roegen (1971, 49) présente le problème ainsi : « Should we strive for an arithmomorphic concept of "democracy," we would soon discover that no democratic country fits the concept: not Switzerland, because Swiss women have no voting right; not the United States, because it has no popular referendum; not the United Kingdom, because the Parliament cannot meet without the solemn approval of the King, and so on down the line. »

238. Georgescu-Roegen tire cet argument de ses contributions antérieures à la théorie du choix (1954; 1958a).

239. C'est la raison pour laquelle, l'affirmation de Beard et Lozada (1999, 22) mentionnée plus haut selon laquelle « les concepts de "marchandise", d'"anticipations" et de "monnaie" [...] ne présentent pas les frontières discrètes nécessaires pour les représenter adéquatement par des nombres réels » semble un peu trop forte. Il semble plutôt que Georgescu-Roegen considère que certains aspects de ces concepts peuvent être représentés mathématiquement, même si cela n'épuise pas leur signification.

dans une économie dont les caractéristiques qualitatives restent invariantes. Ces changements peuvent être représentés par un simili analytique, mais ce type de représentation n'est pertinent que sur une échelle de temps limitée. À long terme, « la nature évolutionnaire du processus économique [...] empêche de saisir tous ses aspects pertinents par un schème arithmomorphique » (1971, 330). En effet, comme on l'a vu plus haut, pour Georgescu-Roegen, l'évolution du processus économique est marquée par des changements qualitatifs. Or, selon lui, ces changements émergent de la pénombre entourant la frontière des concepts dialectiques. De ce fait, ils échappent à une mise en forme arithmomorphique. Georgescu-Roegen (1979d, 325) en conclut que « la partie la plus pertinente de l'histoire est une histoire racontée avec des mots ». Il invite ainsi à renouer avec les approches historique et institutionnaliste en économie. Mais que l'on a tendance à opposer ces approches aux méthodes formelles, dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, elles apparaissent plutôt comme étant complémentaires. Elles permettent de saisir des phénomènes qui échappent aux modèles. Cette position n'est certainement pas étrangère à l'atmosphère pluraliste de l'entre-deux-guerres, dans laquelle Georgescu-Roegen a été formé pour la première fois en économie (cf. sous-section 4.1.1). Elle est certainement due également à l'influence de Schumpeter, qui se situait lui-même au carrefour de ces différentes approches.

4.2.4 Georgescu-Roegen et l'image des mathématiques

Dans l'ensemble, les divers aspects de la méthodologie de Georgescu-Roegen présentés dans la sous-section précédente mettent l'accent sur ce qui a été défini dans l'introduction générale comme le registre de la *représentation*. C'est-à-dire qu'ils ont trait aux rapports entre le modèle et le système réel dont il vise à rendre compte. En ce sens, l'approche de Georgescu-Roegen fait écho sur de nombreux points à celle développée récemment par Mäki (2009c) sous l'acronyme MISS, pour « Modèles comme Idéalisations et Systèmes Subrogés ». Dans cette dernière, l'idéalisation renvoie précisément à l'idée que les entités fondamentales d'un modèle sont des idéaux-types qui combinent à la fois un ancrage dans la réalité et une forme d'abstraction, comme l'admet également Georgescu-Roegen. Selon Mäki, il revient alors au « commentaire » d'étayer les bases de la ressemblance entre le modèle et le système qu'il tente d'appréhender, afin qu'il puisse accéder au statut de « système subrogé ». Ce statut se distingue de celui de « système de substitution », pour lequel le modélisateur abandonne dès le départ la discussion relative aux ressemblances. Cette perspective fait écho, chez Georgescu-Roegen, au fait que le raisonnement dialectique constitue le point de départ de toute démarche scientifique, et que ce raisonnement doit être en prise avec notre perception sensorielle de la réalité. Le modèle, quant à lui, est un simili analytique qui doit être en cohérence structurelle avec le raisonnement dialectique. Sur la question de l'isolement, qui se situe entre ces deux étapes, l'approche de Mäki permet de compléter celle de Georgescu-Roegen. Selon cette approche, c'est le mécanisme causal visé par le modèle qui doit déterminer les aspects du monde à inclure de la manière la plus réaliste possible dans le modèle.

Si le registre de la représentation occupe une place centrale dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, celui des *manipulations* est au contraire peu développé. Cette

situation découle du fait qu'il a une conception restrictive des fonctions épistémiques que permettent de remplir les modèles, comme l'a montré la sous-section 4.2.2. Dans sa perspective, les modèles ont principalement une fonction d'exploration théorique, c'est-à-dire qu'ils aident à réfléchir de manière plus rigoureuse à une question donnée. À l'inverse, Georgescu-Roegen critique vivement les tests économétriques et ne propose pas réellement de méthodes alternatives permettant de confronter les modèles aux données empiriques. De ce fait, les modèles sont selon lui d'une utilité limitée dans la conception et la mise en œuvre de politiques économiques. Ils fournissent une compréhension générale des mécanismes en jeu, mais pas un plan d'action précis.

À partir de ces éléments, il est intéressant de mettre en perspective la méthodologie de Georgescu-Roegen à l'aide de la notion d'*image* des mathématiques, utilisée par Weintraub (2002) dans son analyse des transformations de l'économie au 20^e siècle. Une image correspond à une certaine conception de la rigueur dans l'usage des mathématiques. Comme on l'a vu plus haut, après la Seconde Guerre mondiale, l'image dominante en économie devient que l'axiomatisation est la norme de rigueur, conduisant à de plus en plus d'abstraction mathématique. C'est clairement à cette tendance que la critique de Georgescu-Roegen s'adresse en premier lieu. Sa conception d'un modèle économique rigoureux est liée aux fondements conceptuels sur lesquels s'appuie le modèle, et à la pertinence de ces fondements conceptuels par rapport à notre perception de la réalité économique. La pureté formelle du modèle est donc tout à fait secondaire. En raison de cette divergence avec la tendance dominante de l'économie mathématique, Georgescu-Roegen considère que de nombreuses contributions dans ce domaine sont de purs exercices mathématiques dénués de toute signification économique.

La perspective de Georgescu-Roegen trouve-t-elle un écho chez d'autres économistes mathématiciens ? Selon Weintraub (2002, 66), la principale image alternative de l'économie mathématique au 20^e siècle est que la rigueur « est associée au lien des catégories conceptuelles avec une réalité physique sous-jacente ». Cette image est notamment associée à deux mathématiciens, Vito Volterra et son élève Griffith C. Evans, qui se sont intéressés de près aux premiers développements de l'économie mathématique. Volterra et Evans insistent sur la nécessité d'utiliser des quantités observables et mesurables dans les modèles. Pour cette raison, Weintraub suggère de lier cette approche à celle de Lawrence Klein, et plus généralement à l'économétrie et à l'économie appliquée. De ce point de vue, il semble également pertinent d'inclure Leontief dans cette tradition, sans pour autant oublier sa critique virulente à l'égard des méthodes économétriques (Akhbar, 2019). Dans une certaine mesure, Georgescu-Roegen s'inscrit aussi dans cette perspective, en raison de l'attention qu'il porte aux questions conceptuelles. Il est également concerné par la question de la mesurabilité, au travers notamment de la distinction entre variables ordinales et cardinales.

L'intérêt commun de Volterra, d'Evans et de Georgescu-Roegen pour la question de l'intégrabilité illustre en partie ce lien. En effet, la question de l'intégrabilité est soulevée pour la première fois par Volterra à l'encontre de Pareto. Elle est ensuite reprise par Evans, qui « recentre son attaque sur la théorie de l'utilité par le problème de l'intégrabilité » (Weintraub, 2002, 63). Mais c'est bien Georgescu-Roegen (1936) qui fournira

l'analyse la plus complète de cette question. Dans ce cadre, Georgescu-Roegen (1936, 564f, 2) fait explicitement référence à l'un des ouvrages d'Evans, qu'il rencontre lors de son premier séjour aux États-Unis (1989, 124). Par ailleurs, dans ses écrits autobiographiques, Georgescu-Roegen souligne que c'est Volterra qui est à l'origine de la question de l'intégrabilité (1989, 124). Malgré ça, à ma connaissance, il n'existe pas de référence proprement méthodologiques à Volterra et Evans dans les travaux de Georgescu-Roegen. De plus, il convient de noter que la préoccupation de Georgescu-Roegen à l'égard de la mesurabilité est surtout une question théorique. C'est-à-dire qu'il s'interroge sur la possibilité de représenter une entité donnée par une variable cardinale. À l'inverse, il ne marque jamais le moindre intérêt pour aller plus loin et confronter les modèles à des données empiriques.

En ce sens, il n'est pas étonnant que les quelques références explicites de Georgescu-Roegen à la méthodologie d'autres économistes pointent dans une direction légèrement différente de la tradition Volterra-Evans. L'une de ces références renvoie notamment à la position de Knut Wicksell, selon laquelle un modèle mathématique est utile « pour faciliter l'argument, clarifier les résultats, et ainsi se prémunir contre d'éventuels erreurs de raisonnement, *c'est tout* » (Wicksell, 1954, cité par Georgescu-Roegen, 1971, 341, italique ajouté par Georgescu-Roegen)²⁴⁰. Cette citation coïncide en effet avec la seule fonction épistémique que Georgescu-Roegen attribue aux modèles, celle de raisonner plus clairement et rigoureusement sur un problème donné.

Par ailleurs, à la suite de cette citation, Georgescu-Roegen suggère que cette approche « remonte à Marshall, qui l'a d'ailleurs pratiqué en reléguant ses similis mathématiques à la fin de ses *Principes* » (341f, 89). Cette référence apparaît effectivement cohérente avec l'image des mathématiques que Weintraub (2002, 23) attribue à Marshall, selon laquelle les mathématiques servent « de chemin vers la vérité, pour construire des arguments indubitablement vrais ». Weintraub précise à cet égard que cette conception est « incompatible avec les mathématiques de la fin du 19^e siècle fondées sur un substrat physique, tout autant qu'avec [...] le passage du début du 20^e siècle à l'axiomatique » (24). La double critique par Georgescu-Roegen envers les purs exercices mathématiques et les tests économétriques semble donc trouver là une tradition méthodologique qui lui convient.

Pour finir, Georgescu-Roegen relie également sa position à celle de Keynes, selon laquelle l'objet de l'économie est de « fournir une méthode organisée et ordonnée pour réfléchir à des problèmes particuliers » (Keynes, 1936, cité par Georgescu-Roegen, 1971, 341f, 89). Cela invite également à étudier l'étendue des liens entre leurs conceptions respectives des mathématiques, et de leur rôle en économie. O'Donnell (1990) fournit à cet égard une synthèse utile de la position de Keynes, exprimée dans ses travaux économiques, mais également dans ses contributions antérieures à la théorie des probabilités, et dans

240. Wicksell était lui-même initialement formé en mathématique et proche de nombreux mathématiciens (Gaddy, 1993). À ma connaissance, il n'existe pas d'examen détaillé de sa conception du rôle des mathématiques en économie. Néanmoins, l'hommage publié dans *Econometrica* par Akerman (1933) donne effectivement à voir une position proche de celle de Georgescu-Roegen. À ceci près que cet hommage laisse penser que Wicksell était favorable à l'application des méthodes statistiques en économie, là où Georgescu-Roegen se montre plus critique de l'économétrie.

ses correspondances. La critique de Keynes envers l'utilisation des mathématiques en économie concerne d'abord les excès du formalisme, qui amènent à perdre de vue toute signification économique. En opposition à cette tendance, il assigne un « rôle limité et subordonné » aux mathématiques (O'Donnell, 1990, 41). Ce rôle est de « découvrir des erreurs de raisonnement » (42) et de servir de « support symbolique à la réflexion » (44). Il en ressort donc clairement une convergence avec la position exprimée par Georgescu-Roegen.

4.3 Conclusion

Dans son avant-propos au livre en honneur de Georgescu-Roegen, Samuelson (1999) laisse entendre que la méthodologie de Georgescu-Roegen est en un sens profondément originale, mais que ses implications pratiques ne sont pas claires. Ce chapitre montre qu'une fois passé au-delà des apparences il n'en est rien, ni pour l'originalité, ni pour les implications pratiques. La position méthodologique de Georgescu-Roegen n'est pas réellement originale, dans la mesure où elle coïncide largement avec celle exprimée par des auteurs tels que Keynes, Marshall ou Wicksell. Cette position consiste à considérer les modèles comme un moyen de clarifier un raisonnement et d'en valider la cohérence logique. De même, la critique que formule Georgescu-Roegen à l'encontre de l'économie mathématique n'est pas plus originale. Cette critique vise le manque de signification économique d'un nombre croissant de modèles mathématiques utilisés en économie.

L'intérêt de la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen réside donc plutôt dans le fait qu'il donne une assise philosophique à cette position méthodologique, et qu'il propose un certain nombre de principes permettant de la mettre en œuvre en pratique. L'assise philosophique est fournie par la distinction entre concepts dialectiques et concepts arithmomorphiques. Cette distinction a suscité beaucoup d'incompréhension, y compris dans le commentaire de Samuelson mentionné ci-dessus. Le moyen le plus direct de saisir la portée de cette distinction est de la concevoir comme étant de nature ontologique. D'un côté, le monde de la logique et des mathématiques se caractérise par l'existence d'une distinction discrète entre les éléments. De l'autre, le monde réel se caractérise par l'absence d'une telle propriété de distinction discrète et par un recouvrement permanent entre les entités. Par conséquent, les concepts arithmomorphiques peuvent prétendre à une certaine exactitude, tandis que les concepts dialectiques ne sont qu'un moyen imparfait pour découper artificiellement le monde réel en entités distinctes. Les concepts dialectiques n'en sont pas moins le préalable nécessaire à toute démarche scientifique qui cherche à rendre compte de certains phénomènes réels, qu'ils soient naturels ou sociaux.

Dans cette perspective, les modèles n'interviennent que dans un second temps, comme transpositions de raisonnements dialectiques sous une forme arithmomorphique. Jusque-là, la position de Georgescu-Roegen s'apparente à une philosophie générale des sciences. C'est quand on en vient à la question des modèles qu'il distingue réellement les sciences naturelles des sciences sociales, et en particulier la physique de l'économie. Selon Georgescu-Roegen, alors que la physique dispose d'instruments permettant d'évaluer précisément la validité d'un modèle, l'économie en est dépourvue. En particulier, il consi-

dère que l'économétrie ne permet pas de tester empiriquement les théories économiques. Plus généralement, il montre peu d'intérêt pour les méthodes empiriques en économie. Pour Georgescu-Roegen, la principale, voire la seule, fonction des modèles est de clarifier un raisonnement préexistant et d'en valider la cohérence logique. Par conséquent, dans sa méthodologie, le registre des manipulations se concentre autour de la fonction d'exploration conceptuelle des modèles.

Ce point est très important pour comprendre les principes de construction des modèles proposés par Georgescu-Roegen. En effet, Georgescu-Roegen laisse percevoir une forme d'interdépendance entre le registre des manipulations et le registre de la représentation. Dit autrement, selon les fonctions auxquelles l'on destine un modèle, on sera plus ou moins exigeant quant à ses fondements conceptuels. Georgescu-Roegen ne s'intéresse pas réellement aux modèles empiriques, mais on peut penser qu'il serait plus indulgent à leur égard. Les principes de construction des modèles qu'il formule portent donc principalement sur les modèles théoriques « purs », c'est-à-dire ceux qui n'ont qu'une fonction d'exploration conceptuelle. Les principes en question peuvent être résumés sous la forme de trois étapes successives, qualifiées ici d'idéalisation, d'isolement, et d'arithmétisation. Ensemble, ces principes fournissent une ligne directrice pour cheminer progressivement de l'élaboration de fondements conceptuels au plus proche du monde réel, vers des modèles simples destinés à répondre à des problèmes particuliers. Au cœur de cette démarche, on trouve ainsi une tension entre réalisme et simplicité, dont il convient d'étudier la portée en pratique. Le chapitre 5 sera l'occasion de mener à bien une telle analyse dans le cas de la théorie flux-fonds de la production. C'est entre autres pour cette raison qu'il était nécessaire d'explorer en détail la méthodologie de Georgescu-Roegen, bien que ce sujet ait un intérêt en lui-même, comme l'a montré ce chapitre.

Avant d'en venir à la théorie flux-fonds, notons pour finir que la méthodologie de Georgescu-Roegen s'est construite principalement en opposition à l'approche axiomatique qui dominait la discipline économique après la Seconde Guerre mondiale. Cependant, la méthodologie de Georgescu-Roegen ne serait pas non plus complètement en phase avec la réorientation opérée par la discipline à partir des années 1970. Depuis cette époque, l'approche axiomatique associée aux modèles les plus abstraits a commencé à perdre du terrain, alors que l'économie appliquée s'est progressivement imposée comme la nouvelle tendance dominante (Backhouse et Cherrier, 2017). Cette nouvelle orientation a été portée par de nouvelles méthodes empiriques et la disponibilité accrue de données empiriques. La recherche théorique formelle n'a pas disparu, mais elle s'est diversifiée et la nécessité de l'appliquer à des questions spécifiques a conduit à abandonner les préoccupations axiomatiques. Ce revirement vers des modèles appliqués à des problématiques plus concrètes fait en partie écho à la méthodologie de Georgescu-Roegen. Mais sa critique des méthodes économétriques, et plus généralement son faible intérêt pour les applications empiriques, laissent penser qu'il n'aurait pas été entièrement satisfait par cette situation. Sa perspective particulièrement exigeante quant aux fondements conceptuels, ainsi que sa réhabilitation des approches institutionnalistes et historiques, le caractériseraient certainement toujours comme un économiste « dissident » à l'« âge de l'économiste appliqué ».

Chapitre 5

La théorie flux-fonds de la production

Georgescu's fund-flow model of the production process is superior to the neoclassical production function. It emphasizes that physically what we call "production" is really transformation—of resources into useful products and waste products.

—Herman E. Daly (1997a)

LA théorie flux-fonds de la production est le cadre conceptuel et analytique proposé par Georgescu-Roegen comme une alternative à d'autres théories de la production, telles que les fonctions de production néoclassiques ou les tableaux input-output de Leontief. La théorie flux-fonds repose sur une base conceptuelle spécifique, dans laquelle la distinction entre flux et fonds occupe une place centrale. Elle débouche sur plusieurs modèles correspondant à des problèmes différents, tels que l'organisation interne d'un processus de production unique, l'interaction entre plusieurs processus, ou encore les variations dynamiques des niveaux de production. Le point de vue de Daly ci-dessus est emblématique de la manière dont la théorie flux-fonds est perçue par les auteurs qui s'intéressent aux travaux de Georgescu-Roegen. Cette théorie apparaît comme la traduction analytique de sa conception thermodynamique de l'économie. On retrouve par exemple cette idée chez Gowdy et Mesner (1998, 149), pour qui « l'intégration par Georgescu-Roegen de l'économie, des institutions et de la réalité biophysique a abouti à son modèle du processus de production »²⁴¹. Ce chapitre examine la portée de telles affirmations en tentant de saisir les caractéristiques fondamentales de la théorie flux-fonds.

Cette démarche permet de comprendre comment l'approche flux-fonds se situe par rapport aux questions soulevées dans les chapitres précédents. L'affirmation par Daly de la supériorité du modèle flux-fonds est formulée dans le cadre de la controverse qui l'oppose à Solow et Stiglitz (cf. chapitre 2). Cette controverse met en évidence la difficulté à articuler les dimensions physique et économique de la production dans une fonction de production agrégée. Par ailleurs, des problèmes similaires transparaissent dans la théorie néo-thermodynamique de la production d'Ayres et Kümmel (cf. chapitre 3). Ces derniers tentent d'intégrer la conception thermodynamique de l'économie dans le cadre de la fonction de production agrégée. Mais leur approche peine à répondre aux critiques relatives aux fondements théorique de la fonction de production agrégée. Ayres et Kümmel reportent en définitive la pertinence de leur modèle sur les estimations empiriques que permet de réaliser la fonction de production agrégée. Cependant, les résultats empiriques en question sont possiblement le produit d'un artifice numérique plutôt que l'expression d'une relation technique réellement existante. En définitive, le formalisme des fonctions de production agrégées ne permet pas d'appréhender la dimension physique de la production.

Daly laisse entendre que l'approche de Georgescu-Roegen permettrait de répondre à certaines de ces difficultés. Mais pour évaluer la portée d'une telle affirmation, il est nécessaire de comprendre au préalable les différences qui distinguent cette perspective des

241. Des remarques similaires sont également formulées par Maneschi et Zamagni (1997, 701) ou Missemmer (2017b, 497).

précédentes, notamment sur le plan méthodologique. C'est la raison pour laquelle il était important de revenir dans le chapitre précédent sur les fondements méthodologiques de l'approche de Georgescu-Roegen, et notamment sa conception des modèles économiques. Cet aspect de son travail a reçu peu d'attention, en économie mathématique comme en économie écologique. Cela peut notamment expliquer le fait qu'Ayres et Warr (2009, 142) suggèrent au contraire qu'après « quelques réticences, Georgescu-Roegen aurait été d'accord avec [leur] approche ». Il importe au contraire de clarifier l'ampleur des divergences entre leur approche et celle de Georgescu-Roegen. Des éléments à ce sujet seront développés directement dans ce chapitre, et la conclusion générale reprendra cette question de manière plus systématique.

La priorité est donc ici de mieux cerner les caractéristiques de la théorie flux-fonds. Il convient d'en distinguer dès maintenant deux aspects. D'une part, la théorie flux-fonds propose une représentation originale d'un processus de production unique. Cette représentation prend explicitement en compte la combinaison des différentes activités au cours du temps. Elle a notamment connu certains développements en économie industrielle (Morroni, 1992; Scazzieri, 1993)²⁴². Cette composante de la théorie flux-fonds est cependant celle qui présente le moins d'intérêt dans le cadre de cette thèse, car elle ne dit rien de la relation globale d'interdépendance entre le processus économique et les flux physiques. Après avoir brièvement évoqué cette première facette de la théorie flux-fonds, je me concentre donc ici sur la représentation de plusieurs processus en interaction les uns avec les autres. Lorsqu'on l'on s'intéresse à cet aspect de la théorie flux-fonds, il apparaît clairement qu'elle partage certaines caractéristiques avec la « conception circulaire de la production » présente, entre autres, dans les modèles de Leontief, Sraffa, et von Neumann²⁴³. Pour cette raison, il est utile de donner un bref aperçu de cette conception de la production dans la section 5.1, pour pouvoir ensuite situer la perspective de Georgescu-Roegen.

Pour saisir les fondements et les implications de la théorie flux-fonds, je m'appuie sur les deux angles d'analyse adoptés dans cette thèse. D'une part, les enjeux liés à la modélisation sont abordés en distinguant le registre de la représentation dans la construction des modèles et celui des manipulations dans leur utilisation. L'interprétation de la méthodologie de Georgescu-Roegen issue du chapitre 4 est particulièrement utile de ce point de vue. D'autre part, l'articulation entre les dimensions physique et économique de la production est analysée au prisme de l'interdisciplinarité. Il est notamment important de confronter la théorie flux-fonds avec les caractéristiques de la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). En suivant cette approche, je montre que la théorie flux-fonds est très cohérente avec la conception thermodynamique de l'économie. En particulier, elle permet d'articuler les dimensions physique et économique de la production sans les confondre l'une avec l'autre. En ce sens, le cadre flux-fonds dispose d'une plus grande transparence conceptuelle que les approches agrégées. Cet aspect découle directe-

242. Pour une revue de la littérature sur ce sujet, voir Vittucci Marzetti (2013).

243. Il est important de préciser dès maintenant que je distingue la conception circulaire de la *production* de la conception circulaire de l'*économie* évoquée dans le chapitre 1. Cette dernière renvoyait à une vision globale de l'économie comme un circuit monétaire entre production et consommation. La conception circulaire de la production concerne les relations d'interdépendances au sein de la production.

ment de ses fondements méthodologiques, dans lesquels l'accent est mis sur le registre de la représentation. À l'inverse, la principale faiblesse de la théorie flux-fonds se situe dans le domaine des manipulations. Georgescu-Roegen fournit en effet très peu d'applications réellement développées de son cadre analytique.

Cette analyse est présentée en distinguant deux phases de développement de la théorie flux-fonds. La section 5.2 s'intéresse à la première phase, allant du milieu des années 1960 au milieu des années 1970, durant laquelle Georgescu-Roegen cherche principalement à répondre à des problèmes méthodologiques et conceptuels au sein de la théorie de la production. La section 5.3 montre que c'est seulement dans la deuxième phase, allant du milieu des années 1970 à la fin de la carrière de Georgescu-Roegen, que la théorie flux-fonds est utilisée pour discuter des aspects physiques de la production.

5.1 La conception circulaire de la production

Cette section donne un bref aperçu de différentes approches que l'on peut grouper sous la notion de « conception circulaire de la production ». Cette conception de la production repose sur l'idée d'une interdépendance générale entre les différents secteurs de l'économie. Les produits d'une industrie sont nécessaires aux autres industries, donnant lieu à un système de relations réciproques. Dans ce cadre, deux enjeux apparaissent particulièrement importants. D'une part, les conditions techniques qui permettent la reproduction ou la croissance de l'économie. D'autre part, l'existence d'un ensemble de prix et de revenus qui soit compatible avec les relations techniques. Dans la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen, la question des conditions techniques de reproduction est la plus présente, mais celle de la détermination des prix intervient également. Il est donc utile de voir comment ces questions ont été traitées par d'autres approches relevant de la conception circulaire de la production, afin de mettre en perspective la contribution de Georgescu-Roegen.

5.1.1 Des classiques à Leontief et Sraffa

Les fondements de la conception circulaire de la production sont présents chez les auteurs « classiques ». William Petty (1623-1687) est le premier à insister réellement sur l'interdépendance entre les activités économiques et ses implications quant à la distribution du surplus. Dans ce cadre, le surplus est défini comme l'ensemble de la production disponible après avoir satisfait les besoins de reproduction du système. Ces besoins incluent : les biens intermédiaires qui circulent entre les industries, aussi appelés capital circulant ; l'entretien des biens d'équipements, ou capital fixe ; et les besoins de subsistance des travailleurs. François Quesnay (1694-1774) est le premier à formaliser cette circularité du processus économique dans son *Tableau économique*. Le secteur agricole y occupe une place centrale. Il est perçu comme le seul à même de réellement produire un surplus, qui est ensuite distribué parmi les différentes classes sociales. L'idée d'interdépendance générale se retrouve également chez Adam Smith, David Ricardo, ou encore Robert Torrens.

Les schémas de reproduction de Karl Marx (1818-1883) peuvent être interprétés comme une tentative de combiner l'analyse de Ricardo en termes de valeur travail et le tableau économique de Quesnay. Ces schémas représentent l'interaction entre un secteur de production des biens de consommation et un secteur de production des biens d'équipement. Marx s'intéresse d'abord aux relations entre les tailles des deux secteurs lorsqu'ils sont en situation de reproduction à l'identique du système (reproduction simple), puis en situation de croissance du système (reproduction élargie). Mais Marx cherche également à démontrer que les relations techniques qui définissent le système permettent de déterminer le taux de profit lorsque le taux de salaire est donné. Cette deuxième dimension va susciter de nombreuses discussions critiques, notamment de la part de Vladimir Karpovich Dmitriev (1868-1913) et Ladislaus von Bortkiewicz (1818-1931). La question des conditions de reproduction et d'expansion du système est quant à elle reprise par Georg von Charasoff (1877- ?). Ces trois auteurs s'appuient explicitement sur une représentation matricielle de l'interdépendance entre les processus de production et ouvrent ainsi la voie aux développements ultérieurs.

Au 20^e siècle, deux figures dominent la conception circulaire de la production : Wassily Leontief et Piero Sraffa. Les similarités entre les deux ne manquent pas. Historiquement, tous les deux ont des liens forts avec la tradition classique. Leontief réalise sa thèse sur un modèle multisectoriel sous la direction de von Bortkiewicz, tandis que Sraffa développe sa propre analyse en lien étroit avec son travail d'édition des œuvres complètes de Ricardo, raison pour laquelle sa théorie est également qualifiée de « néo-ricardienne ». Tous les deux commencent à s'intéresser à la conception circulaire de la production à peu près à la même époque, à la fin des années 1920. Leontief (1928) publie rapidement sa thèse, et ses premières contributions à l'analyse input-output datent des années 1930 (Leontief, 1936, 1937). De son côté, Sraffa (1960) attend plus de 30 ans pour publier l'ouvrage qui condense sa réflexion sur le sujet. Contrairement à une idée reçue, Leontief et Sraffa se sont rencontrés à plusieurs reprises et leurs archives révèlent un intérêt réciproque (Parys, 2016). Néanmoins, il est vrai qu'aucun des deux n'a jamais fait de référence explicite à l'autre dans ses travaux publiés.

D'un point de vue méthodologique, Leontief et Sraffa partagent une perspective « objectiviste » qui s'appuie sur des éléments observables et mesurables, en théorie du moins (Kurz et Salvadori, 2006; Akhabbar, 2019). Cette perspective s'oppose à l'approche « subjective » de la théorie néoclassique, qui donne une place importante à des éléments non observables, tels que les fonctions d'utilité et de demande. Les coefficients techniques de production représentant les échanges interindustriels apparaissent pour Leontief et Sraffa comme un point de départ beaucoup plus satisfaisant. Ils en font cependant des usages sensiblement différents. Leontief se concentre sur les conditions de reproduction et de croissance du système, et l'impact des changements structurels. Il développe pour cela des outils empiriques et collecte les données nécessaires pour établir des tableaux d'échange interindustriels. Le travail de Sraffa se situe à un niveau purement théorique. Il vise à approfondir les questions de répartition du surplus abordées par les auteurs classiques. Sraffa montre en particulier que les prix relatifs et le taux de profit sont déterminés par la structure technique de la production et le taux de salaire. Ces enjeux sont encore

aujourd'hui au cœur de la théorie néo-ricardienne.

La position de Leontief vis-à-vis de la répartition du surplus est plus ambiguë. D'un côté, (Kurz et Salvadori, 2000, 2006) soulignent que cette question est présente dans sa thèse. Selon eux, Leontief remarque que différentes règles de répartition du surplus peuvent donner lieu à différents systèmes de prix pour une même structure technique de production. Les prix ne sont donc pas seulement le produit de relations techniques sous-jacentes. Ils sont également déterminés par des causes sociales. Pour Kurz et Salvadori, il s'agit là clairement d'une influence de la tradition classique. Par la suite, Leontief développe deux modèles dans le cadre de l'analyse input-output. Le modèle « fermé » considère la demande finale sous la forme d'un panier de biens donné par unité de « valeur ajoutée ». Cette dernière englobe de manière indiscriminée l'ensemble des services humains. La demande finale est donc donnée par des coefficients fixes, comme n'importe quel autre processus. Le modèle ouvert s'intéresse au contraire à la possibilité de satisfaire une demande quelconque. Dans les deux cas, la notion de valeur ajoutée masque les enjeux de répartition, notamment entre le capital et le travail. C'est la raison pour laquelle Kurz et Salvadori considèrent que Leontief a abandonné les questions de répartition après sa thèse.

Ce point est cependant nuancé par Akhabbar et Lallement (2010). Ils notent que Leontief ne mentionne pas explicitement dans sa thèse l'idée classique selon laquelle le taux de profit et les prix sont déterminés par le taux de salaire. Tous les revenus sont réunis de manière indifférenciée dans la valeur ajoutée, dont Leontief précise simplement qu'elle peut varier selon les règles de répartition. Malgré cela, Akhabbar et Lallement reconnaissent que la conception circulaire de Leontief est clairement en phase avec l'approche classique en ce qui concerne la représentation de la production à proprement parler.

5.1.2 Les modèles linéaires et la théorie de l'équilibre générale

La relation entre Leontief et la théorie de l'équilibre générale dite de Walras-Cassel fait également l'objet d'un débat. Celui-ci trouve son origine dans les propres hésitations de Leontief à cet égard. Les références à l'approche classique abondent dans sa thèse. Mais, dans les années 1930, il présente l'analyse input-output comme une tentative d'opérationnaliser la théorie de l'équilibre général de production de Walras-Cassel. Cette référence est encore très présente dans ses travaux après la Seconde Guerre mondiale. Puis, dans les années 1980, il revendique à nouveau un héritage classique. Pour Kurz et Salvadori (2000, 2006), ces hésitations tiennent à une volonté de se rattacher à son contexte, mais elles sont trompeuses sur le plan théorique. Selon eux, l'approche de Leontief est fondamentalement celle de la tradition classique, mis à part l'absence des questions de répartition. L'analyse input-output présente au contraire des divergences importantes vis-à-vis de la théorie néoclassique, dont la théorie de l'équilibre générale est l'une des composantes. La première divergence est liée à la distinction entre deux types de représentation de la production. D'une part, dans la conception circulaire de la production, les marchandises servent mutuellement à leur propre production. D'autre part, dans la conception « unidirectionnelle » de la production, les dotations en facteurs

primaires (capital, travail, terre) sont données et permettent directement la production des marchandises. Pour Kurz et Salvadori, il est clair que Leontief, tout comme Sraffa, s'inscrit dans la première perspective, tandis que la théorie de l'équilibre générale de Walras-Cassel correspond à la deuxième.

Ce point est cependant contesté par Akhabbar et Lallement (2010). Ils notent tout d'abord que Walras entretenait des relations étroites avec von Bortkiewicz. Cela peut laisser penser que Leontief a été imprégné de la théorie de l'équilibre générale dès les débuts de sa thèse. Il ne s'agit donc pas nécessairement que d'une référence utilisée à des fins stratégiques par la suite. Sur le plan théorique, Akhabbar et Lallement reconnaissent que la conception unidirectionnelle de la production correspond à l'approche de Cassel, mais ils contestent l'association de Walras à cette même perspective. En effet, Walras procède par complexifications successives dans l'élaboration de sa théorie de l'équilibre général. Il présente tout d'abord un modèle d'échange pur. Dans un second temps, il introduit la production sous une forme unidirectionnelle. Puis, il ajoute l'idée que le capital fixe est lui-même produit, ce qui crée une première circularité. Enfin, il introduit des flux intersectoriels de capital circulant. En ce sens, la dichotomie entre conceptions circulaire et unidirectionnelle de la production ne s'applique pas réellement au cas de Walras.

Il reste néanmoins une autre source potentielle de divergence entre le modèle de Leontief et la théorie de l'équilibre général. Celle-ci concerne la dimension subjective de la théorie néoclassique. Pour (Kurz et Salvadori, 2000, 2006), la perspective « objectiviste » de Leontief amène à une critique des fonctions de demande et d'utilité. Elle rend incompatibles le modèle de Leontief et la théorie néoclassique. Akhabbar et Lallement (2010) reconnaissent que Leontief devient très critique des courbes d'offre et de demande après avoir travaillé à leur estimation économétrique au début des années 1930. Néanmoins, ils rappellent que Samuelson a proposé d'interpréter le modèle de Leontief comme un cas particulier de la théorie de l'équilibre général plutôt que comme un cadre fondamentalement différent. Cette interprétation s'appuie notamment sur le théorème de non-substitution, démontré indépendamment par Georgescu-Roegen et Samuelson. D'après ce théorème, même si plusieurs techniques de production sont disponibles pour chaque secteur du modèle de Leontief, la même combinaison de techniques sera privilégiée quelle que soit la demande à satisfaire. Ce résultat est uniquement valable en l'absence de production jointe et avec un seul facteur de production primaire. C'est en ce sens que le modèle de Leontief peut être considéré comme un cas particulier de la théorie de l'équilibre générale.

Des questions similaires sont soulevées par le modèle de John Von Neumann (1945). Ce modèle ressemble fortement à celui de Leontief, dans la mesure où il considère un système de processus linéaires interdépendants. Plus précisément, il se rapproche du modèle fermé de Leontief, car la rémunération du travail est fixe et donnée par un panier de biens de consommation. La principale différence est que le modèle n'exclut pas la possibilité de production jointe et l'existence de plusieurs processus de production pour un seul bien. Cela permet notamment de tenir compte du capital fixe en représentant les différentes générations d'un même bien d'équipement. Dans ce cadre, von Neumann montre qu'il existe une trajectoire sur laquelle tous les processus croissent au même taux.

Sur cette trajectoire, le taux d'intérêt est égal au taux de croissance.

Comme dans le cas du modèle de Leontief, l'idée d'interdépendance générale sous-jacente au modèle de von Neumann a amené certains économistes à considérer qu'il s'agit d'une variante de la théorie de l'équilibre général néoclassique²⁴⁴. Cependant, pour Kurz et Salvadori (1995), ce modèle s'inscrit plutôt dans la tradition classique, notamment en ce qui concerne la conception de la répartition. Dans le modèle de von Neumann, le salaire est donné par un panier de consommation déterminé. Le taux de profit correspond quant à lui au surplus. La rémunération des facteurs ne fait donc pas intervenir de productivités marginales, et la demande n'est pas déterminée par des fonctions d'utilité, comme dans la théorie néoclassique. Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y a pas de lien entre la demande et les prix. Car si le panier de consommation des travailleurs change, la trajectoire de croissance et les prix associés peuvent également changer. Par ailleurs, pour Kurz et Salvadori (2004), le modèle de von Neumann s'inscrit dans une approche de long-terme, dans laquelle le capital fixe varie et il n'y pas de contrainte sur le travail ou la terre. À l'inverse, la théorie de l'équilibre général est une approche de court-terme dans laquelle les dotations en facteurs primaires sont données, comme l'illustre le modèle d'Arrow-Debreu.

Pour ces mêmes raisons, les modèles de Sraffa et de von Neumann apparaissent très proches l'un de l'autre. Ils adoptent tous les deux une conception circulaire de la production, une vision classique de la répartition et l'approche en termes de production jointe pour le capital fixe (Kurz et Salvadori, 2001b)²⁴⁵. Il existe néanmoins certaines différences. Tout d'abord, von Neumann, comme Leontief, fait explicitement une hypothèse de linéarité, c'est-à-dire que les facteurs de production sont complémentaires et que les rendements d'échelle sont constants. Cette hypothèse représente le moyen le plus simple pour construire un modèle dynamique. À l'inverse, étant donné qu'il ne s'intéresse qu'aux propriétés statiques, Sraffa ne se prononce pas explicitement sur la question de la linéarité des processus de production. Par ailleurs, chez Sraffa l'hypothèse d'un salaire fixe donné par un panier de bien n'est qu'une hypothèse transitoire. Il traite ensuite de la situation où le salaire peut s'élever au-dessus d'un salaire de subsistance et ainsi participer au partage du surplus. Malgré cela, les deux approches restent très similaires.

De manière plus générale, les modèles dits « linéaires », tels que ceux de Leontief et von Neumann, sont au cœur d'un vaste programme de recherche dans les années 1950 et 1960. L'un des événements importants à cet égard est la conférence organisée par la Cowles Commission en juin 1949, intitulée « Activity Analysis of Production and Allocation » (cf. chapitre 4). Les actes de cette conférence sont par la suite édités par Tjalling Koopmans (1951). Ils contiennent notamment les démonstrations du théorème de non-substitution de Georgescu-Roegen et Samuelson. Plus généralement, les modèles de Leontief et von Neumann y sont inscrits dans le champ plus large de la « programmation linéaire ». Ce domaine des mathématiques a connu des développements majeurs après la

244. Le titre de l'article de von Neumann, « A Model of General Economic Equilibrium », a certainement joué un rôle dans cette interprétation.

245. Les archives de Sraffa montrent qu'il était lui-même déjà arrivé à cette approche de manière indépendante, avant qu'il n'ait l'occasion de lire l'article de von Neumann dans les années 40 (Kurz et Salvadori, 2001b).

Seconde Guerre mondiale, sous l'impulsion de la RAND Corporation. La programmation linéaire s'intéresse aux solutions d'un problème d'optimisation constitué d'une fonction objectif linéaire et de contraintes également linéaires. Les contributions les plus importantes sont notamment fournies par George Dantzig (1953, 1963). En économie, Dorfman *et al.* (1958) et Gale (1960) proposent des synthèses des diverses applications possibles de la programmation linéaire, incluant les modèles de Leontief et von Neumann. À cette époque, la conception circulaire de la production occupe donc une place importante en économie. Il semble cependant qu'elle perd progressivement de son influence par la suite.

5.1.3 Applications empiriques et questions environnementales

Le cadre mathématique de la programmation linéaire permet d'étudier les aspects théoriques des modèles linéaires. Leontief pour sa part reste à l'écart de ces développements principalement formels et se concentre sur les applications empiriques de l'analyse input-output. L'une des questions les plus importantes concerne les changements qui affectent les coefficients techniques des matrices input-output. Comme on l'a vu, le modèle de Leontief est fondé sur l'hypothèse de coefficients techniques uniques et fixes. D'après le théorème de non-substitution, cette hypothèse est en fait moins restrictive qu'il n'y paraît. Par ailleurs, pour Leontief, la substituabilité entre les facteurs au niveau agrégé est principalement due à des changements dans la composition de la demande. Elle peut donc être appréhendée avec un modèle input-output²⁴⁶. Mis à part ces arguments théoriques, l'hypothèse des coefficients fixes est également justifiée par une position méthodologique « opérationnaliste » (Akhabbar, 2019). Leontief estime que cette hypothèse est la plus opérationnelle dans la mesure où elle permet d'associer directement les paramètres du modèle aux données collectées. En particulier, l'hypothèse des coefficients fixes évite d'avoir à réaliser des estimations économétriques en associant une fonction de production à chaque secteur. En effet, Leontief est très critique des méthodes économétriques. Il ne pense pas qu'elles permettent d'accéder à une connaissance fiable des relations techniques sous-jacentes (cf. chapitre 4).

Pour autant, cela ne signifie pas que Leontief, et les praticiens de l'analyse input-output, pensent que les coefficients restent identiques dans le temps. Le théorème de non-substitution écarte la possibilité de substitutions entre des techniques connues à un même moment. Mais il n'empêche pas qu'une forme de progrès technique modifie la combinaison des inputs au cours du temps. Ainsi, différentes méthodes ont été développées pour prendre en compte ce changement technique (Rose et Miernyk, 1989). Certaines d'entre elles s'appuient directement sur le point de vue des ingénieurs pour formuler des avis prospectifs sur l'évolution des technologies. D'autres approches appliquent des schémas théoriques d'adoption de technologies, tels que l'approche logistique. Enfin, certaines méthodes extrapolent des tendances observées statistiquement à partir de séries temporelles. Paradoxalement, cela peut aller jusqu'à une réintroduction des estimations économétriques de fonctions de production sectorielles, auxquelles Leontief lui-même semble

246. Cet argument est très similaire à celui avancé par John L. Solow (1987) dans sa critique des estimations empiriques de la substituabilité entre l'énergie et le capital (cf. chapitre 3).

opposé. Dans l'ensemble, la principale difficulté rencontrée par ces approches est celle de la disponibilité des données. C'est tout particulièrement le cas lorsque l'on cherche à prendre en compte les aspects dynamiques, qui nécessitent de collecter des données sur le stock de capital.

Les questions environnementales occupent également une place relativement importante parmi les applications de l'analyse input-output. Ainsi, les contributions pionnières d'Isard *et al.* (1968) et de Leontief (1970) proposent différentes manières d'introduire les pollutions. Daly (1968) lui-même suggère initialement de s'intéresser aux interactions entre économie et environnement dans un cadre input-output étendu. L'approche d'Ayres et Kneese (1969), fondée le principe de conservation de la matière, peut également être incluse dans cette perspective. Une littérature importante va se développer sur cette base (Rose et Miernyk, 1989). L'une des principales questions consiste à savoir si les politiques de réduction des pollutions ont un effet expansionniste ou récessionniste au niveau global. Néanmoins, cette question s'avère difficile à trancher du fait du manque de données nécessaires.

Enfin, l'analyse input-output a aussi été appliquée aux questions liées aux ressources naturelles, et en particulier à l'énergie (Rose et Miernyk, 1989). Les divers inputs d'énergie (charbon, pétrole, électricité, etc.) sont pris en compte dès le départ dans les tableaux d'échanges interindustriels, ce qui limite les problèmes empiriques à ce niveau. Néanmoins, ces inputs sont en général mesurés en termes monétaires. Un travail de conversion des inputs d'énergie en mesures physiques, tels que les *British Thermal Units* (BTU), est donc nécessaire. Par ailleurs, l'hypothèse de coefficients techniques fixes devient problématique dans un contexte de fortes variations du prix de l'énergie. L'une des manières d'assouplir cette hypothèse est d'utiliser des fonctions de production offrant des possibilités de substitution importantes entre les inputs d'énergie, comme le font Hudson et Jorgenson (1974) (cf. chapitre 3). Les principes méthodologiques qui fondent initialement l'approche de Leontief sont donc en partie mis de côté par certains des praticiens de l'analyse input-output.

En ce qui concerne le modèle de Sraffa, des considérations environnementales n'y ont été intégrées que tardivement. Il n'existe pratiquement aucune contribution de la théorie néo-ricardienne qui s'intéresse aux questions environnementales dans les années 1970²⁴⁷. Cette situation peut être vue comme le prolongement des tendances observées lors de la controverse des deux Cambridge (cf. chapitre 2). Les cambrigiens britanniques ne se préoccupent pas tant de la structure technique du processus économique que des questions liées à la répartition du surplus. Par conséquent, il leur est plus difficile de faire le lien avec les enjeux environnementaux, tels que les pollutions ou l'épuisement des ressources. En définitive, c'est à travers la question de la rente que la connexion va s'opérer. Dès les années 1980, des travaux s'intéressent à la façon dont la rente liée à des ressources épuisables peut être intégrée dans la théorie néo-ricardienne (Parrinello, 1983; Schefold, 1987). Plus récemment, un débat a vu le jour autour d'une possible reformulation de la règle d'Hotelling dans le cadre néo-ricardien (Bidard et Erreygers, 2001; Kurz et Salvadori, 2001a). En parallèle, une littérature inspirée par le modèle de

247. À ma connaissance, la seule contribution de ce type est celle de Schefold (1977).

Sraffa se développe au sein de l'économie écologique (Perrings, 1987; O'Connor, 1993). Cependant, les liens entre la théorie néo-ricardienne et l'économie écologique demeurent à un état embryonnaire²⁴⁸.

Ce bref aperçu a permis d'identifier les divers aspects qui structurent la conception circulaire de la production. Sur le plan méthodologique, la conception circulaire de la production se caractérise par une perspective objectiviste. Elle s'appuie sur des entités observables et mesurables, en opposition à l'approche subjectiviste de la théorie néoclassique. Deux enjeux théoriques principaux apparaissent. Leontief concentre son attention sur les changements structurels de l'économie, tandis que Sraffa s'intéresse principalement à la répartition du surplus. D'un point de vue méthodologique, ils suivent deux voies différentes. Leontief met l'accent sur les applications empiriques, tandis que Sraffa privilégie les aspects théoriques. Ces caractérisations seront utiles dans la suite pour situer la théorie flux-fonds de Georgescu-Roegen par rapport à ces approches.

5.2 Fondements méthodologiques et théoriques de l'approche flux-fonds

Georgescu-Roegen présente la théorie flux-fonds pour la première fois lors d'une conférence de l'International Economic Association en 1965 (1969). Quelques années plus tard, la théorie flux-fonds fait l'objet de sa Ely Lecture au congrès de l'American Economic Association en 1969 (1970). Mais l'exposé le plus complet des fondements de la théorie flux-fonds se trouve dans le chapitre 9 de *The Entropy Law and The Economic Process* (1971). Certains aspects de ce chapitre sont par ailleurs développés dans des publications ultérieures (1972; 1976a). Dans cette première phase, ce sont les enjeux méthodologiques et conceptuels liés à la théorie de la production qui constituent le principal centre d'intérêt de Georgescu-Roegen. Au contraire, les aspects liés à la dimension physique du processus de production demeurent marginaux. De ce fait, il est particulièrement important de relier cette phase de construction de la théorie flux-fonds avec la méthodologie de Georgescu-Roegen, étudiée dans le chapitre précédent. Il en ressort une grande cohérence. Les différents principes méthodologiques identifiés préalablement sont effectivement à l'œuvre dans la théorie flux-fonds, et permettent d'en saisir les enjeux.

5.2.1 Concepts fondamentaux et modèle temporel de la production

L'intérêt de Georgescu-Roegen pour la théorie économique de la production est notamment motivé par son insatisfaction à l'égard de la théorie néoclassique de la production. Au sein de la théorie néoclassique, il est important de distinguer les fonctions de production microéconomiques, censées représenter les méthodes de production disponibles pour un producteur individuel, et les fonctions de production agrégées, censées représenter le processus de production au niveau d'un secteur ou d'une économie toute entière. Georgescu-Roegen se montre critique de ces deux formalismes, mais pour des

248. Pour davantage de détails sur les relations entre les deux littératures, voir notamment Verger (2015, 2016).

raisons différentes. Dans cette sous-section, c'est d'abord sa critique des fonctions de production microéconomiques qui est en cause. Georgescu-Roegen (1970, 1) présente les fonctions de production microéconomiques comme une « illustration du mal causé par le symbolisme aveugle qui caractérise généralement une mathématisation hâtive ». Il s'attaque en particulier à la définition de Philip Wicksteed, selon laquelle « le produit étant fonction des facteurs de production, nous avons $P = f(a, b, c, \dots)$ » (Wicksteed, 1894, cité dans Georgescu-Roegen, 1970, 1). Pour Georgescu-Roegen, cette formulation ne repose pas sur des fondements conceptuels suffisants. Elle ne permet pas de saisir la nature des inputs et des outputs, et la façon dont ils sont comptabilisés. Alors que la fonction de production s'est imposée comme un outil analytique central dans la théorie économique standard, elle n'a pas réellement donné lieu à une élaboration conceptuelle plus poussée. Il s'agit donc d'une illustration de la critique plus générale que Georgescu-Roegen adresse à l'économie mathématique. Selon lui, dans la théorie néoclassique de la production, le modèle arithmomorphique ne repose pas sur un raisonnement dialectique pré-existant.

Par conséquent, l'approche de Georgescu-Roegen vise d'abord à élaborer des bases conceptuelles plus solides pour la théorie économique de la production. Son premier pas dans cette direction est de clarifier le concept de « processus » de production. Sa définition repose sur l'idée que le processus doit nécessairement être délimité par une « frontière », dotée de deux composantes : l'une qui sépare le processus de son environnement à tout moment dans le temps ; et l'autre qui en détermine l'extension temporelle. D'emblée, Georgescu-Roegen souligne la nature dialectique du concept de frontière. Il met en avant le fait que le monde est « un tout sans couture », et par conséquent que nous déterminons la frontière d'un processus en partie de manière artificielle (1971, 212). Georgescu-Roegen illustre ce problème par la difficulté de déterminer si un atome particulier fait partie d'un organisme vivant ou de son environnement, ou en économie, d'établir si « le travailleur engagé dans un système capitaliste [appartient] fondamentalement au capitaliste ». La perception que nous avons de la frontière d'un processus est donc toujours approximative et imparfaite, et seule une forme d'idéalisation permet d'en faire un concept descriptif de la réalité. Mais ce concept n'en est pas moins fondamental pour la théorie économique de la production.

Dans le cadre méthodologique de Georgescu-Roegen, le passage du niveau dialectique au niveau arithmomorphique doit respecter un principe de cohérence structurelle (cf. chapitre 4). De ce fait, il est nécessaire de tenir compte de cette même frontière pour construire un « simili analytique » du processus de production. Comme Georgescu-Roegen (1971, 212) le reconnaît lui-même, cela impose de « procéder à des simplifications héroïques », et notamment de supposer que la frontière est définie de manière précise au niveau analytique. On retrouve donc là l'idée que le concept arithmomorphique ne représente qu'une facette du concept dialectique correspondant. C'est ainsi qu'il faut comprendre son insistance sur la place de la frontière dans la représentation analytique du processus de production :

The first element, therefore, that the analytical picture of a process must necessarily include is the analytical boundary. *No analytical boundary, no analytical process.* (Georgescu-Roegen, 1971, 213, en italique dans l'original)

Une fois introduit le concept de frontière, l'analyse du processus de production se « réduit à l'enregistrement de ce qui traverse la frontière » (1971, 215). Plus précisément, Georgescu-Roegen identifie deux catégories distinctes d'éléments traversant la frontière. Premièrement, les « flux » sont les « objets » de la transformation. Cela signifie qu'il s'agit soit d'inputs qui entrent dans le processus et y sont consommés, soit d'outputs qui sont créés à l'intérieur du processus et en ressortent. Au niveau analytique, un flux est représenté par une fonction donnant la quantité cumulée d'éléments ayant traversé la frontière jusqu'à l'instant t . Cette quantité est comptée négativement pour les inputs et positivement pour les outputs. Dans un processus de production canonique, la catégorie des flux comprend : les ressources naturelles R et les biens intermédiaires I , comme inputs ; les produits Q et les déchets W , comme outputs.

Deuxièmement, il y a des éléments dans le processus qui ne sont pas les objets de la transformation mais les « agents » de la transformation. Georgescu-Roegen qualifie ces éléments de « fonds » de services. Formellement, il en rend compte à l'aide d'une fonction donnant la quantité cumulée de services qu'ils ont rendus au temps t , c'est-à-dire la somme de tous les intervalles de temps pendant lesquels le fonds est effectivement utilisé. Dans cette catégorie, Georgescu-Roegen inclut surtout la terre L ²⁴⁹, les biens d'équipement K , et le travail humain H . La distinction entre flux et fonds constitue à proprement parler une idéalisation, c'est-à-dire qu'elle extrait de la réalité deux traits distincts et les présente sous une forme pure. Mais, dans l'ontologie de Georgescu-Roegen, la frontière entre les flux et les fonds n'est pas parfaitement définie dans la réalité. Il reconnaît qu'il peut exister des éléments qui se situent de manière ambiguë vis-à-vis de la distinction entre flux et fonds. Néanmoins, selon lui, cette distinction fournit une certaine prise conceptuelle sur le monde.

L'une des questions sous-jacentes à la distinction entre flux et fonds concerne le traitement du changement qualitatif dans les deux cas. Dans le cas des flux, le changement qualitatif est simplement représenté par le fait que les flux en entrée sont transformés en d'autres flux, qualitativement différents, en sortie. La situation est différente pour les fonds. Comme le reconnaît Georgescu-Roegen, ces derniers subissent également une forme de changement qualitatif. Il note ainsi qu'un « travailleur est reposé lorsqu'il entre dans le processus, mais en ressort fatigué », ou encore qu'un « outil est neuf lorsqu'il entre dans le processus, mais il est usé lorsqu'il en sort » (1971, 216). Cependant, la différence importante entre les flux et les fonds est que, dans le deuxième cas, le changement qualitatif n'est pas le but du processus, mais une conséquence secondaire. De ce fait, Georgescu-Roegen considère que cet aspect ne doit pas être pris en compte au niveau analytique, et qu'il faut faire comme si les fonds n'étaient pas altérés par leur utilisation. Néanmoins, pour compenser cette simplification, il propose d'introduire un flux de maintenance M , censé représenter les activités de réparation et de remplacement des biens d'équipement. Il estime alors que « les bénéfices de ce compromis sont payés par une image plus claire des implications pratiques d'un processus de production » (230). Ce choix participe donc à l'étape d'isolement, dans laquelle certains aspects du problème

249. Plus précisément, Georgescu-Roegen parle de « terre ricardienne » en référence à l'importance de ce facteur dans l'analyse de Ricardo.

étudié sont retenus, tandis que d'autres sont écartés pour préserver une certaine simplicité. Loin d'être une image exacte du processus de production, la représentation proposée par Georgescu-Roegen constitue un compromis entre réalisme et simplicité.

La discussion des notions de processus, de frontière, de flux et de fonds, montre combien Georgescu-Roegen est attaché à l'élaboration des fondements conceptuels. En ce sens, il y a dans son approche une forme d'autonomie de la théorie vis-à-vis des modèles, contrairement à la tendance à la fusion entre les deux qui peut s'observer par exemple dans la théorie néoclassique de la croissance (cf. chapitre 2). Ce n'est qu'une fois les fondements conceptuels élaborés, que Georgescu-Roegen formule une première représentation analytique du processus de production. Celle-ci est obtenue par une transposition directe des caractéristiques qui précèdent, c'est-à-dire en respectant le principe de cohérence structurelle entre les niveaux dialectique et arithmomorphique. Une des conséquences les plus importantes de cette démarche est que la représentation la plus élémentaire d'un processus de production doit selon lui tenir compte explicitement du temps. C'est en effet par rapport à ce dernier que les quantités de flux et de services sont comptabilisées. Pour cette raison, je propose de qualifier cette première représentation analytique de *modèle flux-fonds temporel*. Ce modèle s'exprime dans un premier temps sous la forme du vecteur de fonctions suivant ²⁵⁰ :

$$\left[\overbrace{R(t), I(t), M(t)}^{\text{flux d'inputs}}, \overbrace{Q(t), W(t)}^{\text{flux d'outputs}}; \overbrace{L(t), K(t), H(t)}^{\text{fonds}} \right] \quad (27)$$

Après avoir exposé les fondements de son approche, Georgescu-Roegen la compare à la fonction de production microéconomique utilisée dans la théorie néoclassique. La formule (27) qui précède décrit un processus élémentaire, correspondant à des quantités spécifiques de flux et de fonds, et à une combinaison particulière de ceux-ci dans le temps. Or, la fonction de production microéconomique ne représente pas un processus unique, mais différentes combinaisons possibles des facteurs pour un producteur individuel. Si l'on veut obtenir un formalisme comparable, il faut donc considérer un ensemble de processus élémentaires visant à produire le même bien final. La fonction associée au produit $Q(\cdot)$ devient alors une fonction des fonctions associées aux autres éléments :

$$Q(\cdot) = \mathcal{F}[R(\cdot), I(\cdot), M(\cdot), W(\cdot); L(\cdot), K(\cdot), H(\cdot))] \quad (28)$$

Par conséquent, selon Georgescu-Roegen (1971, 236), un ensemble de processus élémentaires n'est pas décrit par « une relation entre un ensemble de nombres et un nombre », mais par « une relation entre un ensemble de fonctions et une fonction », aussi appelée « fonctionnelle ». La principale différence réside dans le fait que cette dernière représentation tient compte explicitement de la coordination des activités dans le temps. Les mêmes quantités totales de flux et de fonds peuvent être utilisées selon des

250. Toutes les fonctions sont définies sur l'intervalle $[0, T]$ de la durée du processus. De plus, ces fonctions ne doivent pas être interprétées comme représentant des agrégats, ce que Georgescu-Roegen critique à plusieurs reprises. La formule est plutôt un cadre général qui peut être adapté pour tenir compte des éléments pertinents dans chaque catégorie. Voir la sous-section 5.2.2 ci-dessous pour une discussion plus détaillée de cette question.

profils temporels différents, ce qui se traduirait par des profils de production différents. Dans le cadre du modèle flux-fonds temporel, pour obtenir un formalisme proche de la fonction de production microéconomique, il faut donc considérer des processus bien spécifiques. Il est notamment nécessaire de faire l'hypothèse que toutes les fonctions sont des transformations linéaires du temps, déterminées par le débit des flux q , r , i , m , w et la taille des fonds L , K , H . La formule (28) est alors équivalente à une relation entre ces coefficients :

$$q = F(r, i, m, w; L, K, H) \quad (29)$$

Georgescu-Roegen montre ainsi que la fonction de production microéconomique n'est une représentation adéquate que dans un cas très spécifique de processus de production. Il faut que tous les flux puissent être assimilés à des substances entrant dans le processus de production à un rythme constant, et que tous les fonds soient utilisés en continu. Par conséquent, les conditions dans lesquelles une fonction de production peut représenter un ensemble de processus élémentaires sont très restrictives. En particulier, ces conditions ne sont pas remplies dans les secteurs qui dépendent de facteurs saisonniers ou de cycles naturels, comme l'agriculture, car le processus ne peut pas démarrer à tout moment. Selon Georgescu-Roegen (1971, 252), cette caractéristique explique l'importance du chômage saisonnier et de la surcapitalisation dans l'agriculture, deux phénomènes importants qui sont masqués par le formalisme néoclassique.

Dans un sens, cela illustre les fonctions que Georgescu-Roegen attribue à un similitude analytique, à savoir de raisonner de manière plus claire et rigoureuse. Ce premier modèle du processus de production met en lumière certains problèmes conceptuels dans la théorie néoclassique de la production. Georgescu-Roegen utilise également cette représentation dépendant explicitement du temps pour discuter d'autres questions. En particulier, partant de l'idée que la non utilisation des fonds est un problème économique central, il analyse différents modèles d'organisation et détermine les conditions d'une utilisation optimale des fonds. Il souligne ainsi qu'une utilisation optimale n'est possible qu'à des niveaux discrets du débit de production et que la distance entre ces niveaux augmente avec la spécialisation des tâches. Comme le fait remarquer Vittucci Marzetti (2013, 212), ces résultats apportent une confirmation analytique au « principe du multiple » formulé par Charles Babbage, et au lien entre la spécialisation des tâches et la taille de la demande selon Adam Smith. Au-delà, Georgescu-Roegen lui-même fournit peu d'applications de son modèle flux-fonds temporel. Mais d'autres auteurs ont cherché à le développer pour en faire un outil d'analyse en économie industrielle²⁵¹. Dans le cadre de cette thèse, il n'est cependant pas utile de s'aventurer plus loin dans cette voie, car les questions liées aux ressources naturelles y ont peu de place.

Mis à part quelques éléments appartenant au registre des manipulations, c'est bien le registre de la représentation qui domine dans ce qui précède. L'ambition de Georgescu-Roegen est clairement de construire un cadre analytique qui soit au plus proche de la perception élémentaire du processus de production. Cette démarche commence par l'élaboration d'un cadre conceptuel dialectique fondé sur les notions de processus, de

251. Voir Vittucci Marzetti (2013) pour une revue de littérature des contributions dans ce domaine.

frontière, de flux et de fonds. Ces notions relèvent déjà d'une forme d'idéalisation, et elles sont accompagnées de certaines hypothèses simplificatrices supplémentaires, notamment en ce qui concerne l'idée que les fonds sont inaltérés. Pour finir, ce cadre conceptuel est transposé sous la forme d'un simili analytique qui tente d'y être le plus fidèle possible, notamment en prenant en compte la dimension temporelle du processus de production. L'ensemble constitue donc un processus progressif d'abstraction, qui tâche de combiner réalisme et simplicité.

5.2.2 Modèle à processus multiples

La représentation qui précède correspond à celle d'un processus de production unique. Sur les mêmes bases conceptuelles, Georgescu-Roegen développe un second cadre analytique représentant plusieurs processus de production en interaction les uns avec les autres, qualifié ici de *modèle à processus multiples*. Pour cela, il utilise des « tableaux flux-fonds » tels que le tableau 1²⁵². Ce tableau représente deux processus de production, P_1 et P_2 , l'environnement naturel N , et le processus de consommation P_3 . Les produits C_1 et C_2 sont à la fois des flux qui circulent entre les différents processus et des fonds qui y sont utilisés. Les ressources R et les déchets W représentent les interactions avec l'environnement, tandis que la terre L et le travail humain H sont des fonds. L'ensemble combine donc deux aspects : une conception circulaire de la production, dans laquelle les produits de chaque processus constituent les facteurs de production des autres processus ; et un flux unidirectionnel de ressources naturelles prélevées dans l'environnement, et qui y retournent sous forme de déchets.

TABLEAU 1 – Tableau flux-fonds avec processus multiples

	P_1	P_2	N	P_3
	<i>Flux</i>			
C_1	x_{11}	$-x_{12}$	*	$-x_{13}$
C_2	$-x_{21}$	x_{22}	*	$-x_{23}$
R	$-r_1$	$-r_2$	r	$-r_3$
W	w_1	w_2	$-w$	w_3
	<i>Fonds</i>			
C_1	y_{11}	y_{12}	*	y_{13}
C_2	y_{21}	y_{22}	*	y_{23}
L	y_{31}	y_{32}	*	y_{33}
H	y_{41}	y_{42}	*	y_{43}

Le modèle à processus multiples procède à une simplification importante par rapport à la représentation d'un processus de production unique qui précède. En effet, la

252. Ce tableau est adapté de celui de Georgescu-Roegen (1971, 254), avec seulement deux processus de production par simplicité. Un astérisque indique que le flux ou le fonds correspondant est nul.

représentation fonctionnelle associée au modèle flux-fonds temporel est abandonnée au profit de coefficients techniques constants. La signification accordée à ces coefficients par Georgescu-Roegen est variable. À certains endroits, il suggère qu'il s'agit de quantités cumulées de flux et de services sur une année (1971, 254). Tandis qu'à d'autres, il les présente comme des débits de flux et des tailles de fonds (1976a, 241). À nouveau, cette simplification peut être considérée comme une illustration du principe d'isolement. Le problème qui est désormais au centre de l'attention n'est plus l'*organisation interne d'un processus unique*, mais l'*interaction entre plusieurs processus*. L'abandon du modèle flux-fonds temporel semble motivé par la volonté de préserver une certaine simplicité, sans que cela soit exprimé de manière tout à fait explicite par Georgescu-Roegen.

Un autre point crucial à cet égard concerne la critique de Georgescu-Roegen envers les variables agrégées. Pour lui, les différents flux et fonds impliqués dans ces processus « ne sont pas tous qualitativement identiques et n'ont donc pas de mesure commune » (1971, 244). D'un point de vue méthodologique, cela apparaît comme une conséquence de l'approche réaliste qui sous-tend le principe d'idéalisation. Les variables agrégées étant des constructions statistiques, elles ne peuvent être reliées à notre perception directe de la réalité économique. Elles ne peuvent donc pas représenter un point de départ pour la théorie de la production. L'approche de Georgescu-Roegen consiste au contraire à associer aux coefficients du modèle flux-fonds le sens le plus élémentaire qui soit : des quantités d'un élément spécifique. Ce sont donc des coefficients purement techniques, qui n'impliquent pas d'agrégation monétaire ou d'autres mesures économiques. En ce sens, la théorie flux-fonds s'oppose de manière radicale à la fonction de production agrégée utilisée dans la théorie néoclassique des ressources et dans la théorie néo-thermodynamique de la production (cf. chapitres 2 et 3)²⁵³.

Cette approche strictement désagrégée pourrait être contradictoire avec l'objectif de simplicité poursuivi par la méthodologie de Georgescu-Roegen si elle impliquait d'énumérer tous les éléments effectivement impliqués dans un processus réel. Ce problème est en partie contourner via le principe d'isolement. Le modèle à processus multiples ne représente qu'un ensemble restreint de processus, et d'éléments de ces processus, jugés pertinents pour traiter d'une question spécifique²⁵⁴. En guise d'illustration, le tableau 1 vise simplement à souligner que le processus économique repose sur l'intrication de plusieurs processus de production, ainsi que l'interaction de ces derniers avec l'environnement naturel. Pour cela, les quatre processus retenus, ainsi que les deux flux et les quatre fonds qui leur correspondent, sont suffisants. Mais si l'on en vient à s'intéresser à une autre question, il est alors possible d'ajouter les éléments nécessaires, par exemple, de distinguer différentes formes de terre ou de travail. Ce point illustre à nouveau la ma-

253. Étonnamment, Georgescu-Roegen ne fait jamais référence à la critique des fonctions de production agrégées formulée par Fisher (1969). Celle-ci semble pourtant fournir un appui intéressant à sa propre position méthodologique, dans la mesure où elle montre que les conditions de constructions d'une fonction de production agrégée à partir de fonctions microéconomiques sont très restrictives.

254. On verra par exemple plus bas que lorsque Georgescu-Roegen s'intéresse aux questions énergétiques, il en tient explicitement compte dans son modèle. Mais comme l'illustre le tableau 1, cela ne signifie pas qu'il faille systématiquement inclure l'énergie dans le modèle flux-fonds à processus multiples.

nière dont la méthodologie de Georgescu-Roegen appréhende la tension entre réalisme et simplicité.

Une question naturelle concerne la relation entre le modèle à processus multiples et le modèle input-output traditionnel de Leontief²⁵⁵. De ce point de vue, la perspective de Georgescu-Roegen fait écho à l'approche objectiviste de Leontief, qui s'appuie sur des entités observables et mesurables. La critique de Georgescu-Roegen envers les variables agrégées relève clairement d'une préoccupation similaire. De ce fait, il n'est pas étonnant que lui-même évoque la relation entre la théorie flux-fonds et le modèle input-output à certaines occasions. Il reconnaît par exemple que « la matrice des flux et le tableau input-output sont deux formes complètement équivalentes » (1971, 255)²⁵⁶. Cela ne signifie pas que la matrice des flux et le tableau input-output sont identiques, mais qu'ils peuvent être transformés l'un en l'autre par une certaine réorganisation des coefficients. Cependant, cette équivalence ne doit pas masquer un certain nombre de différences.

Une première différence importante est d'ordre méthodologique. Le modèle flux-fonds est conçu comme un outil purement théorique, alors que le modèle input-output s'inscrit dans une méthodologie « opérationnaliste », dans laquelle la dimension empirique est fondamentale (Akhabbar, 2019). Le modèle de Leontief est élaboré en lien étroit avec la construction des données empiriques qui y seront ensuite insérées. Or, d'un point de vue empirique, un certain niveau d'agrégation est toujours nécessaire, car il serait impossible en pratique de collecter les données associées à la multitude de processus de production distincts opérant dans l'économie. Il ne peut donc plus s'agir de coefficients purement comptables comme dans le cas du modèle flux-fonds. Par conséquent, le modèle input-output représente des *secteurs* de production en interaction les uns avec les autres, plutôt que des *processus* à proprement parler²⁵⁷. Cette différence traduit l'interdépendance entre le registre des manipulations et le registre de la représentation. Les modèles de Georgescu-Roegen et Leontief partagent une vision commune de l'économie comme ensemble de processus interdépendants, mais ils divergent par les fonctions auxquels ils sont destinés. Cette divergence a des conséquences sur la manière spécifique dont les processus de production sont représentés dans chaque modèle.

La deuxième différence importante entre la théorie flux-fonds et l'analyse input-output est liée au concept de fonds. Ce concept est absent de l'analyse input-output. Le modèle statique input-output ne représente habituellement que la matrice des flux. Or, pour Georgescu-Roegen, cela ne montre qu'une facette du processus de production. Par exemple, si « deux processus [ont] exactement les mêmes coefficients de flux », ce modèle ne permet pas de dire si « l'un est plus efficace [...] que l'autre », c'est-à-dire si l'un utilise moins de fonds pour faire le même travail (1971, 220). Par conséquent, la prise en compte des fonds relève du registre de la représentation. Pour Georgescu-Roegen, en

255. Cette question est d'autant plus importante que Georgescu-Roegen (1950a, 1951a,b) lui-même a contribué à la littérature sur l'analyse input-output. Les rapports avec le modèle de Sraffa seront quant à eux étudiés de manière plus détaillée dans la sous-section 5.3.2.

256. Georgescu-Roegen (1971, 256) utilise notamment cette équivalence pour critiquer la notion de « flux interne », parfois utilisée dans l'analyse input-output, à l'aune de son concept de frontière.

257. La sous-section 5.2.3 montre que cet élément est crucial pour comprendre comment la question de la substituabilité est traitée dans chacun des deux cas.

l'absence des fonds, le modèle donne une vision tronquée de la réalité.

On pourrait objecter à cela qu'un équivalent des fonds a été introduit dans le modèle dynamique input-output sous la forme d'un *stock* de capital. Mais Georgescu-Roegen insiste beaucoup sur la distinction conceptuelle entre un stock et un fonds. Pour lui, un stock peut être épuisé à n'importe quel rythme, alors qu'un fonds nécessite une certaine durée pour fournir ses services. Il illustre cette différence en soulignant que si « une boîte contient vingt bonbons, on peut rendre vingt enfants heureux aujourd'hui ou demain » (1971, 226). Mais, si « une chambre d'hôtel durera probablement mille jours de plus, nous ne pouvons pas rendre mille touristes heureux maintenant ». Bien sûr, cette distinction ne porte pas sur les éléments eux-mêmes, mais sur leur fonction dans le processus. Une machine en attente d'être vendue fait partie d'un stock d'inventaire, mais une fois qu'elle commence à fonctionner, elle devient un fonds. Cela illustre une fois de plus l'attention particulière que Georgescu-Roegen porte aux fondements conceptuels de la théorie de la production.

5.2.3 Modèle dynamique et changement qualitatif

La discussion qui précède amène naturellement à s'intéresser de plus près au *modèle flux-fonds dynamique*. Pour en saisir les caractéristiques fondamentales, il est suffisant de s'appuyer sur le tableau flux-fonds 2. Dans ce tableau, deux processus produisent des biens qui servent à la fois à la consommation et à l'équipement en capital²⁵⁸. Les coefficients x_{ij} et y_{ij} représentent des quantités fixes. Les quantités de flux et de fonds dépendent des coefficients d'échelle λ_j qui affectent tous les facteurs de manière proportionnelle. Comme les modèles dynamiques de Leontief et de von Neumann, il s'agit donc d'un modèle linéaire.

TABLEAU 2 – Tableau flux-fonds dynamique

	P_1	P_2
	<i>Flux</i>	
C_1	$x_{11}\lambda_1(t)$	$-x_{12}\lambda_2(t)$
C_2	$-x_{21}\lambda_1(t)$	$x_{22}\lambda_2(t)$
	<i>Fonds</i>	
C_1	$y_{11}\lambda_1(t)$	$y_{12}\lambda_2(t)$
C_2	$y_{21}\lambda_1(t)$	$y_{22}\lambda_2(t)$
H	$y_{31}\lambda_1(t)$	$y_{32}\lambda_2(t)$

On note par ailleurs $z_1(t)$ et $z_2(t)$ les quantités de marchandises C_1 et C_2 qui sont dédiées à la consommation. Le modèle suppose que les marchés sont à l'équilibre. Par conséquent, les niveaux de consommation sont égaux aux produits nets des biens moins la

²⁵⁸. Ce tableau est adapté de celui de Georgescu-Roegen (1976a, 246), avec des changements mineurs dans les notations.

part qui est économisée pour accroître l'échelle de production. Les équations dynamiques de ce système sont donc les suivantes :

$$\begin{cases} z_1(t) = x_{11}\lambda_1(t) - x_{12}\lambda_2(t) - y_{11}\dot{\lambda}_1(t) - y_{12}\dot{\lambda}_2(t) \\ z_2(t) = -x_{21}\lambda_1(t) + x_{22}\lambda_2(t) - y_{21}\dot{\lambda}_1(t) - y_{22}\dot{\lambda}_2(t) \end{cases} \quad (30)$$

Si des trajectoires de consommation sont données, ces équations permettent de déterminer les trajectoires requises pour les tailles des processus de production. Cependant, toutes les trajectoires de consommation ne sont pas réalisables, car certaines conditions formelles doivent être respectées. En particulier, Georgescu-Roegen (1971, 272) suggère que si le système est initialement stationnaire, il doit « descendre à un niveau de consommation inférieur avant de remonter à un niveau supérieur ». Cette propriété apparaît clairement si l'on considère la contrainte mise en évidence par Mayumi (2005, 543)²⁵⁹. Si l'on note $n_1(t)$ et $n_2(t)$ les productions nettes des marchandises C_1 et C_2 , alors il existe un coefficient $\xi > 0$, tel que les inégalités suivantes doivent être vérifiées pour tout $t > 0$ ²⁶⁰ :

$$\begin{cases} n_1(0) - z_1(0) > \int_0^t \frac{dz_1(\tau)}{d\tau} e^{-\xi\tau} d\tau \\ n_2(0) - z_2(0) > \int_0^t \frac{dz_2(\tau)}{d\tau} e^{-\xi\tau} d\tau \end{cases} \quad (31)$$

Si le système est initialement à l'état stationnaire, alors on a $n_1(0) = z_1(0)$ et $n_2(0) = z_2(0)$, et les termes de gauches sont nuls. On en déduit directement que les consommations doivent initialement décroître avant de pouvoir croître à nouveau, ce qui confirme l'argument de Georgescu-Roegen. Par conséquent, une économie ne peut pas sortir d'un état stationnaire sans réduire temporairement le niveau de consommation des biens produits. Cette propriété relativement intuitive trouve ici une validation logique rigoureuse qui s'inscrit dans le type de fonctions épistémiques que Georgescu-Roegen attribue aux modèles²⁶¹.

Cependant, jusqu'ici, Georgescu-Roegen reconnaît que le modèle flux-fonds dynamique est équivalent à celui du « système de Leontief » (1971, 270). C'est la raison pour laquelle, il insiste ensuite sur l'idée qu'une « augmentation du flux de produits nécessite au préalable la création de certains *processus* supplémentaires » (273, en italique dans l'original). En d'autres termes, il ne suffit pas d'économiser les biens produits pour augmenter l'échelle des processus de production. Les biens d'équipement doivent en outre

259. Georgescu-Roegen montre que la consommation doit chuter dans un cadre discret. Bien qu'il suggère que cette propriété reste valide pour le modèle continu présenté ci-dessus, il ne le démontre pas formellement. Il est nécessaire de s'appuyer sur la contrainte mise en évidence par Mayumi pour confirmer l'intuition de Georgescu-Roegen.

260. On a donc $n_1(t) = x_{11}\lambda_1(t) - x_{12}\lambda_2(t)$ et $n_2(t) = -x_{21}\lambda_1(t) + x_{22}\lambda_2(t)$. Plus précisément, les inégalités (31) doivent être vérifiées pour les sentiers « équilibrés et soutenus », définis par le fait que les productions nettes n_1 et n_2 sont croissantes. Cela exclut les cas où la croissance de la consommation pourrait initialement se faire par la consommation des biens d'équipements déjà installés.

261. Ce résultat repose sur l'hypothèse qu'à l'état stationnaire les fonds sont utilisés au maximum de leurs capacités. Si au contraire, il reste suffisamment de capacités non utilisées, il serait possible d'amorcer une trajectoire de croissance sans réduire la consommation.

être agencées de manière cohérente pour former une nouvelle ligne de production, ce qui requière une certaine durée supplémentaire. Par conséquent, il devrait y avoir un décalage entre le moment où les biens C_i sont économisés sur la production et le moment où ils augmentent réellement l'échelle des processus de production. D'un point de vue analytique, cela conduit à l'introduction de retards dans les équations (30). Encore une fois, il s'agit d'une question liée au registre de la représentation. L'introduction des retards dans les équations différentielles découle des fondements conceptuels de la théorie flux-fonds, et en particulier de la notion de « processus ».

On peut cependant légitimement se demander si l'introduction de retards dans les équations dynamiques du modèle flux-fonds ne va pas à l'encontre de l'objectif de simplicité inhérent à la méthodologie de Georgescu-Roegen. Lui-même est conscient de cette difficulté. Il note à propos des systèmes avec retards que « le fait que leurs solutions ne possèdent pas la simplicité analytique des systèmes purement dynamiques a rendu leur étude moins profitable et a découragé leur utilisation dans des applications concrètes » (1971, 274f, 100). En effet, la résolution de systèmes différentiels à retards est beaucoup plus complexe que celle des systèmes différentiels classiques, ce qui peut empêcher d'en déduire tout résultat intéressant²⁶². Autrement dit, ici, l'exigence de réalisme semble aller à l'encontre de la préservation d'une certaine simplicité. Dans ce cadre, on peut se demander s'il ne serait pas plus pertinent de voir cet élément analytique simplement comme une option possible. Il conviendrait de l'introduire dans le modèle si cela s'avère particulièrement pertinent du point de vue du problème étudié, mais non de manière systématique.

Par ailleurs, la question des retards tend à masquer une différence plus fondamentale entre les modèles dynamiques flux-fonds et input-output. Dans les deux cas, il est fait l'hypothèse que les différents éléments d'un processus de production sont utilisés dans des proportions constantes, c'est-à-dire que les modèles sont linéaires. Mais les fondements méthodologiques sur lesquels reposent cette hypothèse sont très différents. Dans le cadre input-output, l'hypothèse des proportions constantes s'inscrit dans une perspective opérationnaliste (Akhabbar, 2019). Leontief reconnaît que les coefficients peuvent changer au cours du temps. Mais il estime que l'hypothèse de proportions constantes est la plus opérationnelle, au moins à court terme, dans la mesure où elle permet d'associer directement les paramètres du modèle aux données collectées. En particulier, elle évite d'avoir à réaliser des estimations économétriques en associant une fonction de production à chaque secteur. Leontief se montre très critique des méthodes économétriques et ne pense pas qu'elles permettent d'accéder à une connaissance fiable des relations techniques sous-jacentes.

Dans la méthodologie de Georgescu-Roegen, l'hypothèse de proportions constantes trouve plutôt sa justification à un niveau purement théorique. Si Leontief admet la possibilité que les coefficients changent, c'est parce que son approche suppose nécessairement un certain degré d'agrégation au niveau des différents secteurs considérés. Dès lors, la combinaison des différents éléments au niveau du secteur est le produit d'une pluralité

262. Mayumi (2005) montre néanmoins qu'il est possible d'obtenir quelques informations sur le comportement du système avec retards en utilisant la méthode de transformation de Laplace.

de processus, et des changements dans cette structure sous-jacente peuvent affecter les proportions. À l'inverse, comme on l'a vu plus haut, le modèle flux-fonds est fondé sur une approche strictement désagrégée, qui ne peut avoir de sens qu'en l'absence d'objectif empirique. Dans ce cadre, l'hypothèse de proportions constantes découle du fait qu'un changement dans le niveau de production correspond à l'addition d'autant de lignes de production nécessaires, toutes identiques les unes aux autres. Ainsi, un doublement de la production nécessite une duplication du processus existant. Il ne peut y avoir d'effet de structure, puisqu'un même processus est toujours à l'œuvre.

Il me semble en tout cas que c'est ainsi qu'il convient d'interpréter les remarques de Georgescu-Roegen sur la substitution entre les facteurs. Il considère par exemple qu'un « processus à plus forte intensité de capital nécessite normalement un type de capital différent », et par conséquent qu'il « n'y a aucun sens à parler de l'élasticité de substitution entre capital homogène et travail homogène » (1971, 243-244). Autrement dit, pour lui, « tout changement dans la combinaison des facteurs implique un changement qualitatif » (1976a, 243). Par conséquent, dans le cadre flux-fonds, ce changement ne peut se manifester par une modification des proportions dans un processus donné, mais uniquement par l'apparition d'un nouveau processus de production.

C'est pour cette dernière raison que Georgescu-Roegen insiste sur la distinction formulée par Schumpeter entre « croissance » et « développement », déjà évoquée dans le chapitre 1^{er}. La croissance pure se caractérise par une augmentation quantitative fondée sur des processus de production qualitativement invariants. Le développement est quant à lui le résultat d'un changement qualitatif. Schumpeter illustre cela en remarquant « que l'on peut ajouter les unes aux autres autant de carrioles qu'on le souhaite, cela ne fera jamais un train » (Schumpeter 1934, cité dans Georgescu-Roegen 1976a, 243). Il s'agit donc d'une transposition dans le cadre de la théorie de la production de la distinction plus générale que Georgescu-Roegen opère entre « dynamique » et « évolution » (cf. chapitre 4). Dans ce contexte, le modèle flux-fonds dynamique peut uniquement servir de simili analytique au phénomène de croissance. À l'inverse, pour Georgescu-Roegen (1976a, 245), les changements qualitatifs rendent le développement économique « hors d'atteinte non seulement des modèles dynamiques, mais de tout autre formalisme arithmomorphique ». Ce point souligne que l'ontologie évolutionnaire associée à la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}) est bien sous-jacente à la théorie flux-fonds.

Cette approche mérite en particulier d'être comparée avec la notion de « progrès technique » dans le cadre néoclassique (cf. chapitre 2). Dans les modèles néoclassiques de croissance, il est supposé que le progrès technique peut être représenté formellement d'une manière ou d'une autre. À l'inverse, Georgescu-Roegen considère qu'il n'est pas possible de prendre en compte ce phénomène de manière satisfaisante dans un modèle mathématique. La raison en est que « s'il y a développement, les systèmes qui représentent les processus au cours des périodes de croissance successives se réfèrent à un ensemble de biens qui changent constamment » (1976a, 248). En d'autres termes, le changement qualitatif implique de nouveaux produits, de nouveaux facteurs de production et de nouvelles relations analytiques entre les deux. Ces changements ne peuvent être représentés dans le type d'équations différentielles utilisées dans les modèles dynamiques, qui reposent

nécessairement sur des variables définies de manière continue. Cela illustre donc le type de limites à la modélisation fixées par la méthodologie de Georgescu-Roegen (cf. chapitre 4).

Dans l'ensemble, cette section montre que la première phase de développement de la théorie flux-fonds, du milieu des années 1960 au milieu des années 1970, est motivée par des préoccupations méthodologiques et conceptuelles concernant la théorie de la production. La fonction de production néoclassique est très explicitement critiquée par Georgescu-Roegen, à la fois dans sa version microéconomique et dans sa version agrégée. Georgescu-Roegen entend également distinguer son approche de celle de Leontief sur un certain nombre de points, tout en reconnaissant des similitudes. La démarche de construction théorique qu'il suit pour cela illustre bien sa méthodologie, telle qu'elle a été analysée dans le chapitre 4. Les principes d'idéalisation, d'isolement et d'arithmétisation apparaissent de manière assez nette. Ils forment un processus d'abstraction progressif qui part d'une discussion conceptuelle poussée pour arriver à un ensemble de modèles adaptés à différents problèmes. On retrouve au passage la tension entre réalisme et simplicité, sans que celle-ci ne donne lieu à des incohérences rédhibitoires.

Cette démarche confirme l'attention portée par Georgescu-Roegen au registre de la représentation dans la construction des modèles. Plus précisément, son approche illustre ce que Mäki (2009c) désigne sous le nom de « commentaire ». Cette notion renvoie à l'ensemble des arguments qui visent à étayer les bases de la ressemblance entre le modèle et le système qu'il tente d'appréhender. Dans le cas de la théorie flux-fonds, les fondements conceptuels élaborés par Georgescu-Roegen constituent le socle sur lequel cette ressemblance est basée. Dans un second temps, la construction des modèles implique la recherche d'un équilibre entre réalisme et simplicité. Cet équilibre traduit à la fois la reconnaissance du caractère nécessairement idéalisé d'un modèle, et la volonté de limiter cette idéalisation autant que possible. Le critère justifiant le choix des éléments à retenir et ceux à laisser de côté reste cependant flou. En particulier, il n'est pas directement question d'un mécanisme causal central par rapport auquel ce choix serait effectué, comme dans la méthodologie suggérée par Mäki. Malgré cela, il semble légitime de dire que les modèles construits par Georgescu-Roegen dans le cadre flux-fonds méritent le statut de « systèmes subrogés ». Ils se distinguent ainsi de « systèmes de substitution » dont les propriétés de ressemblance avec le problème étudié resteraient vagues, comme c'est le cas pour les modèles néoclassiques avec ressources épuisables (cf. chapitre 2).

À l'inverse, le registre des manipulations des modèles est peu développé par Georgescu-Roegen. Dans sa perspective méthodologique, ce registre se réduit à une fonction d'exploration théorique, c'est-à-dire à la clarification de raisonnements et à la validation de leur cohérence logique. Cependant, cette fonction est peu illustrée dans le cadre de la théorie flux-fonds. Quelques résultats concernant l'organisation interne d'un processus de production viennent confirmer les intuitions de Smith et Babbage à l'aide du modèle flux-fonds temporel. De même, le modèle à processus multiples dynamique permet de souligner les contraintes associées à la transition entre un état stationnaire et un sentier de croissance. Mais ces résultats restent très élémentaires. Le manque d'application plus développée peut expliquer le faible intérêt suscité par le modèle flux-fonds. De même,

il est possible que ce modèle soit apparu redondant par rapport au modèle de Leontief. Il y en effet clairement une familiarité entre les deux modèles. Mais il y a également des différences méthodologiques, conceptuelles et analytiques. En ce sens, les modèles de Georgescu-Roegen et de Leontief ne sont ni redondants, ni réellement opposés l'un à l'autre. Ils sont plutôt complémentaires, car ils répondent à des fonctions différentes.

5.3 Dimensions physique et économique de la production

La dimension physique du processus de production occupe une place marginale dans les débuts de l'approche flux-fonds. C'est réellement à partir de la fin des années 1970 que Georgescu-Roegen (1977a, 1978a,b) s'intéresse à la place des flux de matière et d'énergie dans la théorie flux-fonds. Cette réflexion aboutit notamment à un article intitulé « Energy Analysis and Economic Valuation » (1979c), dans lequel il donne un aperçu général de sa position sur la question. Le modèle flux-fonds avec matière et énergie est à nouveau mobilisé à plusieurs reprises dans la période allant de cette publication à la fin de la carrière de Georgescu-Roegen (1982; 1984; 1986b).

Cette section montre que les développements de la théorie flux-fonds dans cette deuxième période sont très cohérents avec la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}). La théorie flux-fonds permet d'articuler les dimensions physique et économique de la production de manière satisfaisante. Elle échappe ainsi aux difficultés rencontrées avec les fonctions de production agrégées (cf. chapitres 2 et 3). La principale faiblesse de la théorie flux-fonds se situe une fois de plus dans le manque d'application réellement développée. Cette situation questionne sur la capacité du modèle flux-fonds à fournir une compréhension plus fine des interactions entre l'économie et son environnement physique, au-delà d'aspects très élémentaires.

5.3.1 Flux physiques et lois de la thermodynamique

Pour commencer, il est utile de rappeler ce que j'ai qualifié, à la suite de Spash (2012), d'ontologie *hiérarchique* (cf. chapitre 1^{er}). Cela signifie que dans la conception thermodynamique de l'économie, la dimension économique est *encastrée* dans la dimension physique de la réalité. Plus précisément, cette ontologie met l'accent sur les flux de matière et d'énergie qui traversent le processus économique, et en font un système thermodynamique ouvert. D'une part, ressources naturelles et déchets se trouvent dans une égalité quantitative du fait des principes de conservation de la matière et de l'énergie, c'est-à-dire du premier principe de la thermodynamique. D'autre part, les déchets sont une forme qualitativement dégradée de la matière et de l'énergie présentes dans les ressources naturelles initiales. En ce sens, les ressources naturelles ne disparaissent pas réellement, mais elles ne sont plus sous une forme *utilisable*. Ce que Georgescu-Roegen (1971, 281) résume par l'idée que « du point de vue purement physique, le processus économique est entropique : il ne crée ni ne consomme de matière ou d'énergie, mais ne fait que transformer la basse entropie en haute entropie ».

La question est alors de savoir dans quelle mesure cette perspective se retrouve dans la

théorie flux-fonds. Dans les premières présentations du cadre flux-fonds, les lois de la thermodynamique sont mentionnées à un niveau très général. D'une part, Georgescu-Roegen (1971, 242) considère que selon la « loi de conservation de la matière et de l'énergie, il doit exister dans chaque cas une relation entre les flux d'inputs et d'outputs ». D'autre part, il s'appuie sur la loi de l'entropie pour souligner la distinction entre ressources et déchets. Les premières sont définies comme de la basse entropie provenant de l'environnement : « dans l'exploitation minière, on exploite les stocks de diverses formes de basse entropie contenus dans la croûte terrestre sur laquelle nous vivons ; dans l'agriculture, on exploite principalement le flux de basse entropie qui atteint la terre sous forme de rayonnement solaire » (294). Les déchets sont quant à eux définis comme de la matière et de l'énergie de haute entropie, et « selon la loi de l'entropie [...], ce [flux de déchets] est irrévocablement irréversible » (1976a, 242).

Il convient également d'insister sur la manière dont la frontière du processus de production est conçue dans ce cadre. Georgescu-Roegen (1976a, 238) estime qu'une fois que la représentation d'un processus est réduite à la comptabilisation des éléments qui traversent sa frontière, « on ne peut plus refuser de voir que la physiologie de tout processus de production implique un flux entrant de ressources naturelles et un flux sortant de déchets ». Cela souligne que la frontière est ici de nature *physique*, à l'instar de la manière dont on définit les contours d'un système thermodynamique. Ce point est d'autant plus important que, pour appliquer les lois de la thermodynamique dans ce cadre, la frontière doit nécessairement tenir compte de tous les flux d'énergie et de matière pertinents. Malgré ces quelques éléments, la dimension physique de la production est marginale dans les contributions de Georgescu-Roegen à la théorie flux-fonds au début des années 1970.

Ce n'est qu'à partir de la fin des années 1970 que cette dimension physique occupe davantage de place dans le cadre flux-fonds. Cet intérêt accru est notamment motivé par la volonté de Georgescu-Roegen de critiquer ce qu'il nomme le « dogme énergétique ». Il définit ce dogme par l'idée que « l'énergie est le seul élément nécessaire au processus économique » (1024)(1979c)²⁶³. Le dogme énergétique suppose que la matière peut être entièrement recyclée si une quantité suffisante d'énergie est disponible. Dans cette perspective, la matière ne représente donc pas une contrainte en elle-même. Or, Georgescu-Roegen est vivement opposé à l'idée que le recyclage intégral est possible (cf. chapitre 1^{er}). Il propose de formaliser l'impossibilité du recyclage intégral sous la forme d'un quatrième principe de la thermodynamique. Celui-ci apparaît contestable sur le plan strictement théorique, mais il soulève un enjeu important sur le plan pratique. En particulier, les usages dits « dissipatifs » des métaux empêche tout recyclage *a posteriori*.

Pour Georgescu-Roegen, une image complète des aspects physiques du processus de production doit donc nécessairement inclure les flux d'énergie, mais également ceux de matière. C'est ce qui l'amène à proposer la variante du modèle à processus multiples représentée dans le tableau 3²⁶⁴. Les six processus représentés dans ce tableau sont :

263. Georgescu-Roegen attribue cette position à divers auteurs issus de différentes disciplines, tels que Howard Odum en écologie, Harrison Brown en chimie, Alvin Weinberg en physique et Kenneth Boulding en économie.

264. Ce tableau est adapté de celui de Georgescu-Roegen (1979c, 1042), avec quelques changements

TABLEAU 3 – Tableau flux-fonds avec matière et énergie

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
	<i>Flux</i>					
<i>MS</i>	$r_{00}(-)$	*	*	*	*	*
<i>ES</i>	*	$r_{11}(-)$	*	*	*	*
<i>CM</i>	x_{00}	*	$x_{02}(-)$	$x_{03}(-)$	$x_{04}(-)$	*
<i>CE</i>	$x_{10}(-)$	x_{11}	$x_{12}(-)$	$x_{13}(-)$	$x_{14}(-)$	$x_{15}(-)$
<i>K</i>	$x_{20}(-)$	$x_{21}(-)$	x_{22}	$x_{23}(-)$	$x_{24}(-)$	$x_{25}(-)$
<i>RM</i>	*	*	$x_{32}(-)$	x_{33}	$x_{34}(-)$	*
<i>C</i>	*	*	*	*	x_{44}	$x_{45}(-)$
<i>RW</i>	x_{50}	x_{51}	x_{52}	$x_{53}(-)$	x_{54}	x_{55}
<i>DM</i>	d_{00}	d_{01}	d_{02}	d_{03}	d_{04}	d_{05}
<i>DE</i>	d_{10}	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}
<i>R</i>	d_{20}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}	d_{25}
	<i>Fonds</i>					
<i>K</i>	y_{00}	y_{01}	y_{02}	y_{03}	y_{04}	y_{05}
<i>L</i>	y_{10}	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	y_{15}
<i>H</i>	y_{20}	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	y_{25}

la production de matière contrôlée *CM* à partir de matière *in situ* *MS* par P_0 ; la production d'énergie contrôlée *CE* à partir d'énergie *in situ* *ES* par P_1 ; la production de biens d'équipement *K* par P_2 ; le recyclage de la matière par P_3 ; la production de biens de consommation *C* par P_4 ; et le processus de consommation P_5 . De plus, le tableau distingue quatre types de déchets différents : les déchets matériels recyclables *RW*, qui peuvent être transformés en matière recyclée *RM*; la matière dissipée *DM* et l'énergie dissipée *DE*, qui sont définitivement non récupérables; et d'autres éléments non réutilisables dans le processus de production, notés *R*. Ces derniers désignent des éléments qui contiennent encore de la matière et de l'énergie non dissipées, mais qui ne peuvent pour autant être remis en circulation dans le processus de production, tels que « la roche broyée d'une mine de cuivre à ciel ouvert, la plupart des déchets urbains et les déchets nucléaires » (1979c, 1041).

À la lumière des fondements méthodologiques de la théorie flux-fonds, ce tableau ne doit pas être compris comme une représentation exhaustive du processus économique. Georgescu-Roegen entend uniquement souligner ainsi ce qu'il perçoit comme la dualité physique fondamentale du processus de production, impliquant à la fois des flux de matière et d'énergie. Ce modèle montre comment ces deux flux de ressources sont impliqués

mineurs. Tout d'abord, les lignes sont réorganisées afin de rendre plus évidente la distinction entre les ressources, les marchandises produites et les déchets. Deuxièmement, les symboles sont harmonisés en fonction de chacune de ces trois catégories. Enfin, les coefficients des flux peuvent être soit positifs, s'il s'agit d'une production nette, soit négatifs, s'il s'agit d'une consommation nette. Ce dernier cas est indiqué par le signe (-). Cela facilite les traitements analytiques ultérieurs.

dans la production de biens d'équipement et de consommation. En retour, ces derniers contribuent à la production de matière et d'énergie contrôlées, directement dans le cas du capital et indirectement dans le cas de la consommation, par la reproduction de la force de travail. On retrouve donc une conception circulaire de la production similaire à celle des modèles de Leontief, Sraffa et von Neumann. Mais le modèle flux-fonds conjugue ces interdépendances circulaires avec la transformation unidirectionnelle des flux de matière et d'énergie, qui passent du statut de ressources à celui de déchets. Cet aspect traduit de manière très directe la conception thermodynamique de l'économie qui sous-tend l'approche de Georgescu-Roegen.

Pour autant, l'incorporation des lois de la thermodynamique dans le cadre flux-fonds n'est réalisée que de manière partielle par Georgescu-Roegen. Il introduit les principes de conservation de la matière et de l'énergie dans une première représentation, plus simple que celle présentée dans le tableau 3. Pour cela, il suppose que « tous les flux doivent être exprimés en unités physiques (calories ou moles, par exemple) » (1979c, 1028). Or, il reconnaît que dans le tableau 3, les éléments non réutilisables R soulèvent un problème à cet égard, car ils peuvent « inclure à la fois de l'énergie et de la matière » (1041). Par conséquent, il n'est plus possible « d'écrire séparément les relations de conservation de ces entités ». Georgescu-Roegen considère donc implicitement que tous les autres flux sont liés soit à la matière, soit à l'énergie, mais pas aux deux.

Pourtant, cette idée n'est pas strictement valable pour au moins deux raisons. Premièrement, la matière contient toujours de l'énergie, comme le reconnaît Georgescu-Roegen (1979c, 1029f, 10) lui-même lorsqu'il déclare que « tout transport de matière implique aussi de l'énergie ». Plus important encore, les ressources énergétiques ont en général un support matériel. Certes, l'énergie peut entrer dans le processus économique sans aucun contenu matériel, comme c'est le cas de l'énergie solaire²⁶⁵. Mais la plupart des flux d'énergie actuels sont liés à un flux de matière, en particulier les combustibles fossiles. Or, dans ce dernier cas, la composante matérielle est responsable des émissions de CO₂, facteur important de réchauffement climatique. Dès lors que le modèle flux-fonds entend représenter à la fois la structure interne du processus économique et son interaction avec l'environnement, il apparaît important d'être en mesure d'en rendre compte analytiquement.

Il ne semble pas y avoir d'obstacle majeur à cela. Il convient principalement de séparer l'unité de compte des flux, de leurs contenus énergétique et matériel²⁶⁶. Ainsi, les coefficients des flux représentent leur taille, mesurée en fonction d'un élément unitaire. Dans cette perspective, le tableau flux-fonds donne la structure purement *technique* du processus économique. Pour réellement rendre compte de sa dimension *physique*, il faut introduire les contenus énergétique et matériel de l'élément unitaire choisi, désignés res-

265. J'entends simplement par là que le flux d'énergie solaire est immatériel. Mais bien sûr, des fonds matériels, tels que des panneaux solaires, sont nécessaires pour le transformer en une forme d'énergie utile.

266. Cette perspective s'apparente à celle adoptée par Krysiak (2006). La principale différence est que ce dernier ne raisonne pas dans un cadre flux-fonds, mais sur la base d'une matrice dont la signification conceptuelle n'est pas précisée. Il manque donc des fondements méthodologiques et conceptuels à l'approche de Krysiak, ce qu'apporte la théorie flux-fonds.

pectivement par les symboles ϵ et μ ²⁶⁷. Les deux principes de conservation appliqués au tableau 3 peuvent alors s'écrire de la manière suivante :

$$\sum_{i=0}^1 r_{ij}\epsilon_i^r + \sum_{i=0}^5 x_{ij}\epsilon_i^x + \sum_{i=0}^2 d_{ij}\epsilon_i^d = 0, \quad j = 0, \dots, 5 \quad (32)$$

$$\sum_{i=0}^1 r_{ij}\mu_i^r + \sum_{i=0}^5 x_{ij}\mu_i^x + \sum_{i=0}^2 d_{ij}\mu_i^d = 0, \quad j = 0, \dots, 5 \quad (33)$$

Par conséquent, avec quelques corrections analytiques mineures, la première loi de la thermodynamique peut être incorporée dans le modèle flux-fonds. Le cas de la loi de l'entropie est plus complexe. Georgescu-Roegen affirme que les ressources entrent dans le processus économique avec une « basse entropie » et ressortent comme des déchets de « haute entropie », mais il n'intègre pas formellement la loi d'entropie dans son modèle. Pour ce faire, on peut considérer chaque procédé comme un système thermodynamique ouvert en régime permanent, et attribuer à chaque flux un contenu entropique σ . Dans de tels systèmes thermodynamiques, la variation d'entropie est nulle. La différence entre le contenu entropique des inputs et des outputs est compensée par un terme de production interne d'entropie $s(P_j)$. La loi de l'entropie stipule alors simplement que $s(P_j)$ est positif²⁶⁸. Formellement, cela se traduit par l'ensemble d'équations suivant :

$$\sum_{i=0}^1 r_{ij}\sigma_i^r + \sum_{i=0}^5 x_{ij}\sigma_i^x + \sum_{i=0}^2 d_{ij}\sigma_i^d = s(P_j) \geq 0, \quad j = 0, \dots, 5 \quad (34)$$

Suivant la même démarche, il n'y a pas d'obstacle *a priori* à l'intégration d'autres variables thermodynamiques dans le modèle flux-fonds. Il serait par exemple envisageable d'introduire la notion d'« exergie » utilisée par Ayres pour mesurer à la fois les flux d'énergie et de matière (cf. chapitre 1^{er}). L'objectif n'est cependant pas ici de développer toutes les possibilités associées à cette approche. Il s'agit plutôt de voir si les lois de la thermodynamique peuvent être incorporées de manière cohérente dans le modèle flux-fonds, étant donné l'importance qui leur est accordée dans la conception thermodynamique de l'économie. Si Georgescu-Roegen lui-même n'aborde que partiellement cette question, les remarques ci-dessus montrent que c'est effectivement possible.

Fondamentalement, l'introduction des principes de la thermodynamique dans le modèle flux-fonds est rendue possible par son caractère strictement désagrégé. Dans le cadre d'une fonction de production agrégée, la difficulté à rendre compte des aspects physiques

267. Le contenu matériel peut désigner soit la masse de l'élément unitaire, soit la quantité d'un élément chimique donné. Dans le second cas, on a en fait un coefficient μ par élément chimique. Si l'on exclut les réactions nucléaires, les quantités de chaque élément chimique sont bien conservées dans les processus de production.

268. Cette approche représente en quelque sorte une synthèse entre les approches de Krysiak (2006) et Ferrari (2015), car aucune n'est entièrement satisfaisante par elle-même. Ferrari utilise explicitement le formalisme du modèle flux-fonds, mais elle s'appuie sur la formulation classique de la loi d'entropie pour les systèmes isolés, ce qui est inapproprié pour les systèmes ouverts. Krysiak utilise la bonne formulation de la loi de l'entropie, mais comme indiqué plus haut, il lui manque un cadre théorique bien défini.

du processus de production provient du fait que le modèle ne renvoie pas clairement à des éléments de la réalité (cf. chapitres 2 et 3). Au contraire, dans l'approche flux-fonds, chaque élément est censé représenter une entité bien définie, et non un agrégat statistique. Il est donc possible d'en définir les contenus énergétique et matériel de manière univoque, et plus généralement d'associer chaque processus de production à un système thermodynamique ouvert. Le modèle flux-fonds donne ainsi réellement une prise conceptuelle sur la dimension physique du processus de production.

Notons au passage que cette perspective ne pourrait être que partiellement adaptée à l'approche input-output, car cette dernière suppose une forme d'agrégation au niveau de chaque secteur. Il n'y a pas d'obstacle majeur en ce qui concerne l'énergie. Bien que les formes d'énergie soient diverses, il est possible de définir un nombre limité de catégories telles qu'au sein de chaque catégorie le contenu énergétique soit relativement uniforme. Le problème est plus sérieux en ce qui concerne la matière. Il est difficile d'envisager une classification des biens intermédiaires et finaux telle que le contenu matériel au sein de chaque catégorie soit uniforme. Par conséquent, l'idée même d'un coefficient de contenu matériel est problématique.

Il convient par ailleurs de confronter l'intégration des principes de la thermodynamique dans la théorie flux-fond à une remarque formulée par Georgescu-Roegen dès l'introduction de *The Entropy Law and the Economic Process* :

Instead of looking for a thermodynamic homology in the usual mathematical systems of economics, we may now try to represent the economic process by a new system of equations patterned after that of thermodynamics. [...] But to write any set of the initial equations, we must know the exact nature of the individual process to which it refers. And the rub is that in the long run or even in the not too long run the economic (as well as the biological) process is inevitably dominated by a qualitative change which cannot be known in advance. (Georgescu-Roegen, 1971, 17)

Cette remarque limite la portée des lois de la thermodynamique dans le cadre flux-fonds. Elle souligne que les équations thermodynamiques, telles que (32), (33) et (34), n'ont de sens que pour un ensemble donné de processus. Ces équations doivent être modifiées si les processus subissent un changement qualitatif. Cela ne remet pas en cause l'intégration des lois de la thermodynamique dans le modèle flux-fonds proposé ci-dessus. Mais cela souligne que cette intégration n'est réellement pertinente qu'en l'absence de changement qualitatif.

Cette remarque incite notamment à revenir sur l'idée de limite thermodynamique, qui occupe une place centrale dans la controverse entre la conception thermodynamique de l'économie et la théorie néoclassique des ressources (cf. chapitre 2). Cette idée s'oppose à l'hypothèse de productivité illimitée des ressources, qui repose notamment sur une forte substituabilité entre le capital agrégé et les ressources. Dans le cadre de cette controverse, les références à la théorie flux-fonds apparaissent problématiques à deux égards. D'une part, la remise en cause d'une forme de substituabilité entre les facteurs est plus profonde dans la théorie flux-fonds. Elle tient aux fondements méthodologiques, et au caractère strictement désagrégé, plutôt qu'à une référence aux principes de la thermodynamique.

De ce fait, la complémentarité concerne tous les facteurs, et pas seulement le capital et les ressources (cf. sous-section 5.2.3). D'autre part, la théorie flux-fonds insiste sur l'idée qu'à plus ou moins long terme, l'économie est affectée par des changements qualitatifs qui modifient la nature même des éléments impliqués dans les processus de production. Il n'est alors plus possible d'identifier de manière évidente une forme de contrainte physique intertemporelle qui s'applique avant et après ce changement qualitatif. Il semble donc que l'idée de limite thermodynamique ne trouve pas aisément sa place dans la théorie flux-fonds, ou *a minima* qu'il convient d'examiner la question plus en détail.

Dans l'ensemble, cette partie montre néanmoins que la théorie flux-fonds est compatible avec la conception thermodynamique de l'économie, et en particulier avec son ontologie hiérarchique. La dimension physique du processus de production trouve naturellement sa place dans le modèle flux-fonds, et il est même possible d'y intégrer formellement les principes de la thermodynamique. Il est également important de souligner que cette cohérence avec la conception thermodynamique de l'économie est rendue possible par les caractéristiques méthodologiques de la théorie flux-fonds. En particulier, la stricte désagrégation du modèle permet de rendre compte de la dimension physique du processus de production sans ambiguïté. Plus généralement, l'importance accordée par Georgescu-Roegen au registre de la représentation dans la construction de son modèle favorise la mise en relation des différentes facettes de la production.

Il est également possible d'interroger les possibilités qu'ouvre cette approche en termes de manipulations. Si Georgescu-Roegen lui-même ne fournit pas réellement d'éléments à ce sujet, les travaux de Perrings (1986, 1987) sont particulièrement intéressants de ce point de vue. Ce dernier se place très explicitement dans la conception thermodynamique de l'économie initiée par Georgescu-Roegen, et il cherche à intégrer cette perspective dans un modèle multisectoriel. De manière étonnante, il ne fait pas référence à la théorie flux-fonds. Il privilégie plutôt une approche inspirée des modèles de Leontief, von Neumann et Sraffa. Néanmoins, Perrings reproche à ces derniers leur omission de la dimension physique du processus économique et propose d'introduire cette dimension de deux manières. D'une part, sa matrice multisectorielle représente non seulement les processus de production économiques, mais également les processus de production écologiques. D'autre part, il s'appuie sur le principe de conservation de la matière pour étudier les interactions entre l'économie et son environnement. Il s'intéresse en particulier aux propriétés dynamiques d'un tel système. Son analyse montre notamment qu'en l'absence de changement technique la croissance du sous-système économique est nécessairement limitée. Malgré les différences analytiques entre le modèle de Perrings et celui de Georgescu-Roegen, cette perspective permet d'envisager certaines des implications liées à l'introduction des principes de la thermodynamique dans la théorie de la production.

5.3.2 Théorie de la valeur et des prix

Une conception anti-réductionniste de la valeur et des prix

La conception thermodynamique de l'économie correspond à une ontologie hiérarchique et anti-réductionniste (cf. chapitre 1^{er}). Dans cette perspective, la dimension éco-

nomique de la réalité est ancrée dans la dimension physique, mais elle est également dotée de propriétés *sui generis*. Cette caractéristique s'applique notamment à la notion de valeur. Georgescu-Roegen utilise la notion de valeur au sens de l'« utilité pour l'homme », c'est-à-dire de la valeur d'usage plutôt que de la valeur d'échange, selon la dichotomie classique. Il considère ainsi que la basse entropie est une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'une chose ait de la valeur²⁶⁹. Cette opposition à une forme de réductionnisme physique est donc une composante importante de la conception thermodynamique de l'économie. Il convient de se demander dans quelle mesure elle se manifeste également dans la théorie flux-fonds.

Cette question invite tout d'abord à revenir sur une remarque formulée à plusieurs reprises par Georgescu-Roegen dans les premières présentations de la théorie flux-fonds. Il estime alors qu'une représentation analytique dépend nécessairement d'un objectif, et que, dans le cas de l'économie, cet objectif est incarné par le concept de « marchandise » (1971, 213). Cette approche suggère que c'est le fait d'avoir une valeur d'échange qui détermine si un élément mérite d'être pris en compte dans l'analyse économique ou non. Cela affecte notamment la signification de la notion de frontière, qui se trouve au cœur de l'analyse de la production de Georgescu-Roegen. Dire que le statut de marchandise est nécessaire pour être pris en compte dans l'analyse de la production revient à mettre l'accent sur la dimension économique de la frontière.

Or, cette conception économique de la frontière d'un processus de production peut sembler contradictoire avec la dimension physique suggérée précédemment (cf. sous-section 5.3.1). Ainsi, la première fois qu'il discute du processus de production à l'œuvre dans l'agriculture, Georgescu-Roegen inclut tout d'abord l'énergie solaire et les éléments chimiques de l'atmosphère dans son compte-rendu des inputs et des outputs du processus. Mais par la suite, il les enlève de sa représentation sous prétexte qu'il ne s'agit pas de marchandises, au sens où ils n'ont pas de prix et sont utilisés gratuitement (1969, 508). Le fait d'exclure certains éléments d'un simili analytique est constitutif des fondements méthodologiques de l'approche de Georgescu-Roegen. Cependant, ce qui est plus problématique ici, c'est qu'il attribue ce choix au fait que l'énergie solaire et les éléments chimiques de l'atmosphère ne sont pas des marchandises. À l'inverse, selon l'interprétation physique de la notion de frontière, tout flux physique devrait être considéré comme un candidat possible pour figurer dans le modèle flux-fonds. Ce point est d'autant plus crucial si l'on souhaite incorporer les lois de la thermodynamique dans le cadre flux-fonds, car il faut pour cela que le bilan physique des inputs et outputs soit complet.

Sans que cela soit tout à fait explicite, il semble que Georgescu-Roegen infléchit par la suite sa position sur le sujet. Dans ses modèles flux-fonds ultérieurs, il lui arrive par exemple de tenir compte de l'énergie solaire²⁷⁰. Cela incite à considérer les deux dimensions, physique et économique, comme étant constitutives du concept de frontière

269. Georgescu-Roegen (1979c, 1042) réaffirme cette position dans ses travaux de la fin des années 1970 sur l'énergie, comme l'illustre ce passage : « And, in spite of some voices to the contrary, pleasure is not related by a definite quantitative law to the low entropy consumed. Nor is labor's "disutility" related by such a law to the expended low entropy. »

270. L'énergie solaire désigne ici le flux d'énergie naturelle issue du Soleil, et non le flux d'énergie qui résulte de sa transformation par un dispositif technique. Ce dernier est une marchandise.

dans la théorie flux-fonds. Il ne semble pas y avoir d'incompatibilité entre les deux, mais plutôt une forme de complémentarité. La dimension physique tient compte des flux physiques, dont certains n'ont pas forcément de valeur d'échange à proprement parler, comme l'illustre le cas de l'énergie solaire. La dimension économique tient compte des transferts de valeur d'échange, et donc, dans les économies modernes, des transactions monétaires. Bien que Georgescu-Roegen lui-même ne le fasse pas explicitement, cette dimension économique permet d'envisager la prise en compte dans le modèle flux-fonds de services n'ayant pas réellement de support physique, tels que l'éducation ou la médecine²⁷¹. Cette perspective est cohérente avec l'objectif d'intégration conceptuelle inhérent à la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er}).

L'ambition de construire une théorie intégrant les dimensions physique et économique de la production transparait également dans l'analyse des prix que Georgescu-Roegen formule dans le cadre flux-fonds. Cette analyse est notamment présentée en réaction au développement de la « théorie énergétique de la valeur », qui suggère que la valeur d'une marchandise dépend de l'énergie consommée pour la produire. Les origines de cette conception de la valeur remontent à la fin du 19^e siècle. Cette conception est notamment défendue par un certain nombre de scientifiques renommés, tels que les Prix Nobel de Chimie Wilhelm Ostwald et Frederick Soddy (Mirowski, 1988). Cependant, elle est alors formulée de manière essentiellement intuitive, comme un principe général. Les années 1970 marquent un renouveau de cette approche, toujours principalement portée par des auteurs issus des sciences naturelles. Ces auteurs cherchent à donner des fondements analytiques et empiriques à la théorie énergétique de la valeur. Ils entendent démontrer qu'il existe bien une relation entre le prix d'une marchandise et l'énergie consommée de manière directe et indirecte dans sa production, également appelée « énergie incorporée »²⁷².

Ce programme de recherche se développe sur les bases de l'analyse input-output des flux d'énergie. Cette analyse est notamment au cœur des travaux du Energy Research Group (ERG), créé en 1972 à l'Université d'Illinois, et qui perdure jusqu'en 1985 (Hannon, 2010)²⁷³. Dans ce cadre, l'approche input-output permet d'étudier les différences d'intensité énergétique entre secteurs, ainsi qu'entre différents choix technologiques pour un même secteur²⁷⁴. L'ERG s'intéresse également à l'arbitrage entre intensité énergétique et intensité en travail, et aux conséquences des chocs pétroliers. C'est dans ce cadre que

271. J'entends par là que le transfert de connaissances ou de soins ne repose pas d'abord sur le transfert d'éléments physiques. Mais il faut bien évidemment des flux de matière et d'énergie, ainsi que des fonds matériels, pour produire n'importe quel service. Ils ne sont simplement pas incorporés physiquement dans ce dernier.

272. Notons que cette terminologie est quelque peu trompeuse car l'énergie n'est pas *physiquement* incorporée dans les biens qu'elle contribue à produire.

273. Comme le note Hannon (2010, 34), la création et la permanence de l'ERG reflètent l'intérêt spécifique accordé aux questions énergétiques durant la période allant du début des années 1970 au début des années 1980 : « The federal support for ERG energy conservation work essentially disappeared in the early 1980s. In the 15 years of energy research by the ERG, a slightly lagged correlation between availability of federal funding of energy conservation research and energy price rises was noted. »

274. Certains des travaux de l'ERG s'intéressent ainsi aux différences de consommation d'énergie entre un système de consignes et un système de contenants jetables pour l'industrie des boissons.

plusieurs membres importants de l'économie écologique, tels que Matthias Ruth, Cutler Cleveland et Robert Costanza, réalisent leurs thèses. En particulier, en s'appuyant sur les méthodes développées par l'ERG, Costanza (1980) écrit l'un des articles les plus influents sur la théorie énergétique de la valeur, dans lequel il suggère une forte corrélation entre prix et énergie incorporée.

La critique de Georgescu-Roegen (1979c) envers la théorie énergétique de la valeur est cependant antérieure à cette publication. Elle s'attaque donc aux contributions d'autres tenants de cette approche, tels que Malcolm Slesser (1975) et Martha W. Gilliland (1975). Georgescu-Roegen propose d'étudier la pertinence de la théorie énergétique de la valeur dans le cadre de sa théorie flux-fonds. Il se sert de cette dernière pour formaliser les différentes perspectives qui cohabitent au sein de la théorie énergétique de la valeur. Ici, je me concentre sur l'approche en termes d'« énergie nette », dont les origines remontent aux travaux de Howard Odum. Cette perspective s'intéresse à la manière dont l'énergie contrôlée produite par le processus énergétique est consommée dans les autres processus²⁷⁵.

Bien que Georgescu-Roegen raisonne sur la base d'un modèle légèrement plus simple, il est possible d'exposer son point de vue à partir du tableau 3. Pour commencer, il est nécessaire de définir formellement ce que la théorie énergétique de la valeur nomme l'énergie incorporée dans une marchandise, c'est-à-dire l'énergie consommée de manière directe et indirecte dans sa production²⁷⁶. Pour cela, on définit : $X = (x_{ij})_{i,j=0,\dots,4}$, la matrice des cinq premières lignes et cinq colonnes des flux de marchandises ; $a = (a_j)_{j=0,\dots,4}$, le vecteur ligne de l'énergie incorporée dans les marchandises ; et $\eta = (\eta_j)_{j=0,\dots,4}$, le vecteur ligne de l'énergie nette produite par les différents processus. Par définition, l'énergie incorporée est obtenue en attribuant l'énergie contrôlée CE produite par le processus P_1 de façon linéaire aux autres marchandises, en fonction de la quantité utilisée dans leurs processus de production respectifs. Par convention, on attribue une énergie incorporée unitaire à CE , de sorte que $a_1 = 1$. Par ailleurs, tous les processus non producteurs d'énergie doivent, par définition, avoir un bilan neutre en énergie incorporée, donc $\eta_j = 0$ pour $j = 0, 2, \dots, 4$. Le coefficient η_1 mesure quant à lui la performance globale du processus de production de l'énergie P_1 , en tenant compte de l'énergie indirecte nécessaire pour entretenir les biens d'équipement. Ainsi, la définition de l'énergie incorporée se traduit

275. Georgescu-Roegen présente également l'approche en termes d'« énergie brute », qui s'intéresse à la façon dont l'énergie *in situ* est consommée dans les différents processus de production. Il montre que les deux perspectives sont reliées l'une à l'autre, sans pour autant être tout à fait équivalentes. Il est également important de préciser que la distinction entre « nette » et « brute » utilisée dans ce cadre n'a aucun lien avec celle mise en avant dans la controverse sur la substituabilité capital-énergie (cf. chapitre 3).

276. L'énergie incorporée diffère du contenu énergétique ϵ défini dans la sous-section 5.3.1.

par le fait que ces variables vérifient l'équation suivante²⁷⁷ :

$$a.X = \eta \quad (35)$$

De même, les prix des flux et les revenus des fonds peuvent être reliés les uns aux autres par des identités comptables associées à chaque processus. Pour cela, il faut définir : $p = (p_j)_{j=0,\dots,4}$, le vecteur ligne des prix pour les flux ; $P = (P_j)_{j=0,\dots,2}$, le vecteur ligne des revenus pour les fonds ; et $Y = (y_{ij})_{i=0,\dots,2,j=0,\dots,4}$, la matrice des cinq premières colonnes des fonds. Ces variables satisfont alors la relation²⁷⁸ :

$$p.X = P.Y \quad (36)$$

La première caractéristique importante de cette équation est qu'elle n'est pas équivalente à l'équation (35) définissant l'énergie incorporée. Bien que les deux systèmes partagent la même matrice à gauche, les différences à droite empêchent d'établir une relation théorique entre prix et énergie incorporée. Pour Georgescu-Roegen (1979c, 1044), l'erreur des tenants de la théorie énergétique de la valeur provient donc du fait qu'ils « ont suivi la pratique fallacieuse de l'économie standard qui consiste à ignorer la différence essentielle entre les flux [...] et les fonds ». Ce résultat est donc étroitement lié au rôle qu'il attribue aux fonds dans le processus économique. Georgescu-Roegen en conclut que « la réduction de la valeur économique à l'énergie est une position plus extrême que la plus pure des théories de la valeur travail » (1048). Cela montre que la dimension anti-réductionniste de son approche est pleinement intégrée dans le modèle flux-fonds.

Notons que la critique formulée par Georgescu-Roegen n'est pas spécifique au cadre flux-fonds. En particulier, elle fait également sens dans le modèle ouvert de Leontief. Dans ce cadre, si A désigne la matrice des inputs, et v le vecteur ligne des valeurs ajoutées, alors les prix p vérifient l'équation $p(I - A) = v$ (Kurz et Salvadori, 2000, 173). La principale différence est que Leontief ne précise pas comment se répartit la valeur ajoutée entre les différents facteurs primaires. Comment se fait-il alors que les tenants de la théorie énergétique de la valeur aient pu démontrer une proportionnalité entre prix et énergie incorporée ? La réponse est qu'ils utilisent le modèle fermé de Leontief, dans lequel les facteurs dits primaires, tels que le travail, sont eux-mêmes considérés comme le produit d'un processus. Ceci apparaît très clairement dans la contribution de Costanza (1980). Ce dernier calcule les énergies incorporées selon différents critères. C'est uniquement lorsque les facteurs primaires sont intégrés dans les relations intersectorielles que la corrélation entre prix et énergie incorporée est très marquée. Tout dépend donc de la convention

277. Cette équation est équivalente au système d'équations (11) obtenu par Georgescu-Roegen (1979c, 1045), avec des changements mineurs. Premièrement, le tableau 3 est utilisé comme représentation sous-jacente du processus économique, alors qu'il utilise un tableau plus simple. Deuxièmement, X désigne une matrice des lignes et colonnes du tableau, alors qu'il utilise la matrice transposée. Comme Georgescu-Roegen, j'ignore les questions soulevées par les coproduits dans ce cadre. C'est pourquoi aucune énergie incorporée n'est attribuée aux déchets recyclables RW . Par conséquent, X est une matrice carrée. Si X est régulière, alors a et η sont définis de manière unique par l'équation (35). Par ailleurs, l'annexe C précise les conditions dans lesquelles toutes les coordonnées du vecteurs a sont bien positives.

278. Cette relation est équivalente aux équations (19) et (20) obtenues par Georgescu-Roegen (1979c, 1047-1048), avec des changements similaires aux précédents.

adoptée pour calculer l'énergie incorporée, et notamment du fait d'attribuer ou non une énergie incorporée au travail. Notons au passage que Costanza s'inspire très explicitement de la conception thermodynamique de l'économie de Georgescu-Roegen, dont il cite plusieurs contributions. Cependant, il ne mentionne pas la critique de Georgescu-Roegen à l'encontre de la théorie énergétique de la valeur²⁷⁹.

Georgescu-Roegen et Sraffa

L'équation (36) présente par ailleurs une autre caractéristique importante : elle ne détermine pas complètement les prix relatifs et les revenus, car elle contient trop d'inconnues par rapport au nombre d'équations. Selon Georgescu-Roegen (1979c, 1048), « l'indétermination est supprimée par des facteurs supplémentaires de nature purement économique, tels que les préférences et la répartition des revenus ». Sa théorie de la production laisse donc une place à des aspects proprement économiques dans la détermination des prix. Les prix ne sont pas uniquement déterminés par la structure technique du processus de production, mais également par des facteurs institutionnels. Cette ouverture en direction d'autres aspects économiques, tels que les préférences et la répartition des revenus, reste cependant à l'état de potentialité dans la théorie flux-fonds. Georgescu-Roegen lui-même n'en a pas développé plus loin les implications.

Cette question invite à examiner plus en détail les points communs et les divergences entre la théorie flux-fonds et l'approche néo-ricardienne initiée par Sraffa (1960). Notons tout d'abord qu'il n'y a pratiquement aucune référence explicite à Sraffa dans les travaux de Georgescu-Roegen. À ma connaissance, la seule référence explicite concerne le fait que, « contrairement à la célèbre thèse de Piero Sraffa, la production de marchandises en général a besoin non seulement de marchandises en tant que tels, mais aussi d'usines » (1992, 143)²⁸⁰. Georgescu-Roegen met ainsi l'accent sur le fait que la production ne peut pas simplement être conçue comme le produit d'une combinaison de marchandises. Pour lui, il est nécessaire de faire intervenir le concept de processus, et la distinction entre flux et fonds. Sa critique vise donc principalement les fondements conceptuels du modèle de Sraffa. Mis à part cela, Georgescu-Roegen, tout comme Leontief, ne fait pas preuve d'un intérêt très marqué pour le modèle de Sraffa.

Malgré cela, il est intéressant de comparer les approches de Georgescu-Roegen et de Sraffa. Tout d'abord, l'approche objectiviste de Sraffa et la méthodologie de Georgescu-Roegen partagent une même préoccupation pour les entités observables et mesurables. C'est ce qui les amène tous les deux à adopter une conception circulaire de la production fondée sur des coefficients techniques d'échange entre les processus. Cette proximité est renforcée par le fait que Sraffa est lui aussi très intéressé par la physique, et notamment par la thermodynamique. Cet intérêt n'est pas mentionné explicitement dans ses travaux. Mais, à partir d'un examen de ses archives, Kurz et Salvadori (2005) notent que

279. La proximité temporelle des deux publications ne permet pas réellement d'expliquer cette absence de référence. L'article de Georgescu-Roegen est publié en avril 1979, et celui de Costanza en décembre 1980, soit presque deux ans plus tard.

280. Georgescu-Roegen (1976a, 251) fait une remarque similaire, mais sans référence explicite à Sraffa : « The point is that commodities are not produced by commodities, but by processes. »

selon Sraffa « une approche objectiviste dans n'importe lequel des domaines de la philosophie naturelle devait tenir compte des principes de la thermodynamique »²⁸¹. Notons au passage que cette dimension physique de l'approche de Sraffa a eu peu d'influence sur les débuts de la théorie néo-ricardienne, qui ne s'est intéressée que tardivement aux questions environnementales (cf. sous-section 5.1.3). Cela n'est pas vraiment étonnant puisque cette dimension n'est pas mentionnée explicitement par Sraffa dans ses travaux publiés. Il existe également un autre point commun méthodologique entre Georgescu-Roegen et Sraffa, qui les distingue notamment de Leontief. Il s'agit du fait qu'ils sont tous les deux principalement préoccupés par des questions théoriques, et se désintéressent des applications empiriques. Ils partagent ainsi une même conception de la fonction des modèles mathématiques en économie, à savoir le fait de clarifier un raisonnement et d'en valider la cohérence logique.

Si l'on revient plus spécifiquement à la question de la détermination des prix, on peut *a priori* noter une légère divergence entre l'objectivisme de Sraffa et l'approche de Georgescu-Roegen. Rappelons que l'objectivisme est conçu comme une alternative à la conception subjective de la valeur défendue par la théorie néoclassique. De ce point de vue, il est important de noter que Georgescu-Roegen mentionne les « préférences » parmi les facteurs qui permettent de lever l'indétermination de l'équation (36). Il y a là clairement un héritage de ses premières contributions à la théorie du consommateur. Il laisse une place à des aspects subjectifs dans sa conception de la valeur. Cependant, Sraffa lui-même, après avoir initialement cherché à éliminer tout élément non objectif de sa théorie, en vient à reconnaître que la répartition du surplus repose nécessairement sur des « causes extérieures » (Kurz et Salvadori, 2005, 439). En particulier, Sraffa n'exclut pas que les préférences individuelles jouent un rôle, aux côtés d'autres aspects, tels que le pouvoir de négociation salariale. En ce sens, la perspective de Georgescu-Roegen n'est pas fondamentalement différente.

La principale différence entre les approches de Georgescu-Roegen et Sraffa réside en fait dans le traitement du capital fixe, comme le notent Kurz et Salvadori (2003). D'une part, Georgescu-Roegen considère qu'il n'est pas possible de représenter adéquatement la dégradation qualitative du capital au cours du temps (cf. sous-section 5.2.1). Par conséquent, il représente le capital comme un fonds inaltérable, auquel il ajoute un flux de maintenance. D'autre part, Sraffa décide de représenter le capital fixe comme une production jointe associée à chaque processus de production. Pour rendre compte de l'usure du capital, il distingue différentes générations pour un même bien d'équipement, et il adopte une règle comptable reliant entre elles les valeurs des différentes générations. Sraffa peut alors exprimer le prix de chaque bien comme la somme, d'une part, du salaire, et d'autre part, du coût des inputs augmenté d'un taux de profit. Le profit est donc calculé sur l'ensemble des avances, c'est-à-dire à la fois sur le capital fixe et le capital circulant. À l'inverse, dans l'équation (36), la rémunération du capital est calculée comme un revenu proportionnel à la quantité technique de capital fixe. Cela semble problématique et laisse

281. Tout comme Georgescu-Roegen, Sraffa tire en partie cette conclusion de ses nombreuses lectures en philosophie des sciences. Il partage des références communes avec Georgescu-Roegen, telles que Henri Poincaré, Sir Arthur Eddington ou Alfred North Whitehead.

penser que le modèle à processus multiple de Georgescu-Roegen n'est pas très approprié pour aborder les questions de répartitions.

Pour conclure cette sous-section, on peut distinguer trois niveaux différents dans le modèle flux-fonds : le niveau technique, représenté par les coefficients du tableau 3 ; le niveau physique, lorsque l'on ajoute les contenus en énergie et en matière, voire l'entropie ; et le niveau économique, lié aux prix des flux et aux revenus des fonds. Ces trois niveaux sont liés les uns aux autres, mais ils ne se confondent pas. Cette situation diffère nettement de la confusion qui prévaut dans le cadre des fonctions de production agrégées. Ainsi, l'un des problèmes soulevés par la controverse entre Georgescu-Roegen/Daly et Solow/Stiglitz porte précisément sur les unités dans lesquelles est mesurée la production (cf. chapitre 2). Alors que Daly défend l'idée que la production doit nécessairement avoir une dimension physique, Stiglitz réplique au contraire qu'elle est mesurée en valeur. Dans les deux cas, la signification exacte reste floue. De même, Kümmel propose de mesurer le capital et la production en fonction de l'énergie et de l'information, afin de répondre aux critiques concernant l'utilisation de variables agrégées (cf. chapitre 3). Mais en définitive, il fait une hypothèse *ad hoc* selon laquelle ces mesures physiques sont proportionnelles aux mesures monétaires traditionnelles. La fonction de production agrégée ne semble donc pas offrir de possibilité intermédiaire, permettant de combiner des mesures physiques et économiques sans les confondre. À l'inverse, dans le cadre flux-fonds ces deux niveaux sont indépendants, mais reliés l'un à l'autre par l'intermédiaire du niveau technique. En ce sens, le modèle flux-fonds fournit davantage de prise conceptuelle pour penser l'articulation entre ces différentes dimensions.

Du point de vue méthodologique, les aspects du modèle flux-fonds présentés dans cette sous-section relèvent davantage du registre de la représentation que des manipulations. Certes, le modèle sert à clarifier la distinction entre les prix et l'énergie incorporée. Cela illustre le type de clarifications logiques que Georgescu-Roegen envisage comme débouché à ses similis analytiques. Mais cette distinction est obtenue à l'aide d'équations élémentaires, qui découlent assez directement des fondements conceptuels de la théorie flux-fonds. Il n'y a donc pas réellement de manipulations logiques du modèle, mais plutôt une simple description de sa structure.

5.3.3 Viabilité et technologies prométhéennes

Les parties qui précèdent ont permis de montrer que la théorie flux-fonds est cohérente avec l'ontologie hiérarchique et anti-réductionniste de la conception thermodynamique de l'économie. La sous-section 5.2.3 a par ailleurs mis en évidence la manière dont l'ontologie évolutionnaire fait également partie intégrante de cette approche. Il reste à voir comment ces divers aspects se combinent dans l'étude de la dépendance de long terme de l'économie vis-à-vis des flux physiques. Dans le cadre flux-fonds, cette question est abordée de manière très différente de l'approche néoclassique examinée dans le chapitre 2. L'approche néoclassique se concentre sur la question de savoir comment une ressource épuisable pourrait être utilisée de manière à garantir une consommation intergénérationnelle constante, voire croissante. Or, pour Georgescu-Roegen, cet objectif est irréalisable, car la productivité des ressources est bornée par une limite thermodynamique. C'est plu-

tôt le recours à une nouvelle source d'énergie, plus durable que les énergies fossiles, qui est au cœur de la conception thermodynamique de l'économie (cf. chapitre 1^{er})²⁸². Parmi les solutions envisagées, l'énergie solaire apparaît comme la plus prometteuse, quand bien même certains obstacles doivent être surmontés pour qu'elle puisse réellement devenir la base énergétique du processus économique.

TABLEAU 4 – Tableau flux-fonds d'une technologie solaire

	P_1	P_2	P_3
<i>Flux</i>			
<i>SE</i>	x_{11}	$-x_{12}$	$-x_{13}$
<i>SC</i>	$-x_{21}$	x_{22}	*
<i>K</i>	$-x_{31}$	$-x_{32}$	x_{33}
<i>Fonds</i>			
<i>SC</i>	y_{11}	*	*
<i>K</i>	y_{21}	y_{22}	y_{23}
<i>H</i>	y_{31}	y_{32}	y_{33}

La question des sources d'énergie permettant de soutenir le processus économique dans le long terme est reprise dans le cadre flux-fonds. Georgescu-Roegen introduit notamment la notion de « viabilité » d'une technologie énergétique. Cette notion désigne la capacité d'une technologie à fournir un surplus d'énergie au reste de l'économie, une fois ses propres besoins directs et indirects satisfaits. Georgescu-Roegen en propose une définition formelle dans le cadre du tableau simplifié 4²⁸³. Ce tableau représente un processus P_1 produisant de l'énergie solaire *SE*, un processus P_2 produisant des capteurs solaires *SC*, et un processus P_3 produisant des biens d'équipement standards *K*. La condition de viabilité est la suivante²⁸⁴ :

$$\begin{cases} x_{11} - x_{12} - x_{13} > 0 \\ -x_{21} + x_{22} = 0 \\ -x_{31} - x_{32} + x_{33} = 0 \end{cases} \quad (37)$$

Cette condition signifie donc qu'il est possible de produire juste assez des deux biens d'équipement pour maintenir les fonds du processus de production d'énergie, tout en

282. Solow semble également se ranger tardivement derrière cette vision du problème. Il remet ainsi en question la pertinence des modèles néoclassiques avec ressources épuisables auxquels il a contribué dans les années 1970 (cf. chapitre 2).

283. Ce tableau est adapté de celui de Georgescu-Roegen (1979c, 1052).

284. Cette condition est adaptée de la condition (30) de Georgescu-Roegen (1979c, 1052). La principale différence est qu'il suppose que la troisième équation doit également être strictement positive. Cependant, si la condition (37) est vérifiée, il est toujours possible d'utiliser une partie du surplus énergétique pour produire davantage de capital, et ainsi satisfaire la condition de Georgescu-Roegen. Inversement, si la condition de Georgescu-Roegen est satisfaite, on peut diminuer la production de capital pour arriver à l'équilibre, et augmenter en parallèle le surplus d'énergie. Les deux conditions sont donc équivalentes, mais (37) permet ensuite de mieux voir le lien avec l'énergie nette.

dégageant un surplus global d'énergie. Bien que Georgescu-Roegen lui-même n'étudie pas le lien entre les deux, cette conception de la viabilité fait naturellement écho à la notion d'énergie nette (cf. sous-section 5.3.2). Pour étudier plus précisément ce lien, il est utile de rappeler la définition formelle de l'énergie nette dans le cadre du tableau 4. Pour cela, on note a_2 et a_3 les coefficients d'énergie incorporée de SC et de K , et η_1 l'énergie nette du processus de production d'énergie. Ces coefficients sont solution du système suivant :

$$\begin{cases} x_{11} - a_2x_{21} - a_3x_{31} = \eta_1 \\ -x_{12} + a_2x_{22} - a_3x_{32} = 0 \\ -x_{13} + a_3x_{33} = 0 \end{cases} \quad (38)$$

Si l'on somme l'ensemble des lignes de ce système, et que l'on utilise les deux dernières équations de la condition (37), on obtient :

$$\begin{aligned} \eta_1 &= x_{11} - x_{12} - x_{13} + a_2(-x_{21} + x_{22}) + a_3(-x_{31} - x_{32} + x_{33}) \\ &= x_{11} - x_{12} - x_{13} \end{aligned} \quad (39)$$

La technologie est donc viable si et seulement si l'énergie nette est positive. Une démonstration plus générale de cette équivalence est également fournie dans l'annexe C. De ce point de vue, la notion de viabilité apparaît quelque peu redondante vis-à-vis de celle d'énergie nette. Néanmoins, cela ne remet pas en cause la pertinence de l'une ou l'autre des deux notions en tant que caractérisation formelle de la capacité d'une technologie énergétique à soutenir le processus économique dans le long terme.

La principale question est de savoir comment Georgescu-Roegen applique cette notion en pratique. De ce point de vue, sa position vis-à-vis de la viabilité de l'énergie solaire est instructive :

Yet no breakthrough has taken place to increase the confidence in a viable solar technology. None of the richly endowed research outfits have achieved even a workable pilot of a combined (P_1) and (P_2) working in mutual support, let alone a pilot of full-fledged solar technology to prove its viability *independent of prices*. For when it comes to prove that a technical idea is workable, cost does not matter much. (Georgescu-Roegen, 1979c, 1053, en italique dans l'original)

Le principal argument de Georgescu-Roegen contre la viabilité de l'énergie solaire repose sur l'absence de prototype industriel couplant la production d'énergie et la maintenance des biens d'équipement, tout en produisant un surplus d'énergie. Cet argument illustre la manière dont Georgescu-Roegen envisage la relation entre son modèle flux-fonds et la réalité empirique. Cette relation est fondée sur une méthode quasiment expérimentale, qui exige de reproduire sous une forme réduite et contrôlée le système censé être représenté par le modèle. À l'inverse, Georgescu-Roegen ne s'appuie à aucun moment sur des données empiriques, par exemple issues de la littérature d'ingénieur, pour étudier la viabilité de l'énergie solaire. Cela fait écho au peu d'attention qu'il consacre aux méthodes empiriques dans sa perspective méthodologique générale (cf. chapitre 4). En particulier, Georgescu-Roegen critique vivement l'idée que les méthodes économétriques

puissent fournir des tests empiriques des théories. Mais ici, il n'est pas nécessaire de réaliser des estimations économétriques. Il serait suffisant de s'appuyer directement sur des données d'ingénieur pour étudier la viabilité d'une technologie solaire. Par ailleurs, il ne s'agit pas de réaliser un test empirique, mais plutôt de se servir du modèle comme instrument de mesure. Rien dans la méthodologie de Georgescu-Roegen ne permet d'exclure *a priori* une telle démarche. Mais il semble implicitement peu enclin à suivre cette voie²⁸⁵.

Outre la méthode appropriée pour estimer la viabilité d'une technologie solaire, la question importante est la portée d'une telle estimation à moyen ou long terme. Initialement, Georgescu-Roegen suggère que son argument ne s'applique qu'aux technologies « dont le fonctionnement est connu actuellement » (1979c, 1051). Mais il avance également des arguments contre l'idée que la situation pourrait changer dans le futur proche. Selon lui, « l'intensité du rayonnement solaire atteignant le niveau du sol étant extrêmement faible, de grandes infrastructures matérielles sont nécessaires pour le collecter » (1978b, 20). Ainsi, l'énergie nécessaire à la production des capteurs solaires serait le principal obstacle à la viabilité²⁸⁶. Pour autant, Georgescu-Roegen ne nie pas qu'essayer d'exploiter l'énergie solaire est l'une des meilleures options pour surmonter l'épuisement des combustibles fossiles. Il estime notamment que « le Soleil est la seule source d'énergie stable et complètement saine », même s'il « semble très peu probable [...] qu'il permettra à l'humanité de voler en jets, de vivre dans des grattes-ciels, et de rouler à cent kilomètres heure » (1979c, 1055). Par conséquent, sa position s'apparente plutôt à un avertissement contre l'idée que le niveau de vie des pays industrialisés puisse être maintenu avec une technologie solaire.

Dans la continuité de cette réflexion autour du concept de viabilité, Georgescu-Roegen développe la notion de « technologie prométhéenne ». Cette notion désigne une succession de technologies viables sur lesquelles le processus économique s'est appuyé historiquement. Georgescu-Roegen en distingue deux en particulier. Selon lui, « la première invention cruciale consistait en ce qui est aujourd'hui un phénomène des plus ordinaires : la maîtrise du feu » (1984, 30). C'est en référence à la place qu'occupe cette découverte dans la mythologie grecque qu'il suggère de qualifier une telle invention de « prométhéenne ». Cette technologie repose sur une réaction en chaîne dans laquelle la maîtrise du feu permet le développement d'autres techniques, telles que la métallurgie, qui permettent en retour d'accéder à davantage de combustible. Cependant, cette découverte a provoqué l'augmentation rapide de la consommation de bois et une diminution de la surface forestière dans de nombreuses régions d'Europe. La période de « Prométhée I » s'est donc achevée avec la crainte d'une pénurie de ressources en bois.

C'est dans ce contexte qu'est apparu ce que Georgescu-Roegen nomme « Prométhée

285. Au contraire, Georgescu-Roegen reste attaché à la question d'un prototype de technologie solaire. Dans l'un de ses derniers essais, il affirme qu'un tel prototype a été réalisé, et que le « résultat de cette expérience est catégorique : la quantité d'énergie solaire capturée par un certain nombre de cellules de silicium ne suffit pas à toutes les reproduire même si tous les matériaux nécessaires sont par ailleurs obtenus gratuitement » (1992, 151).

286. Georgescu-Roegen (1978b, 20) suggère également que la situation pourrait être similaire dans le cas de la fusion nucléaire.

II », à savoir l'utilisation des combustibles fossiles dans les machines à vapeur. Là encore, la viabilité est permise par une réaction en chaîne. Avec une certaine quantité de charbon, on peut en extraire une quantité plus importante, notamment en pompant l'eau des mines à l'aide d'une machine à vapeur. Cette technologie, qui se trouve à la base de la révolution industrielle au 19^e siècle, permet également de réduire la pression exercée sur les ressources forestières et ainsi d'éviter la pénurie. Pour Georgescu-Roegen, la situation contemporaine d'épuisement des ressources fossiles repose la question dans des termes similaires à ceux de la crise du bois au 18^e siècle. Il considère que « le problème est maintenant de savoir si un nouveau Prométhée résoudra la crise actuelle comme Prométhée II a résolu celle de l'âge du bois » (1984, 30). Sans pour autant exclure complètement une issue favorable, il insiste sur le caractère fondamentalement imprévisible de la découverte d'une nouvelle technologie viable. Selon lui, « personne ne peut être sûr de la nature du futur don prométhéen (s'il est jamais inventé) ».

Cette approche s'inscrit clairement dans la perspective historique défendue par Georgescu-Roegen dans le cadre de sa méthodologie (cf. chapitre 4), bien que les détails historiques restent très élémentaires. Les transformations du système énergétique sont conçues comme des changements qualitatifs des moyens de production. Ils sont associés à une forme de « développement » davantage qu'à une forme de « croissance pure ». Or, le développement ne peut être réellement appréhendé par des modèles mathématiques selon Georgescu-Roegen (cf. sous-section 5.2.3). Le principal obstacle à une telle formalisation est l'imprévisibilité des changements qualitatifs. Cette perspective s'oppose ainsi à celle des modèles néoclassiques, dans lesquels les possibilités de substitution et de progrès technique à long terme sont intégrées de manière déterministe dans une fonction de production agrégée (cf. chapitre 2). On peut néanmoins se demander s'il ne serait pas possible d'étudier dans le cadre flux-fonds une transition entre deux technologies viables hypothétiques. En accord avec la méthodologie de Georgescu-Roegen, une telle représentation analytique de transition ne prétendrait pas rendre compte de manière exhaustive d'une situation réelle, passée ou future. Mais elle permettrait d'en tirer quelques enseignements sur les propriétés générales d'une telle transition.

Pour construire la représentation la plus élémentaire possible de ce type de transition, il est possible de s'appuyer sur le modèle dynamique déjà formulé par Georgescu-Roegen lui-même (cf. sous-section 5.2.3). Cette configuration est représentée dans le tableau 5, où P_0 est le processus de production d'énergie préexistant, P_1 est le nouveau processus énergétique, et P_2 produit des biens d'équipement. On peut par exemple imaginer que P_0 désigne la production à partir d'énergies fossiles, et P_1 à partir d'énergie solaire. Afin de simplifier au maximum le modèle, deux hypothèses importantes sont faites : P_0 et P_1 produisent des formes parfaitement substituables d'énergie contrôlée CE ; les deux processus nécessitent les mêmes biens d'équipement K ²⁸⁷. Par conséquent, P_0 et P_1 ne

287. Cette représentation se rapproche de celle proposée par Georgescu-Roegen (1979c, 1054) pour une technologie mixte avec énergie solaire et combustibles fossiles. Les deux hypothèses ci-dessus sont obtenues en agrégeant l'énergie solaire et les combustibles fossiles, et en consolidant le processus d'énergie solaire avec la production de capteurs. Georgescu-Roegen (1971, 256) lui-même suggère la possibilité de consolider certains processus. La principale différence est donc que Georgescu-Roegen ne s'intéresse qu'aux propriétés statiques d'un tel système, alors que l'accent est mis ici sur les aspects dynamiques.

différent que par les proportions dans lesquelles les flux et les fonds y sont combinés. Le modèle permet ainsi d'étudier la dynamique du système selon que P_1 est plus ou moins efficace que P_0 , tel que mesuré par exemple par leurs coefficients d'énergie nette respectifs.

TABLEAU 5 – Tableau flux-fonds d'une transition énergétique

	P_0	P_1	P_2
	<i>Flux</i>		
<i>CE</i>	$x_{10}\lambda_0(t)$	$x_{11}\lambda_1(t)$	$-x_{12}\lambda_2(t)$
<i>K</i>	$-x_{20}\lambda_0(t)$	$-x_{21}\lambda_1(t)$	$x_{22}\lambda_2(t)$
	<i>Fonds</i>		
<i>K</i>	$y_{10}\lambda_0(t)$	$y_{11}\lambda_1(t)$	$y_{12}\lambda_2(t)$
<i>H</i>	$y_{20}\lambda_0(t)$	$y_{21}\lambda_1(t)$	$y_{22}\lambda_2(t)$

Dans le prolongement du modèle dynamique de Georgescu-Roegen, on note respectivement $z_1(t)$ et $z_2(t)$ les quantités d'énergie *CE* et de biens d'équipement *K* qui sont dédiées à la consommation. Pour l'énergie, la consommation correspond juste à la production nette, car il n'est pas possible d'accumuler de l'énergie sous forme de fonds. Pour les biens d'équipement, la consommation est égale à la production nette moins la part qui est économisée pour accroître l'échelle des différents processus. Afin de simplifier le modèle, il est utile de supposer que les biens d'équipement accumulés dans un processus peuvent être réalloués à un autre processus sans coût supplémentaire²⁸⁸. Ainsi, le nouveau processus P_1 peut croître en accumulant des biens d'équipements, pris soit sur la consommation, soit sur les fonds déjà accumulés dans P_0 . Cela permet l'émergence d'un nouveau processus, dont la dynamique est décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} z_1(t) = x_{10}\lambda_0(t) + x_{11}\lambda_1(t) - x_{12}\lambda_2(t) \\ z_2(t) = -x_{20}\lambda_0(t) - x_{21}\lambda_1(t) + x_{22}\lambda_2(t) - y_{10}\dot{\lambda}_0(t) - y_{11}\dot{\lambda}_1(t) - y_{12}\dot{\lambda}_2(t) \end{cases} \quad (40)$$

Si Georgescu-Roegen lui-même ne propose pas un tel modèle de transition énergétique, celui-ci apparaît comme un prolongement naturel de sa réflexion sur les technologies prométhéennes et de son modèle dynamique. L'hypothèse la plus cruciale est certainement celle d'un même bien d'équipement utilisé dans tous les secteurs et de la possibilité de le réallouer sans coût. Du fait de cette hypothèse, la notion de changement qualitatif se réduit au fait que les processus P_0 et P_1 combinent les flux et les fonds dans des proportions différentes. Sans être tout à fait incompatible avec le cadre flux-fonds, cette approche est néanmoins en décalage avec l'idée que le changement qualitatif implique également des flux et des fonds de natures différentes (cf. sous-section 5.2.3). D'un point de vue plus pratique, cette perspective évacue la question des biens d'équipements ren-

288. Ce genre de réallocation du capital est discuté par Georgescu-Roegen (1976a, 249).

dus inutiles par une transition énergétique²⁸⁹. Dans une version plus élaborée du modèle, il pourrait donc être utile de distinguer différentes formes de capital. Mais ce premier modèle fait sens dans la perspective d'un arbitrage entre réalisme et simplicité, inhérent à la méthodologie de Georgescu-Roegen. Les implications logiques de ce modèle sont étudiées dans l'annexe C. Elles montrent notamment que sous certaines conditions, la consommation doit nécessairement décroître temporairement au cours de la transition, avant de pouvoir éventuellement remonter.

Ce modèle permet également de s'interroger sur les divergences vis-à-vis des modèles néoclassiques avec ressources épuisables (cf. chapitre 2). Ces modèles sont fondés sur une fonction de production agrégée ayant en général la forme Cobb-Douglas suivante, où K désigne le capital agrégé, R les ressources, et L le travail :

$$Q = K^\alpha R^\beta L^\gamma, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (41)$$

Dans ce cadre, la substitution du capital aux ressources joue un rôle crucial pour augmenter de manière indéfinie la productivité des ressources et ainsi permettre de compenser leur épuisement. À l'inverse, dans le modèle flux-fonds, chaque processus est défini par des proportions constantes des différents éléments (cf. sous-section 5.2.3). Contrairement à ce que laissent penser certaines interprétations, la complémentarité est donc générale, et non seulement entre les flux d'un côté et les fonds de l'autre²⁹⁰. Cependant, si l'on agrège les deux processus P_0 et P_1 , il y aura bien une forme de substitution au fur et à mesure que leurs tailles respectives changent. En particulier, si le processus P_1 croît plus vite que P_0 , et que P_1 est plus intensif en capital, il y aura une forme de substitution du capital à l'énergie au niveau agrégé. Cependant, cette dernière est bornée. Par ailleurs, le modèle flux-fonds est plus transparent d'un point de vue conceptuel. Il est clairement question de la substitution entre deux processus utilisant des ressources énergétiques différentes, par exemple, des combustibles fossiles épuisables et de l'énergie solaire. Il y a donc moins de confusion que dans le cadre néoclassique, où différents mécanismes sous-jacents sont suggérés pour justifier la substituabilité au niveau agrégé (cf. chapitre 2)²⁹¹. Dans l'ensemble, on retrouve donc là les atouts du modèle flux-fonds en ce qui concerne le registre de la représentation.

À l'inverse, c'est dans le registre des manipulations que se situent les principales faiblesses du modèle flux-fonds. Georgescu-Roegen envisage les similis analytiques comme des outils pour réfléchir de manière plus claire et rigoureuse. Mais il offre peu d'applications du modèle flux-fonds dans lesquelles cette démarche est réellement mise en œuvre. En général, il reste à un niveau descriptif très élémentaire, comme l'illustre sa critique

289. Cette question, connue sous le terme de « *stranded assets* », est notamment importante pour analyser les risques financiers liés à une transition énergétique.

290. Une telle interprétation est notamment suggérée par Daly (1985, 290) : « There can be considerable substitution between labor and capital (the agent-funds), but the relation between funds and the flow [...] is overwhelmingly one of complementarity. »

291. Par ailleurs, le modèle flux-fonds de transition énergétique n'est en définitive pas si éloigné de la position adoptée par Solow à la fin de sa carrière. Cette position marque une prise de distance par rapport aux modèles néoclassiques avec ressources épuisables (cf. chapitre 2).

de la théorie énergétique de la valeur (cf. sous-section 5.3.2). Il ne développe pas davantage les implications logiques de son modèle. De ce point de vue, le modèle dynamique de transition énergétique offre quelques perspectives de développements analytiques qui pourraient combler cette faiblesse méthodologique. L'enjeu n'est pas d'en développer les implications logiques pour elles-mêmes, mais de voir s'il est possible d'en tirer quelques enseignements généraux sur les contraintes qui pèsent sur une telle transition. Dans une approche prospective, cette démarche ne peut tenir compte que de certaines caractéristiques stylisées attendues, telles qu'une efficacité plus faible du futur processus de production d'énergie. Mais elle est dépourvue de toute ambition déterministe ou prédictive.

De manière plus générale, Georgescu-Roegen a proposé un certain nombre de propriétés analytiques élémentaires dans le cadre du modèle flux-fonds, telles que la présence de retards dans les équations dynamiques, la possibilité d'introduire les principes de la thermodynamique, la relation entre prix et revenu, ou la formalisation de la notion de viabilité. Ces divers éléments constituent une boîte à outils analytique intéressante. Mais dans les travaux de Georgescu-Roegen, ils restent très indépendants les uns des autres. L'un des enjeux est donc de les articuler ensemble pour répondre à des questions spécifiques dans le cadre flux-fonds. En accord avec la méthodologie de Georgescu-Roegen, le choix des éléments pertinents doit dépendre du problème étudié. Ainsi, le modèle dynamique de transition énergétique ne requiert pas *a priori* d'introduire formellement les principes de la thermodynamique s'il s'agit uniquement d'examiner les contraintes structurelles qui pèsent sur une telle transition. La conception thermodynamique de l'économie constitue bien l'arrière-plan de cette approche, dans la mesure où elle présuppose que l'énergie est un facteur de production primordial. Mais contrairement à la théorie néothermodynamique de la production (cf. chapitre 3), cela ne donne pas nécessairement lieu à une prise en compte explicite de la thermodynamique dans le modèle, bien que celle-ci soit possible (cf. sous-section 5.3.1).

5.4 Conclusion

Comme le suggèrent certains économistes écologiques, tels que Daly (1997a) et Gowdy et Mesner (1998), la théorie flux-fonds constitue bien une forme de contrepartie analytique à la conception thermodynamique de l'économie développée par Georgescu-Roegen. Cependant, contrairement à ce que l'on pourrait croire, le lien entre ces deux aspects de la pensée de Georgescu-Roegen n'est pas si fort dans les premiers temps. Dans la première phase de développement de la théorie flux-fonds, allant du milieu des années 1960 au milieu des années 1970, Georgescu-Roegen cherche plutôt à répondre à des problèmes méthodologiques et conceptuels au sein de la théorie de la production. En particulier, il critique vivement les fonctions de production néoclassiques, microéconomiques et agrégées, pour leur manque de fondements conceptuels. Il met alors en œuvre les principes méthodologiques identifiés dans le chapitre précédent pour construire la théorie flux-fonds. Cette théorie repose avant tout sur l'élaboration méticuleuse d'un ensemble de concepts fondamentaux. Plusieurs modèles sont construits sur cette base conceptuelle

pour répondre à des enjeux différents, tels que l'organisation interne d'un processus de production ou les interactions entre plusieurs processus. L'ensemble forme ainsi un processus d'abstraction progressif. Il est en définitive assez peu question de la dimension physique du processus économique dans cette première phase.

C'est dans la deuxième phase, allant de la fin des années 1970 à la fin de sa carrière, que Georgescu-Roegen tisse des liens plus étroits entre la théorie flux-fonds et la conception thermodynamique de l'économie. L'ontologie hiérarchique, qui consiste à voir la dimension économique comme étant encastrée dans la dimension physique, se traduit par l'introduction des flux de matière et d'énergie dans le modèle flux-fonds. Il est alors possible de tenir compte des lois de la thermodynamique, car les fondements méthodologiques du modèle permettent d'identifier chaque processus avec un système thermodynamique. Pour autant, la théorie flux-fonds n'est pas physiquement réductionniste. Au contraire, Georgescu-Roegen la mobilise dans sa critique de la théorie énergétique de la valeur. Dans la théorie flux-fonds, les dimensions physique et économique de la production sont imbriquées, mais elles ne se confondent pas l'une avec l'autre. Enfin, l'ontologie évolutionnaire de Georgescu-Roegen se manifeste à travers la notion de technologie prométhéenne, dont il propose une caractérisation formelle fondée sur le concept de viabilité.

Du point de vue méthodologique, une conclusion importante est qu'il existe un lien fort entre le registre de la représentation et la prise en compte de la dimension physique de la production. Pour appréhender correctement cette dimension, il est nécessaire de rester au plus près des réalités techniques de la production, sans pour autant nier la nécessité d'une forme d'abstraction. Dans la théorie flux-fonds, il est toujours question d'un équilibre entre réalisme et simplicité dans les choix de modélisation. Mais il faut que le modèle offre une prise conceptuelle suffisante, c'est-à-dire que chaque élément du modèle soit aisément relié à une catégorie conceptuelle, et derrière elle à des référents réels. Cela permet d'appréhender sans ambiguïté la dimension physique du processus de production. Chaque processus de production peut être identifié avec un système physique et décrit en conséquence. C'est par ce biais qu'il est possible d'introduire les principes de la thermodynamique.

À l'inverse, le lien entre le registre des manipulations et la dimension physique de la production semble limité dans la théorie flux-fonds. Sur le plan purement analytique, les processus de production d'énergie ou de matière sont semblables aux autres processus. Dans une conception circulaire de la production, l'énergie et la matière sont tout autant nécessaires à la production des biens d'équipement, que les biens d'équipement sont indispensables à la production d'énergie et de matière. La principale différence est que les flux d'énergie et de matière constituent le point de contact avec l'environnement extérieur, et avec ses contraintes en ressources ou en capacité d'accumulation. Mais ces enjeux se situent à l'extérieur du champ de la production à proprement parler et nécessitent donc d'être analysés en amont. Ainsi, dans un modèle de transition énergétique tel que celui proposé plus haut, et développé dans l'annexe C, la priorité accordée à l'énergie n'est pas une conséquence du modèle, mais une prémisse. L'introduction des principes de la thermodynamique dans le modèle n'apporterait pas grand chose de ce point de vue. Ils

se situent donc en retrait dans ce type d'applications.

Sur un plan plus historique, le manque d'application du modèle flux-fonds peut d'ailleurs expliquer en partie le peu d'influence qu'il a eu, en économie en général, et en économie écologique en particulier. Cet aspect a certainement été renforcé par le peu d'intérêt porté dans les deux cas à la méthodologie de Georgescu-Roegen. Sans une bonne compréhension de cette méthodologie, il est plus difficile d'appréhender les motivations qui se trouvent derrière la théorie flux-fonds. L'accent mis sur les fondements conceptuels, et la recherche d'un équilibre entre réalisme et simplicité, sont particulièrement importants.

Les fondements méthodologiques de la théorie flux-fonds permettent également de mieux comprendre ses rapports avec les modèles de Leontief, de Sraffa, ou encore de von Neumann. Ces trois modèles partagent avec le modèle flux-fonds une vision commune, que l'on peut résumer par l'idée d'une conception circulaire de la production. Ils se distinguent les uns des autres principalement par le fait qu'ils poursuivent des objectifs différents. Au niveau méthodologique, le modèle de Leontief se distingue par sa visée empirique. Les modèles de Georgescu-Roegen et de Sraffa, bien qu'ayant tous deux une visée essentiellement théorique, se distinguent par le fait que Georgescu-Roegen met l'accent sur la dimension physique de la production, là où Sraffa s'intéresse principalement à la répartition du surplus. Le modèle de von Neumann, quant à lui, constitue en quelque sorte une version dynamique d'un cas particulier du modèle de Sraffa.

Les différences entre ces quatre modèles illustrent ainsi l'interdépendance entre le registre des manipulations et le registre de la représentation. C'est en partie parce qu'ils visent à remplir des fonctions différentes que ces modèles ne sont pas tout à fait similaires. Malgré certaines divergences conceptuelles, on peut donc penser que ces modèles sont plutôt complémentaires les uns avec les autres. Cette interprétation fait écho à la thématique du pluralisme des modèles évoquée dans l'introduction générale (Rodrik, 2015; Mäki, 2018; Aydinonat, 2018a). Les modèles de Georgescu-Roegen, Leontief, Sraffa et von Neumann ont chacun une visée spécifique, qui les amène à se distinguer les uns des autres. Mais ces différences ne remettent pas en cause une certaine familiarité entre ces modèles qui permet d'envisager leur cohabitation dans un cadre théorique élargi.

La complémentarité entre les quatre modèles ci-dessus apparaît d'autant plus clairement si on la met en regard des divergences profondes que ces modèles partagent vis-à-vis de la fonction de production agrégée. L'opposition entre une vision agrégée et une vision désagrégée du processus économique occupe évidemment une place centrale parmi ces divergences. Mais derrière cette opposition, ce sont également les questions liées aux méthodes empiriques, à la représentation du changement technique, ou à l'articulation entre les dimensions physique et économique de la production, qui sont en cause. Or, ces sujets sont au cœur des controverses autour de la place des ressources naturelles dans la théorie de la production. La conclusion générale revient plus en détail sur cette question et les enseignements qui peuvent être tirés de cette thèse.

Conclusion générale

La prise en compte des ressources naturelles dans la théorie économique de la production prend des formes variées qui reposent sur des fondements méthodologiques et théoriques radicalement différents. Les caractéristiques des trois principales approches considérées dans cette thèse sont résumées dans le tableau 6. La première colonne concerne la théorie néoclassique des ressources. Celle-ci constitue une extension relativement directe de la théorie néoclassique de la production utilisée en macroéconomie, qui repose notamment sur le formalisme des fonctions de production agrégées. Les caractéristiques de la théorie néoclassique des ressources ont été principalement analysées dans les sections 2.1 et 3.1. Bien qu'il y ait une certaine ignorance réciproque entre les littératures théoriques et empiriques associées à cette approche, elles partagent de nombreux traits communs. C'est la raison pour laquelle on peut en résumer les propriétés dans une même colonne. Cette colonne indique que la spécification de la fonction de production peut prendre plusieurs formes, obtenues par généralisations successives. Ainsi la fonction Cobb-Douglas correspond au cas particulier d'une élasticité de substitution égale à 1 au sein des fonctions CES. Les fonctions CES correspondent quant à elles au cas particulier d'une élasticité de substitution identique pour tous les couples de variables au sein des fonctions Translog. Ces dernières n'imposent pas de contrainte *a priori* sur les élasticités de substitution. Mis à part le cas de la fonction Cobb-Douglas, la substituabilité entre les variables n'est donc pas fixée par avance dans le modèle. La fonction de production repose par ailleurs sur des variables agrégées de la production, du capital, du travail et des ressources, en particulier de l'énergie. La procédure de construction de ces variables n'est pas explicitée dans les modèles purement théoriques (cf. section 2.1). Dans les travaux empiriques sur l'énergie, ces variables sont en général obtenues par une agrégation monétaire, et plus précisément par la méthode de Divisia (cf. section 3.2). À cela s'ajoutent la plupart du temps les hypothèses de rendements constants et de progrès technique non incorporé dans les facteurs de production. Enfin, il est fait l'hypothèse que le système décrit par cette fonction de production agrégée fonctionne d'une manière optimale qui l'amène à minimiser le coût de production, ce qui débouche sur les hypothèses de rémunération à la productivité marginale et de dualité. L'ensemble de ces propriétés analytiques est alors mis au service de développements purement théoriques, tels que les modèles de croissance avec ressources épuisables, et d'estimations empiriques, notamment en ce qui concerne la substituabilité entre le capital et l'énergie. Plus précisément, les estimations empiriques portent en général sur les fonctions de coût associées, et reposent ainsi de manière cruciale sur l'hypothèse de dualité.

La deuxième colonne résume les caractéristiques de la théorie néo-thermodynamique de la production. Celle-ci reprend à son compte le formalisme des fonctions de production agrégées, tout en se différenciant de manière significative de certains autres aspects de la théorie néoclassique des ressources. La théorie néo-thermodynamique développe

TABLEAU 6 – Tableau synthétique des théories de la production étudiées dans la thèse

	Théorie néoclassique des ressources	Théorie néo-thermodynamique	Théorie flux-fonds
Formalisme	Fonction de production (Cobb-Douglas, CES, Translog)	Fonction de production (Linex)	Tableaux flux-fonds
Variables	Agrégées (unités monétaires, indice de Divisia)	Agrégées (unités physiques et monétaires supposées compatibles)	Strictement désagrégées
Substituabilité	Variable	Variable	Complémentarité
Rendements	Constants	Constants	Constants
Progrès technique	Non incorporé	Partiellement incorporé dans l'exergie utile	Changement qualitatif
Rémunération des facteurs	Productivité marginale	Productivité marginale moins <i>shadow price</i>	Prix de production avec une part d'indétermination
Applications théoriques	Modèles de croissance avec ressources épuisables		Critique de la théorie énergétique de la valeur, viabilité d'une technologie solaire
Applications empiriques	Estimation indirecte de la substituabilité capital-énergie	Estimation directe de l'élasticité de production de l'énergie	

tout d'abord une nouvelle spécification fonctionnelle, qualifiée de Linex. Cette spécification ne fixe pas de contrainte *a priori* sur le degré de substituabilité entre les facteurs de production, et elle intègre l'hypothèse de rendements constants, comme dans le cadre néoclassique. La première différence significative porte sur les variables agrégées de la production et du capital. Dans la théorie néo-thermodynamique, ces variables sont supposées

être fondées sur une agrégation en unités physiques liées à l'énergie et à l'information. Cependant, une hypothèse *ad hoc* est faite pour justifier le recours aux données standards de la production et du capital dans les estimations empiriques. Cette hypothèse consiste à considérer que les données obtenues par une agrégation physique varieraient de façon proportionnelle aux données standards, obtenues par une agrégation monétaire. La possibilité de définir des variables agrégées physiques de la production et du capital reste donc purement conceptuelle et n'est pas mise en œuvre empiriquement. En ce qui concerne l'énergie, dans la théorie néo-thermodynamique, les mesures traditionnelles en termes d'énergie thermique sont progressivement remplacées par une mesure en termes d'exergie utile. Cette mesure est jugée plus adéquate pour mesurer la contribution réelle de l'énergie à la production, car elle décompte toutes les pertes subies au cours des transformations de l'énergie. De ce fait, l'exergie utile permet d'incorporer la part du progrès technique liée à l'amélioration de l'efficacité thermodynamique des procédés. Une part résiduelle du progrès technique reste cependant non incorporée dans les facteurs de production. La finalité de la théorie néo-thermodynamique est de montrer empiriquement que l'énergie joue un rôle crucial dans la croissance. Or, la perspective standard accorde à l'énergie un rôle marginal du fait de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Pour contourner cet obstacle, la théorie néo-thermodynamique introduit des contraintes techniques qui modifient le résultat du comportement optimisateur de l'économie et remettent ainsi en cause l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. La théorie néo-thermodynamique procède ensuite à des estimations directes des fonctions de production, dont les résultats attribuent à l'énergie une élasticité de production élevée, et donc un rôle important dans la croissance.

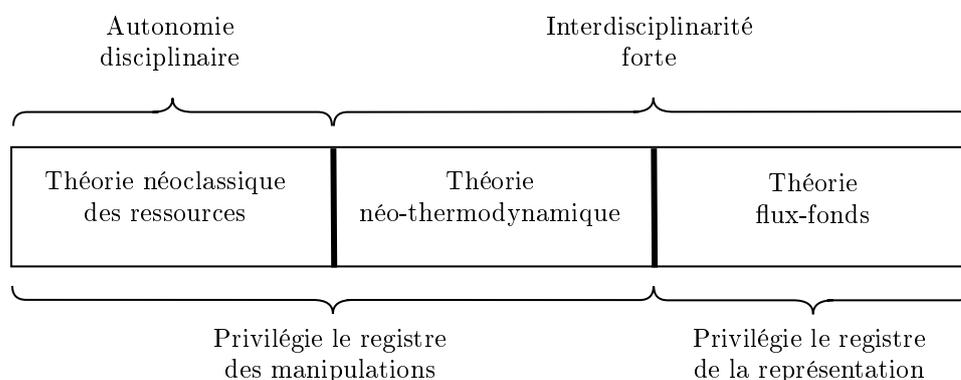
Pour finir, la théorie flux-fonds repose quant à elle sur une approche strictement désagrégée du processus de production, qui suppose de ne comptabiliser ensemble que des éléments identiques. Parmi ces éléments, cette théorie distingue les flux, comme objet des transformations, et les fonds, comme agents des transformations. Dans ce cadre, un système économique est représenté par un tableau flux-fonds qui décrit l'interaction entre plusieurs processus de production idéalisés. La théorie flux-fonds s'inscrit ainsi dans une conception circulaire de la production. Le caractère strictement désagrégé implique que les éléments interviennent dans des proportions constantes au sein d'un processus donné, c'est-à-dire qu'il y a à la fois complémentarité des facteurs de production et rendements constants. Sur la base de ces hypothèses, un modèle flux-fonds dynamique est construit pour rendre compte du phénomène de croissance pure. Au contraire, dans la théorie flux-fonds, le progrès technique est conçu comme une forme de changement qualitatif qui ne peut être représenté par un modèle dynamique. Par ailleurs, dans le cadre flux-fonds, les prix des marchandises et la rémunération des facteurs sont liés par une équation comptable. La solution de cette équation reste cependant indéterminée, et il est suggéré que l'indétermination est levée par des aspects proprement économiques, tels que les préférences et la répartition des revenus. L'équation reliant prix et revenus permet également de montrer que les prix diffèrent des coefficients d'énergie incorporée, ce qui amène à une critique de la théorie énergétique de la valeur. La notion de viabilité fournit quant à elle une condition nécessaire pour qu'une technologie énergétique puisse

soutenir le processus économique à long terme, et elle est notamment appliquée au cas de l'énergie solaire.

Apports de la thèse

La question centrale de cette thèse consiste à analyser la façon dont la dimension physique de la production est prise en compte par les trois théories ci-dessus. En mettant l'accent sur les enjeux liés à l'interdisciplinarité et à la modélisation, ce travail met en évidence deux frontières méthodologiques qui ne se superposent pas (figure 6.1). En ce qui concerne l'interdisciplinarité, la frontière se situe entre la théorie néo-thermodynamique et la théorie flux-fonds, d'une part, et la théorie néoclassique des ressources, d'autre part. Les deux premières partagent une ambition d'interdisciplinarité forte qu'elles tirent de leur ancrage commun dans la conception thermodynamique de l'économie. Cette conception de l'interdisciplinarité entre l'économie et la thermodynamique repose sur des fondements ontologiques, et en particulier sur l'idée que le processus économique est un processus de transformation de l'énergie et de la matière. Sans pour autant réduire les activités économiques à cette seule dimension physique, cette perspective invite à lui donner une place prépondérante dans la théorie économique, notamment dans la théorie de la production. Dans ce cadre, la thermodynamique fournit une grille de lecture conceptuelle et permet le développement d'instruments quantitatifs nouveaux. En s'appuyant sur ces outils, la théorie néo-thermodynamique et la théorie flux-fonds cherchent ainsi toutes deux à intégrer explicitement la dimension physique de la production, bien qu'elles le fassent de manières très différentes.

FIGURE 6.1 – Frontières méthodologiques liées à l'interdisciplinarité et à la modélisation



La théorie néoclassique des ressources défend au contraire l'idée d'une autonomie de la discipline économique par rapport aux sciences physiques, et en particulier par rapport à la thermodynamique. Dans cette perspective, l'appréhension du rôle des ressources naturelles dans le processus de production ne nécessite pas de recourir directement à des connaissances extérieures à la théorie économique standard. Les outils de cette dernière,

en particulier les fonctions de production agrégées et les estimations économétriques, sont jugés suffisants pour analyser la dépendance de l'économie aux ressources naturelles. La théorie néoclassique des ressources est donc un prolongement relativement direct de la théorie néoclassique de la production et de la croissance. Sa principale innovation consiste à introduire un ou deux facteurs de production supplémentaires. Dans ce cadre, les concepts et les méthodes utilisés pour analyser les enjeux liées aux ressources naturelles demeurent en grande partie identiques à ceux utilisés auparavant dans l'analyse des autres facteurs de production. Lorsque certaines évolutions apparaissent, notamment dans les méthodes d'estimation, elles sont plutôt le produit d'une évolution technique indépendante de la question des ressources naturelles. Cette approche renvoie ainsi l'image d'une discipline économique auto-suffisante et réfractaire à l'interaction avec les sciences physiques, tout au moins lorsque cette interaction concerne des enjeux ontologiques et conceptuels, plutôt que des analogies servant de support à l'importation de formalismes.

En matière de modélisation, la frontière se situe au contraire entre la théorie néoclassique des ressources et la théorie néo-thermodynamique, d'un côté, et la théorie flux-fonds, de l'autre. Les points communs entre les deux premières approches s'incarnent en particulier dans le recours à une fonction de production agrégée comme principal outil analytique. Dans les deux cas, la fonction de production agrégée est conçue comme une représentation fortement idéalisée, mais néanmoins utile, du système productif. Sur cette base, les deux approches mettent en œuvre diverses applications permettant l'élaboration de modèles de croissance et l'estimation empirique de divers indicateurs, tels que l'élasticité de substitution entre l'énergie et le capital ou l'élasticité de production de l'énergie. Si les formes fonctionnelles et les méthodes d'estimation diffèrent entre la théorie néoclassique des ressources et la théorie néo-thermodynamique, la logique qui guide ces deux approches est donc similaire. Elle consiste à reléguer au second plan le problème des fondements théoriques de la fonction de production agrégée, pour se concentrer sur les applications théoriques et empiriques auxquelles elle donne lieu. En d'autres termes, ces approches privilégient le registre des manipulations plutôt que le registre de la représentation.

La théorie flux-fonds se situe d'emblée dans une perspective méthodologique radicalement différente, issue de la réflexion plus générale de Georgescu-Roegen sur le rôle des modèles mathématiques en économie. Pour Georgescu-Roegen, les modèles permettent uniquement de clarifier un raisonnement établi au préalable et d'en valider la cohérence logique. Cette perspective l'amène à insister sur le fait qu'un modèle doit nécessairement reposer sur une base conceptuelle solide, qui lui donne prise sur le monde. Il met ainsi l'accent sur le registre de la représentation et il considère en particulier que les fonctions de production agrégées sont dépourvues de fondements conceptuels. La théorie flux-fonds vise à répondre à ce problème en recherchant un équilibre entre réalisme et simplicité, qui aboutit à un modèle désagrégé représentant des processus en interaction. Le registre des manipulations, quant à lui, n'est pas totalement absent de la réflexion méthodologique de Georgescu-Roegen. Néanmoins, il se concentre sur la fonction d'exploration théorique et écarte les méthodes empiriques, en particulier les estimations économétriques. Par ailleurs, même cette conception restrictive des applications auxquelles peuvent donner

lieu des modèles ne transparait pas réellement dans les développements de la théorie flux-fonds, qui restent essentiellement descriptifs.

Les deux frontières méthodologiques mises en évidence dans ce travail permettent donc de caractériser plus précisément les divergences entre les trois théories de la production considérées, en particulier en ce qui concerne la prise en compte de la dimension physique de la production. La frontière liée à l'interdisciplinarité est généralement reconnue comme constitutive de l'identité de l'économie écologique, et ce qui permet de la distinguer de l'approche standard. En ce sens, la contribution de ma thèse consiste principalement à en souligner l'effectivité dans le cadre de la théorie de la production. Au contraire, la frontière méthodologique relative à la modélisation demeure relativement mal identifiée, en économie en générale, et en économie écologique en particulier. Elle n'en est pas moins cruciale, d'autant qu'elle traverse le courant en lui-même, comme l'illustrent les positions antagonistes de la théorie néo-thermodynamique et de la théorie flux-fonds à ce sujet. Les enjeux méthodologiques liés à la modélisation demandent donc à être mieux pris en compte, et cette recherche représente un pas dans cette direction. Elle met en évidence le fait que les principes de construction des modèles ont une influence déterminante sur l'intégration entre les dimensions physique et économique de la production.

Les éléments qui précèdent fournissent une caractérisation méthodologique des différentes théories de la production étudiées dans cette thèse. Ils constituent en quelque sorte le versant *positif* de ce travail, dans la mesure où ils tâchent de cerner plus précisément les fondements de ces différentes approches et ce qui les distingue. Il est néanmoins possible de tirer également des enseignements de nature plus *normative*, c'est-à-dire de formuler un jugement sur les voies dont l'exploration semble la plus prometteuse pour appréhender la dimension physique du processus économique.

De ce point de vue, le formalisme des fonctions de production agrégées semble être dans une double impasse, conceptuelle et empirique. Les difficultés conceptuelles proviennent directement du caractère agrégé, qui, en effaçant l'hétérogénéité au sein de chaque classe de facteurs de production, rompt le lien entre le modèle et notre perception élémentaire du processus de production. Ainsi, les discussions autour des notions de substitution et de progrès technique aboutissent systématiquement à l'idée d'un changement qualitatif au sein d'un ou plusieurs facteurs de production, sans que ce changement qualitatif puisse être représenté explicitement dans le modèle. Ce sont également ces difficultés conceptuelles qui expliquent l'impossibilité de trancher définitivement les débats entre l'approche standard et l'approche thermodynamique, que ce soit dans la controverse Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz ou dans les échanges entre Solow et Ayres au sujet de la théorie néo-thermodynamique. Ces débats achoppent notamment sur le fait de savoir si les variables agrégées sont mesurées en unités physiques ou monétaires, et si des propriétés évidentes au niveau désagrégé peuvent être transposées au niveau agrégé. Ils ressuscitent ainsi le problème fondamental de la valeur et de sa relation avec les facteurs réels de production. Le formalisme des fonctions de production agrégées engendre ainsi une confusion entre les dimensions physique et économique de la production, plutôt que de les articuler en les distinguant. En dernier ressort, ce problème est le produit du

peu de considération accordée au registre de la représentation, à la fois dans la théorie néoclassique des ressources et dans la théorie néo-thermodynamique.

De ce fait, la méthodologie implicite à ces approches tend à placer la légitimité de la fonction de production agrégée dans le registre des manipulations, et notamment dans les applications empiriques auxquelles elle donne lieu. La fonction de production agrégée est alors envisagée comme un instrument de mesure permettant d'évaluer de manière quantitative diverses propriétés du processus économique. Néanmoins, les estimations économétriques de fonctions de production agrégées intégrant l'énergie se révèlent problématiques. Dans le cadre standard, l'estimation indirecte par la fonction de coût entraîne une surdétermination des résultats qui s'apparente à un artifice théorique. Dans la théorie néo-thermodynamique, l'estimation directe de la fonction de production agrégée rencontre des obstacles statistiques liés à la structure des données et au nombre de paramètres employés. Cela laisse penser que les résultats sont d'abord le fruit d'un artifice numérique. Ces problèmes conceptuels et empiriques soulignent ainsi la difficulté à appréhender la dimension physique de la production dans le cadre des fonctions de production agrégées.

Notons par ailleurs que l'importance de ces problèmes semble avoir échappé à la plupart des acteurs de ces débats du fait d'une certaine fragmentation des savoirs au sein de la discipline. Ainsi, Solow et Stiglitz ne discutent pas réellement les résultats des estimations empiriques de fonctions de production agrégées, alors même qu'ils présentent ces méthodes empiriques comme un moyen de résoudre la controverse qui les oppose à la conception thermodynamique de la production. Inversement, Berndt et Wood ne mentionnent pas les modèles théoriques de Solow et Stiglitz, alors que leurs résultats empiriques vont à l'encontre des hypothèses de ces modèles. Cette fragmentation se retrouve au sein même des travaux empiriques. Ayres et Kümmel ne s'intéressent pas réellement à la controverse sur la substituabilité capital-énergie. Son issue souligne pourtant les problèmes posés par l'hypothèse de dualité dans les méthodes d'estimation de fonction de production, faisant écho à leur propre critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Cette situation souligne l'intérêt d'une mise en perspective historique et méthodologique, telle que celle poursuivie dans cette thèse. Une telle perspective permet de prendre du recul sur la construction du savoir économique, et ainsi de mieux en percevoir les fondements et les limites.

Si cette approche amène à souligner l'impasse dans laquelle se trouve la fonction de production agrégée, il importe de s'interroger sur les alternatives possibles à ce formalisme. La principale alternative étudiée ici est celle de la théorie flux-fonds, et plus précisément du modèle flux-fond à processus multiples. Cette approche promeut une représentation strictement désagrégée de la production fondée sur des coefficients purement techniques qui décrivent l'interdépendance entre les différents processus. Dans ce cadre, les dimensions physique et économique de la production peuvent être clairement distinguées l'une de l'autre, et reliées par l'intermédiaire de la structure technique. En particulier, la stricte désagrégation permet d'associer chaque processus de production à un système thermodynamique ouvert, et ainsi d'intégrer les flux de matière et d'énergie, ainsi que les principes de la thermodynamique. La théorie flux-fonds dispose ainsi

d'une certaine transparence conceptuelle, reflet de l'insistance de Georgescu-Roegen sur le registre de la représentation, qui fait défaut à la fonction de production agrégée.

La principale faiblesse de la théorie flux-fonds se situe au contraire dans le registre des manipulations. En particulier, les applications strictement théoriques, telles que la critique de la théorie énergétique de la valeur ou l'étude de la viabilité d'une technologie solaire, demeurent à un stade élémentaire. La question est alors de savoir dans quelle mesure cette situation traduit une limite intrinsèque à la théorie flux-fonds ou relève d'une contingence historique ayant amené peu d'auteurs à s'intéresser à ce problème. Ma réponse, bien que provisoire, pencherait plutôt pour la deuxième explication. On peut notamment remarquer que l'intérêt de Georgescu-Roegen pour les développements analytiques était moins important à la fin de sa carrière, et que le courant de l'économie écologique est également moins préoccupé par ces enjeux. À l'inverse, le modèle flux-fonds de transition énergétique présenté en annexe de cette thèse tend à montrer qu'il est possible d'obtenir des résultats analytiques intéressants dans ce cadre, tout en restant dans la perspective méthodologique élaborée par Georgescu-Roegen.

Une autre question consiste à s'interroger sur la pertinence de ce cadre méthodologique et en particulier sur le peu de place qu'il accorde aux méthodes empiriques. Le tournant vers l'économie appliquée opéré par la discipline depuis les années 1970 a en effet réduit l'importance des contributions purement théoriques et donné toujours plus de place aux approches empiriques. Ainsi, la méthodologie de Georgescu-Roegen apparaît à contre-courant des évolutions récentes de la discipline économique, dans la mesure où elle n'envisage le recours aux modèles qu'à des fins théoriques. Cette position est bien illustrée par les développements de la théorie flux-fonds, dans lesquels aucune considération empirique n'entre en jeu, y compris lorsqu'il est question de problèmes éminemment empiriques tels que la viabilité de l'énergie solaire. Cette perspective se distingue en particulier de la place prépondérante accordée aux données dans l'approche input-output. Pourtant, plutôt que de considérer que ces approches sont antagonistes, il est possible de les envisager comme complémentaires. En effet, elles partagent une conception circulaire et désagrégée de la production fondée sur les coefficients techniques représentant les interactions entre les processus. Par ailleurs, Georgescu-Roegen et Leontief partagent également un point de vue critique à l'égard des méthodes économétriques. De ce fait, les différences entre les modèles flux-fonds et input-output ne proviennent pas de visions fondamentalement différentes de l'économie, mais plutôt d'objectifs méthodologiques différents. Alors que Georgescu-Roegen se concentre sur les enjeux théoriques liés à la dimension physique de la production, Leontief privilégie le développement d'applications empiriques variées. Ces approches sont donc dans une large mesure compatibles et complémentaires.

Plutôt que de considérer la théorie flux-fonds comme une alternative à elle seule à la fonction de production agrégée, il conviendrait donc de l'insérer dans un ensemble plus vaste de représentations circulaires et désagrégées de la production. Outre l'approche input-output de Leontief, cet ensemble inclurait notamment le modèle de Sraffa. À nouveau, ce modèle partage un socle théorique commun avec le modèle flux-fonds. Ses différences proviennent principalement du fait qu'il est construit pour étudier en priorité

la question de la répartition du surplus, alors que ce sujet n'est que secondaire dans l'analyse de Georgescu-Roegen. Dans l'ensemble, ces modèles sont donc plutôt complémentaires et peuvent cohabiter dans un cadre théorique élargi, donnant lieu à une forme de pluralisme des modèles. Ils offrent collectivement une perspective alternative à la fonction de production agrégée privilégiée dans l'approche standard. Cette combinaison d'unité et de complémentarité entre ces modèles désagrégés est néanmoins demeurée en partie invisible du fait d'une fragmentation similaire à celle constatée dans l'approche agrégée. En particulier, il existe peu de références croisées dans les travaux de Georgescu-Roegen, Leontief et Sraffa. Les raisons de cette fragmentation restent à élucider, mais elle ne traduit pas une incompatibilité fondamentale entre ces diverses approches. Il importe au contraire d'en développer les potentialités de manière conjointe, notamment en ce qui concerne l'analyse des enjeux environnementaux.

Prolongements possibles

Afin de poursuivre la réflexion entamée dans cette thèse autour de l'intégration de la dimension physique de la production dans la théorie économique de la production, trois voies pourraient être explorées. Le premier prolongement possible concerne la prise en compte des chocs énergétiques en macroéconomie. Le chapitre 3 a rappelé que les chocs pétroliers des années 1970 ont été l'un des principaux facteurs ayant suscité un intérêt accru pour l'énergie en économie. L'estimation de la substituabilité entre le capital et l'énergie à l'aide d'une fonction de production agrégée ne constitue que l'une des nombreuses manières d'aborder cette question. Dans son adresse présidentielle au congrès de l'American Economic Association (AEA), Lawrence Klein (1978) appelait de manière plus générale à modéliser de façon plus poussée le secteur productif, et en particulier le secteur énergétique. Cette perspective s'insère dans les grands débats qui agitent la macroéconomie à cette époque, notamment en ce qui concerne la « stagflation ». La combinaison d'une stagnation de la production et d'une forte inflation est très marquée dans la plupart des pays industrialisés dans les années 1970. Ce phénomène est au cœur de la controverse qui oppose la « nouvelle économie classique » et un groupe divers d'économistes « keynésiens » (Goutsmedt *et al.*, 2019). D'un côté, la « critique de Lucas » considère que l'incapacité des modèles macroéconométriques keynésiens à expliquer la stagflation est due à l'absence de prise en compte des changements comportementaux induits par les politiques macroéconomiques. De l'autre, les économistes keynésiens contestent la pertinence empirique de cette critique et proposent d'autres mécanismes pour expliquer la stagflation. Cela le amènent à comparer différentes sources possibles de la stagflation, telles que les changements de politiques monétaire et fiscale ou l'augmentation des prix agricoles et énergétiques. Ils concluent que la prise en compte du choc pétrolier de 1973 permet de mieux reproduire le phénomène de stagflation dans les modèles macroéconométriques (Eckstein, 1978).

Le rôle des chocs énergétiques dans l'explication des perturbations macroéconomiques reste central au moins jusqu'au milieu des années 1980, notamment du fait du second choc pétrolier. Le principal débat porte sur la mesure de l'impact réel qu'ont eu les chocs

énergétiques successifs sur la croissance. En mobilisant divers cadres théoriques et outils empiriques, les économistes qui s'intéressent à cette question obtiennent des résultats divergents. Certains travaux concluent que l'effet des chocs pétroliers n'a pas été très important en mobilisant le cadre de la nouvelle économie classique (Darby, 1982) ou des modèles auto-régressifs vectoriels (« *Vector auto-regressive* » ou VAR) (Burbidge et Harrison, 1984). Au contraire, d'autres travaux suggèrent que les chocs pétroliers ont eu un effet majeur en modélisant les ajustements dynamiques liés aux inputs importés (Bruno et Sachs, 1982) ou en réalisant des tests de causalité entre le prix du pétrole et les principales variables macroéconomiques (Hamilton, 1983). Ils concluent ainsi à la nécessité de mieux combiner l'analyse en termes de contrainte sur l'offre et l'approche keynésienne par la demande pour expliquer les perturbations macroéconomiques. De manière générale, dans les années 1980, les explications dominantes du phénomène de stagflation sont liées à des chocs sur l'énergie ou la productivité (Goutsmedt, 2020). Ce n'est qu'à la fin des années 1990 que s'impose l'explication de la stagflation liée aux politiques monétaires. S'intéresser aux travaux sur les effets macroéconomiques des chocs pétroliers permettrait donc d'améliorer la compréhension des transformations de la macroéconomie durant cette période. Il s'agit de comprendre comment le programme de recherche visant à mieux prendre en compte les chocs énergétiques dans les modèles macroéconomiques a évolué et s'est confronté à la montée en puissance de la nouvelle économie classique.

Un deuxième prolongement possible concerne la manière dont la dimension physique de la production a été introduite dans l'analyse input-output. L'une des premières contributions importantes à cet égard est celle d'Ayres et Kneese (1969). À l'aide d'un modèle multisectoriel linéaire, ils remettent en question l'idée sous-jacente au concept d'externalité selon laquelle le rejet d'éléments nocifs dans l'environnement serait simplement un effet contingent du processus économique. Pour cela, Ayres et Kneese introduisent dans leur modèle les ressources prélevées dans l'environnement et les rejets, et ils appliquent le principe de conservation de la matière pour montrer que ces deux facettes sont étroitement liées l'une à l'autre. Ils souhaitent ainsi démontrer le caractère inévitable de la pollution et sa corrélation avec la consommation de ressources, bien que les choix technologiques et l'organisation sociale influencent cette corrélation. De manière apparemment indépendante, Leontief (1970) lui-même propose également d'introduire les rejets polluants dans son modèle. À la différence d'Ayres et Kneese, il n'utilise pas le principe de conservation de la matière pour relier ces rejets aux ressources en entrée. Leontief considère simplement les rejets comme un co-produit de chaque processus, dont le flux est proportionnel à la taille du processus, comme pour les autres éléments. C'est donc principalement la question des pollutions qui fait initialement l'objet d'un traitement dans le cadre input-output.

À la suite du premier choc pétrolier, l'analyse input-output est également appliquée aux questions énergétiques. Les travaux en question sont principalement menés par des ingénieurs et des chercheurs issus des sciences naturelles (physiciens, écologues, etc.). Ils visent à déterminer le coût énergétique global associé à la production de biens et services, pour informer les décisions en matière de choix technologiques et faciliter la réduction

de la consommation d'énergie. Cependant, ces calculs de coût énergétique sont fondés sur des hypothèses assez variables qui aboutissent à des résultats disparates (Chapman, 1974; Wright, 1974; Bullard et Herendeen, 1975). Il est donc nécessaire de clarifier les objectifs poursuivis par chaque méthode pour pouvoir en interpréter les résultats et s'en servir dans la mise en œuvre de politiques publiques. L'ambition de contribuer à la prise de décision publique est ainsi très présente dans les approches input-output appliquées à l'énergie. L'analyse énergétique est considérée par certains auteurs comme un critère plus pertinent que l'évaluation monétaire (Gilliland, 1975). Cette perspective est néanmoins contestée par ceux qui considèrent que l'analyse énergétique offre une vision trop étroite pour servir de base à la prise de décision (Huettner, 1976). Alors que les travaux étudiés dans cette thèse se situent principalement dans une perspective théorique, l'analyse énergétique input-output se positionne donc d'emblée dans une perspective d'aide à la décision en matière de politiques publiques. Elle introduit ainsi une dimension méthodologique cruciale, à savoir celle de l'expertise. Il serait intéressant d'en examiner les conséquences théoriques et empiriques, et ainsi de mieux saisir la manière dont l'approche input-output appréhende la dimension physique de la production.

Le troisième prolongement envisageable soulève de la même manière la question de l'expertise empirique fondée sur des outils de modélisation. Il s'agit d'interroger la façon dont la dimension physique de la production est prise en compte dans les modèles intégrés énergie-économie-environnement (« *Integrated Assessment Models* » ou IAM), qui servent notamment de base aux travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ces modèles ont clairement une fonction d'expertise, puisqu'ils ont pour finalité d'éclairer les décideurs publics internationaux en matière de politiques de lutte contre le réchauffement climatique. Parmi ces modèles, les plus influents sont certainement le modèle DICE de Nordhaus (1993) et le modèle MERGE de Manne *et al.* (1995). Par ailleurs, les parcours de Nordhaus et de Manne illustrent la proximité entre cette tradition des IAM et les enjeux abordés dans cette thèse. Nordhaus participe ainsi à plusieurs reprises au débat sur les limites à la croissance en adoptant le cadre de la théorie néoclassique de la production (Nordhaus et Tobin, 1972; Nordhaus, 1973, 1992). Manne cherche quant à lui à développer une analyse du système énergétique qui s'inscrit dans la tradition de la programmation linéaire et à combiner celle-ci avec des modèles macroéconomiques (Manne, 1976; Manne et Wene, 1992). Tous deux ont par ailleurs des liens avec des institutions telles que la Cowles Commission et la RAND Corporation. Ainsi, ils sont en contact étroit avec les évolutions des pratiques de modélisation au sein de la discipline économique.

Il importerait donc d'étudier la manière dont la communauté de modélisateurs réunis autour des IAM se situe par rapport à la question de l'intégration de la dimension physique de la production. Traditionnellement, les divergences au sein de cette communauté ont été appréhendées à travers l'opposition entre les approches dites « *top-down* » des économistes, à partir de fonctions de production agrégées, et les approches dites « *bottom-up* » des ingénieurs, fondées sur une représentation plus explicite des technologies (Lefèvre, 2016). L'ambition de dépasser cette dichotomie méthodologique a néanmoins donné lieu à des tentatives d'« hybridation » entre les deux perspectives. Celles-ci passent no-

tamment par la construction d'un cadre cohérent de représentation duale, en valeur et en énergie, et la prise en compte des dégradations entropiques, via la distinction entre énergie primaire, énergie finale et services énergétiques. Il y a donc une proximité évidente avec les travaux étudiés ici, bien que les références croisées entre les deux littératures restent peu nombreuses. L'étude des pratiques de modélisation de la production au sein des IAM permettrait ainsi d'approfondir et de compléter l'analyse entreprise dans cette thèse.

Annexes

Annexe A

Introduction à la thermodynamique

La thermodynamique peut être définie au sens large comme la science des transformations de l'énergie. Ses fondements théoriques reposent sur un ensemble de principes, dont deux sont particulièrement importants iciⁱ. Le premier principe porte sur la conservation de l'énergie. Il est formulé dans le courant des années 1840, sur la base de travaux menés indépendamment par plusieurs scientifiques d'Europe occidentale, tels que Julius von Mayer, James Joule, Ludwig Colding et Hermann von Helmholtz. C'est la raison pour laquelle, Kuhn (1959) considère que le concept d'énergie et le principe de conservation associé constituent une forme de découverte « simultanée ». Dans ce cadre, la conservation de l'énergie est en quelque sorte tautologique, dans la mesure où elle découle de la construction même du concept d'énergie. L'essence même de ce concept est de fournir une mesure commune à divers phénomènes physiques tels que la chaleur, le mouvement, la lumière, l'électricité, les liaisons chimiques, etc. Pour cela, une série d'équivalences quantitatives entre ces différents phénomènes ont été établies expérimentalement, en étudiant des cas de transformation d'un phénomène en un autre. Une fois ces équivalences déterminées, le concept d'énergie fournit un cadre commun pour penser ces différents phénomènes, en les considérant comme diverses *formes* d'énergie : thermique, mécanique, électromagnétique, électrique, chimique, etc. Par construction même, pour toute transformation d'une forme d'énergie en une autre, la *quantité* d'énergie est conservée.

Sur cette base, la thermodynamique distingue trois types de systèmes physiques. Un système est dit *isolé* s'il n'échange ni matière ni énergie avec son environnement. S'il échange uniquement de l'énergie, il s'agit d'un système *clos*. Et pour finir, s'il échange de l'énergie et de la matière, le système est dit *ouvert*. Le premier principe de la thermodynamique peut alors être reformulé de la manière suivante : l'énergie totale d'un système isolé est conservée. En effet, d'après ce qui précède, les transformations internes au système conservent nécessairement la quantité d'énergie. S'il n'y a pas d'échange avec l'environnement, la quantité totale d'énergie présente dans le système est donc conservée.

Le deuxième principe de la thermodynamique montre cependant que toutes les transformations qui conservent la quantité d'énergie ne sont pas nécessairement possibles. Les origines de ce principe remontent aux travaux de Sadi Carnot (1824) sur les machines à vapeur, avant même l'apparition du concept d'énergie. Il sera ensuite reformulé par Rudolf Clausius (1867) dans ce nouveau cadre. Ces travaux visent d'abord à fournir une compréhension théorique du fonctionnement des machines à vapeur, afin d'en déduire les conditions permettant d'obtenir le maximum de travail mécanique. Dans ce cadre, on appelle machine *thermique* un système composé d'une source de chaleur à la température T_1 , d'un puits de chaleur à la température $T_2 < T_1$, et d'un corps intermédiaire. Son fonctionnement repose d'abord sur la transmission d'une chaleur Q_1 de la source au corps intermédiaire. Ce dernier subit alors une série de transformations qui permettent

i. Voir par exemple Callen (1985) pour une présentation plus complète.

de produire un travail mécanique W et de restituer le reste d'énergie sous la forme d'un flux de chaleur Q_2 vers le puits. Ainsi, dans une machine à vapeur, la source de chaleur est fournie par le charbon, l'eau sert de corps intermédiaire, et le puits de chaleur est l'atmosphère environnante.

Pour déterminer le travail maximum qu'il est possible d'obtenir d'une machine thermique, une machine idéale est construite de manière purement abstraite, sous la forme d'une « expérience de pensée » (Locqueneux, 2009, 29). Dans cette machine idéale, tous les transferts de chaleur s'effectuent à température égale entre le corps intermédiaire, d'une part, et la source ou le puits de chaleur, d'autre part. Cette machine idéale fonctionne selon le cycle suivant du corps intermédiaire : une dilatation isotherme (à température fixe) 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. De ce fait, l'ensemble des transformations sont dites *réversibles* et il est théoriquement possible de faire fonctionner le processus en sens inverse.

De cette dernière propriété découle le fait que cette machine idéale fournit le maximum de travail mécanique possible. Pour le voir, supposons qu'il existe une autre machine dont les corps extrêmes auraient la même température, mais qui aurait un rendement supérieur. L'énergie mécanique produite par cette machine pourrait être utilisée pour faire fonctionner la machine idéale ci-dessus en sens inverse. Cela aboutirait à une situation globale dans laquelle le seul échange net serait un flux de chaleur du corps le plus froid vers le corps le plus chaud. À ce résultat, la thermodynamique oppose un postulat fondamental : « La chaleur ne peut jamais passer d'un corps froid à un corps chaud sans qu'une transformation autre, liée à celle-ci, ait lieu en même temps. » (Clausius, 1867, 117). Ce postulat constitue une première formulation du second principe de la thermodynamique, dans sa forme la plus élémentaire. Il en découle que le rendement de la machine idéale est donc bien maximum.

Par ailleurs, par un raisonnement similaire, il est possible de montrer que ce rendement est indépendant de la substance utilisée en guise de corps intermédiaire. Il ne dépend donc que des températures des corps chaud et froid. En s'intéressant au cas d'un gaz parfait, on établit alors que ce rendement maximal η_{max} , également appelé « coefficient de Carnot », est donné par :

$$\eta_{max} = \frac{W_{max}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (\text{A.0.1})$$

Ce résultat a des conséquences importantes quant aux rapports qu'entretiennent les différentes formes d'énergie entre elles. Tout d'abord, il indique que seule une fraction d'une quantité donnée d'énergie thermique peut être transformée en énergie mécanique. Plus précisément, cette propriété ne s'applique qu'aux processus cycliques fermés, dans lesquels le corps intermédiaire revient à son état initial à la fin du cycle. Si l'on arrête le cycle idéal présenté plus haut après la première dilatation isotherme, alors toute la chaleur a été transformée en travail mécanique. Cependant, seuls les processus cycliques sont utiles en pratique, du fait de limitations quant aux dimensions de la machine thermique. À l'inverse, la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique n'est pas

limitée de la sorte. Il y a donc en quelque sorte une hiérarchie entre ces deux formes d'énergie, qui se traduit par l'idée que l'énergie mécanique est de qualité supérieure à l'énergie thermique.

Par ailleurs, dans un environnement donné, la part de l'énergie thermique qui peut être transformée en énergie mécanique dépend de la température du corps qui émet la première. De ce fait, il existe un gradient de qualité de l'énergie thermique qui diminue avec la température du corps en question. Il est alors possible d'introduire les autres formes d'énergie dans cette échelle de qualité. Celles pour lesquelles il existe un dispositif pouvant *théoriquement* les transformer intégralement en énergie mécanique se situent au sommet. C'est notamment le cas de l'énergie électrique. D'autres, telles que l'énergie électromagnétique, se répartissent le long de l'échelle en fonction de la température du corps qui les émet. Par construction même de cette échelle, seules les transformations allant dans le sens d'une *dégradation* de la qualité de l'énergie peuvent être réalisées, qu'il s'agisse de processus naturels ou de transformations suscitées par l'action humaine. Cette notion de dégradation qualitative fournit ainsi une deuxième formulation du second principe. Elle inclut de manière évidente le fait que la chaleur ne peut passer d'elle-même que d'un corps chaud à un corps froid.

La thermodynamique a donné une forme plus abstraite et générale à ce second principe à l'aide du concept d'*entropie*. Pour comprendre l'origine de ce concept, il faut revenir à la formule du coefficient de Carnot (A.0.1). Celle-ci peut être réécrite en comptabilisant les flux de chaleur de manière algébrique par rapport au corps intermédiaire. Le flux qui entre dans ce dernier est compté positivement, $Q_1 > 0$. Tandis que le flux qui en sort est compté négativement, $Q_2 < 0$. On obtient alors :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (\text{A.0.2})$$

Cette formule peut ensuite être généralisée à n'importe quel cycle réversible fermé, c'est-à-dire un cycle dans lequel le corps intermédiaire revient à son état initial, tel qu'il est défini par sa température et son volume de départ. Si l'on considère pour commencer une succession de n échanges de chaleur Q_i à une température T_i , alors on a :

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0 \quad (\text{A.0.3})$$

En considérant des quantités infinitésimales de chaleur transférées dQ à chaque instant du cycle, on obtient :

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (\text{A.0.4})$$

Dans cette formule, l'intégrale est réalisée sur l'ensemble du cycle. Cette relation implique que la forme différentielle $\frac{dQ}{T}$ est *fermée*. D'après le lemme de Poincaré, il en découle qu'elle est également *exacte*. C'est-à-dire qu'il existe une fonction S , dépendante de la température et du volume du corps intermédiaire, telle que $dS = \frac{dQ}{T}$. S est une fonction d'état qui ne dépend que de l'état du corps intermédiaire et non du chemin parcouru pour parvenir à cet état.

Pour voir en quoi elle permet de généraliser la formulation du second principe, il convient de revenir au phénomène de transmission d'une chaleur $Q > 0$ d'un corps chaud, à la température T_1 , à un corps froid, à la température $T_2 < T_1$. Si l'on considère ces deux corps comme un système unique, alors ce système est isolé et son entropie est simplement la somme des entropies des deux corps. Pour le corps chaud, la variation d'entropie est égale à $-\frac{Q}{T_1}$, tandis que pour le corps froid elle est égale à $\frac{Q}{T_2}$. Par conséquent pour le système dans son ensemble :

$$\Delta S = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) > 0 \quad (\text{A.0.5})$$

Le sens naturel de transfert de la chaleur correspond donc à une augmentation de l'entropie du système isolé constitué des deux corps en question. À l'inverse, si l'entropie du système diminue, d'après la formule qui précède, cela signifierait que la chaleur est passée du corps froid au corps chaud, ce que le postulat fondamental de la thermodynamique interdit. Sur cette base, le second principe de la thermodynamique est reformulé et généralisé sous la forme suivante : l'entropie d'un système isolé augmente jusqu'à un maximum. Pour cette raison, il est aussi connu sous le nom de loi de l'entropie. L'état final vers lequel tend le système est également appelé *équilibre thermodynamique*.

Pris conjointement, les deux principes de la thermodynamique présentés ici fournissent une clef de lecture de nombreux processus naturels et industriels. Ils ont une portée *pratique*, dans la mesure où ils permettent d'analyser et d'optimiser des dispositifs de conversion de l'énergie, tels que les machines à vapeur. Mais ils ont également une signification *cosmologique* relative à l'évolution de l'Univers dans son ensemble. L'Univers est en effet un système isolé au sens le plus strict du terme, là où d'autres systèmes ne sont isolés que par approximation. Pour cette raison, Clausius conclut l'article dans lequel il introduit le concept d'entropie en reformulant les principes de la thermodynamique de la manière suivante : « 1. L'énergie de l'Univers est constante. 2. L'entropie de l'Univers tend vers un maximum. » (Clausius, 1867, 193). Il est donc important d'avoir conscience de cette double signification, pratique et cosmologique, associée aux principes de la thermodynamiqueⁱⁱ.

Pour comprendre l'importance de ces résultats et la manière dont ils ont affecté la physique au 19^e siècle, il est utile d'en distinguer deux interprétations. La première est associée au physicien et philosophe Ernst Mach, et elle peut être qualifiée de *phénoméniste*ⁱⁱⁱ. De manière générale, la conception phénoméniste de la science peut être résumée par l'idée que « 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). En particulier, les sensations doivent être le point de départ de la démarche scientifique. La formulation de catégories et de principes abstraits ne vient que dans un second temps, afin de donner

ii. De manière plus générale, cette double signification est présente dans de nombreux domaines de la physique. Par exemple, les lois de la mécanique s'appliquent tout autant aux mouvements des planètes qu'à un ballon de basket-ball.

iii. Cette approche est aussi parfois désignée par les termes de phénoménaliste ou de phénoménologique, au risque d'une confusion avec la doctrine philosophique fondée par Edmund Husserl.

une portée plus générale aux observations. De ce fait, le phénoménisme invite à ne pas aller « au-delà de l'expérience », et il critique le recours à des entités abstraites qui en soient trop éloignées (Soler, 2000, 122).

Dans cette perspective, Mach envisage la thermodynamique comme un processus progressif d'abstraction fondé sur un ensemble de sensations liées au volume, à la température, et à la chaleur. Elle repose fondamentalement sur le constat que la chaleur passe toujours d'elle-même du corps chaud au corps froid, dont elle cherche à tirer des conséquences plus générales. Cette interprétation se passe donc de toute référence à une structure moléculaire de la matière, et aux lois de la mécanique qui sont censées gouverner le mouvement des particules matérielles.

Une autre interprétation de la thermodynamique a au contraire cherché à en fonder les principes sur cette structure moléculaire et sur les lois de la mécanique. Cette démarche est notamment initiée par le physicien Ludwig Boltzmann, qui s'appuie sur une conception probabiliste des vitesses des différentes particules d'un gaz et formulent diverses hypothèses sur les impacts des particules entre elles. Il parvient ainsi à identifier une fonction H qui décroît au cours du temps et qui jouerait selon lui le même rôle que l'entropie, mais dans le sens inverse (Locqueneux, 2009, 284). Ce résultat, connu sous le nom de « théorème H », va cependant rapidement soulever un certain nombre de problèmes.

Le plus important réside dans la contradiction entre le caractère réversible des systèmes mécaniques et les évolutions irréversibles de la thermodynamique. Cette opposition tient d'abord aux phénomènes en question eux-mêmes. Si l'on filme le jet d'un projectile et que l'on passe le film à l'envers, le mouvement obtenu sera tout à fait cohérent avec les principes de la mécanique. Le phénomène est dit 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.

Cette opposition transparait également dans les équations de la mécanique et de la thermodynamique. Par exemple, pour un corps soumis uniquement à la pesanteur, la seconde loi de Newton est donnée par $x''(t) = mg$, où $x(t)$ est le vecteur des coordonnées à un instant t . En posant $y(t) = x(t_0 - t)$, y représente bien la trajectoire parcourue dans le sens inverse. Or, en dérivant deux fois cette relation, on trouve que $y''(t) = x''(t_0 - t) = mg$, ce qui signifie que cette trajectoire est conforme aux lois de la mécanique. À l'inverse, pour un système isolé d'entropie S_0 , la loi de l'entropie indique que, pour $t_1 > t_0$, $S_0(t_1) > S_0(t_0)$. Si le temps est renversé, les valeurs de l'entropie S_1 du système « renversé » seraient telles que $S_1(t_1) < S_1(t_0)$, si $t_1 > t_0$. Une telle évolution n'est donc pas cohérente avec la loi de l'entropie.

Ces propriétés questionnent la pertinence de la théorie de Boltzmann. En effet, si l'on inverse le mouvement des particules dans le gaz, l'évolution du système sera vraisemblable du point de vue de la mécanique. Mais la fonction H quant à elle devrait croître, contrairement à ce que le résultat de Boltzmann prévoit (Locqueneux, 2009, 282). Autrement dit, il est impossible de déduire logiquement une loi irréversible en partant de lois réversibles. Cette critique va amener Boltzmann à réviser son interprétation de la thermodynamique en abandonnant la conception mécaniste, et en se fondant uniquement

sur une vision probabiliste. Au début du 20^e siècle, Willard Gibbs prolongera les travaux de Boltzmann et donnera à cette approche le nom de « mécanique statistique ».

Annexe B

Les fonctions de production

B.1 Théorie néoclassique de la production

B.1.1 Définition et hypothèses standards de la fonction de production

On appelle fonction de production une relation de la forme suivante :

$$Y = F(X_1, \dots, X_n) = F(X) \quad (\text{B.1.1})$$

Dans cette relation, les variables $X_1, \dots, X_n \geq 0$ représentent les quantités des n facteurs de production, et elles sont rassemblées dans le vecteur X . La quantité de bien final produite est donnée par $Y \geq 0$. La fonction F est donc une fonction de $(\mathbb{R}^+)^n$ à valeur dans \mathbb{R}^+ . En général, il est fait l'hypothèse que F est deux fois différentiable et que sa différentielle seconde est continue, de sorte que $F \in \mathcal{C}^2((\mathbb{R}^+)^n, \mathbb{R}^+)$. Cela permet notamment d'exprimer les conditions du premier et du second ordres lorsque F est utilisée dans un problème d'optimisation.

En microéconomie, les fonctions de production interviennent notamment dans l'étude du comportement des producteurs. Si l'on suppose qu'un producteur dispose d'une fonction de production comme celle ci-dessus, et qu'il fait face à des prix p_Y, p_1, \dots, p_n pour les biens associées à Y, X_1, \dots, X_n , alors sa fonction de profit est :

$$\Pi(X_1, \dots, X_n) = p_Y Y - \sum_{i=1}^n p_i X_i = p_Y F(X_1, \dots, X_n) - \sum_{i=1}^n p_i X_i \quad (\text{B.1.2})$$

L'économie est dite en situation concurrentielle si les prix sont indépendants du comportement du producteur. Pour maximiser le profit, il faut alors que les conditions du premier ordre suivantes soient satisfaites par la combinaison optimale X^* :

$$\forall i = 1, \dots, n, \frac{\partial F}{\partial X_i}(X^*) = \frac{p_i}{p_Y} \quad (\text{B.1.3})$$

Ainsi, la productivité marginale de chaque facteur doit être égale à son prix relatif par rapport au bien produit. C'est ce que l'on nomme *l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale*. Par extrapolation, davantage que par une démonstration rigoureuse, il est supposé qu'une fonction de production agrégée utilisée en macroéconomie vérifie également cette hypothèse si l'économie fonctionne de manière concurrentielle^{iv}. Ainsi, les productivités marginales du capital agrégé K et du travail agrégé L sont supposées égales au taux d'intérêt réel et au taux de salaire réel.

iv. Voir par exemple la manière dont Mankiw (2010, 53-55) passe de la situation d'une firme qui maximise son profit à l'économie toute entière.

Cette règle de distribution impose cependant certaines contraintes au niveau macroéconomique. Il faut en effet que la somme des revenus des différents facteurs épuise le produit total, car l'existence d'un bénéfice résiduel ne fait pas sens au niveau macroéconomique. Si tous les revenus sont exprimés en termes réels, on a $p_Y = 1$. En notant $dF(X)$ la différentielle de F en X , on a alors :

$$Y = \sum_{i=1}^n p_i X_i^* \Leftrightarrow F(X^*) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial X_i}(X^*) X_i^* = dF(X^*)(X^*) \quad (\text{B.1.4})$$

Cette contrainte a notamment des implications en ce qui concerne les rendements d'échelle. Si l'on souhaite que toutes les combinaisons de facteurs de production puissent *a priori* être une combinaison optimale pour un ensemble de prix donné, alors la relation ci-dessus doit être vérifiée pour tout X dans $(\mathbb{R}^+)^n$. Le théorème d'Euler pour les fonctions de plusieurs variables nous dit alors qu'il est nécessaire et suffisant que la fonction F soit linéairement homogène, c'est-à-dire que ses rendements d'échelle soient constants^v :

$$\forall X \in (\mathbb{R}^+)^n, \forall \lambda > 0, F(\lambda X) = \lambda F(X) \quad (\text{B.1.5})$$

C'est la raison pour laquelle, en macroéconomie, il est généralement fait l'hypothèse que la fonction de production a des rendements constants. Une autre hypothèse standard consiste à considérer que la productivité marginale de chaque facteur est positive, mais décroît lorsque le facteur en question augmente. Cette hypothèse traduit l'idée que, lorsque l'on augmente un seul facteur, on augmente le niveau de production, mais de manière de moins en moins importante^{vi}. Elle se traduit par une condition nécessaire et suffisante sur les dérivées partielles de la fonction F :

$$\forall X \in (\mathbb{R}^+)^n, \forall i = 1, \dots, n, \frac{\partial F}{\partial X_i}(X) > 0, \frac{\partial^2 F}{\partial X_i^2}(X) < 0 \quad (\text{B.1.6})$$

Enfin, il est également possible d'inclure dans la fonction de production un effet lié au *progrès technique*. En général, ce progrès technique est supposé *non incorporé*, c'est-à-dire qu'il s'applique uniformément à tous les biens d'équipements, et pas uniquement à ceux qui sont produits à partir d'une certaine génération. Formellement, cela est pris en compte par l'introduction du temps t dans la fonction de production. Le progrès technique désigne donc les variations de la production attribuées à cette variable, et non aux variations des facteurs de production. On a alors :

$$Y = F(X_1, \dots, X_n, t) = F(X, t) \quad (\text{B.1.7})$$

La plupart du temps, il est fait l'hypothèse que le progrès technique est *neutre au sens de Hicks*. Cela signifie qu'il laisse inchangé le rapport entre les productivités marginales

v. Si la fonction n'a pas globalement des rendements constants, alors il est toujours possible que l'équation (B.1.4) soit vérifiée en certains points. Une condition suffisante pour cela est que la fonction ait localement des rendements constants, c'est-à-dire qu'il existe $a, b > 0$, tels que $a < 1 < b$ et pour tout $t \in [a, b]$, $F(tX^*) = tF(X^*)$. Cette condition n'est cependant plus nécessaire.

vi. À nouveau, l'hypothèse de productivité marginale décroissante est présentée comme l'extrapolation d'une situation microéconomique. Voir par exemple Mankiw (2010, 52).

de deux facteurs de production. Il en découle l'existence d'une fonction A de t et d'une fonction F de X , telles que :

$$Y = A(t)F(X) \quad (\text{B.1.8})$$

Ces différentes hypothèses constituent les éléments de base de la théorie néoclassique de la production dans sa version agrégée. Elles peuvent être modifiées en fonction des situations, par exemple en introduisant des formes plus complexes de progrès technique. Mais dans l'ensemble, la plupart des travaux ayant recours à des fonctions de production agrégées utilisent ces hypothèses standards.

B.1.2 Fonction de coût duale

Il est également possible d'associer à une fonction de production une fonction de coût dite *duale*. Cette démarche repose plus ou moins sur la même approche que celle justifiant l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Elle part ainsi de prix donnés pour les facteurs de production $p_1, \dots, p_n \geq 0$, rassemblés dans le vecteur p . Pour un certain niveau de production $Y \geq 0$, on suppose que la combinaison la moins coûteuse des facteurs de production est choisie parmi l'ensemble de celles qui permettent de produire Y . Les hypothèses (B.1.6) sur la fonction de production garantissent qu'il existe une fonction G de Y et p , qui donne le coût minimal de production C^{vii} :

$$C = G(Y, p_1, \dots, p_n) = G(Y, p) \quad (\text{B.1.9})$$

Les hypothèses faites ci-dessus sur la fonction de production garantissent que cette fonction de coût prend des valeurs positives, qu'elle est deux fois différentiable et que sa différentielle seconde est continue, soit $G \in \mathcal{C}^2((\mathbb{R}^+)^{n+1}, \mathbb{R}^+)$. La fonction G est également croissante et linéairement homogène par rapport à Y , et elle est croissante, concave et linéairement homogène par rapport aux prix des facteurs de production. On a donc :

$$\forall (Y, p) \in (\mathbb{R}^+)^{n+1}, \frac{\partial G}{\partial Y}(Y, p) > 0, \forall i = 1, \dots, n, \frac{\partial G}{\partial p_i}(Y, p) > 0, \frac{\partial^2 G}{\partial p_i^2}(Y, p) < 0, \quad (\text{B.1.10})$$

$$\forall \lambda, \mu > 0, G(\lambda Y, \mu p) = \lambda \mu G(Y, p)$$

Implicitement, la fonction de coût intègre l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. La combinaison de facteurs de production qui minimise le coût de production est précisément celle pour laquelle les productivités marginales sont égales aux prix, à un coefficient de proportionnalité près. Inversement, le lemme de Shephard établit que la dérivée partielle de la fonction de coût par rapport au prix d'un facteur donne la quantité du facteur en question dans la combinaison optimale :

$$\forall i = 1, \dots, n, \frac{\partial G}{\partial p_i}(Y, p) = X_i^*(Y, p) \quad (\text{B.1.11})$$

Ce résultat permet donc de revenir de la fonction de coût aux quantités des facteurs de production. Ainsi, la fonction de coût intègre l'intégralité des informations sur le

vii. Il existe différentes preuves de l'existence de cette fonction de coût duale, notamment par Shephard (1953) et Uzawa (1964). Voir Fuss (2017) pour un aperçu synthétique.

processus de production. Dans le cadre néoclassique, il est donc équivalent de se donner une fonction de production ou une fonction de coût pour étudier un secteur donné, ou l'économie dans son ensemble.

Notons pour finir que si la fonction de production intègre un effet lié au progrès technique, et que celui-ci est supposé non incorporé, alors le temps t devra également apparaître dans la fonction de coût.

$$C = G(Y, p, t) \quad (\text{B.1.12})$$

Par ailleurs, si le progrès technique est neutre au sens de Hicks et qu'il est représenté par une fonction A de t , alors le coût s'exprime sous la forme :

$$C = \frac{G(Y, p)}{A(t)} \quad (\text{B.1.13})$$

B.1.3 Élasticités de production et comptabilité de la croissance

Différents indicateurs sont définis afin de caractériser la fonction de production. Ils peuvent également être exprimés à l'aide de la fonction de coût. Ces indicateurs sont en général définis sous la forme d'*élasticités*, c'est-à-dire de rapports entre les taux de variation de deux variables. Ils fournissent ainsi une approximation de la variation en pourcentage de la variable se trouvant au numérateur, lorsque celle qui se trouve au dénominateur varie de 1 %. Mathématiquement, un taux de variation correspond à la dérivée du logarithme de la variable en question. C'est donc sous cette forme que l'on définit en général ces élasticités. On peut ensuite les exprimer à l'aide de la fonction de production et de ses dérivées partielles. Pour simplifier les expressions, on note à partir de maintenant F_i la dérivée partielle par rapport au facteur i et F_{ij} la dérivée partielle seconde par rapport aux facteurs i et j . La variable X n'est par ailleurs plus mentionnée de manière explicite dans les formules.

Pour commencer, on définit l'*élasticité de production* d'un facteur comme le rapport entre le taux de variation de la production et le taux de variation du facteur en question. Cette élasticité est donc censée mesurer l'effet sur la production d'une variation du facteur considéré lorsque les quantités des autres facteurs restent inchangées. Formellement, l'élasticité de production ϵ_i du facteur i s'exprime sous la forme :

$$\epsilon_i = \frac{\partial \ln(F)}{\partial \ln(X_i)} = \frac{X_i F_i}{F} \quad (\text{B.1.14})$$

En utilisant l'expression de la différentielle de F comme combinaison des formes linéaires élémentaires dX_i , on peut alors exprimer cette relation en fonction des élasticités :

$$dF = \sum_{i=1}^n F_i dX_i \Leftrightarrow \frac{dF}{F} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \frac{dX_i}{X_i} \quad (\text{B.1.15})$$

Cette expression permet ainsi de décomposer le taux de variation de la production en fonction des taux de variation des différents facteurs de production. Si l'on suppose

que la production et les facteurs sont donnés par des fonctions dérivables du temps $Y(t)$ et $X(t)$, telles que $Y(t) = F(X(t))$, on obtient alors :

$$\frac{\dot{Y}(t)}{Y(t)} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \frac{\dot{X}_i(t)}{X_i(t)} \Leftrightarrow g_Y(t) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i g_{X_i}(t) \quad (\text{B.1.16})$$

Dans la dernière équation, $g_Y, g_{X_1}, \dots, g_{X_n}$ sont les taux de croissance de la production et des facteurs de production. Cette équation constitue l'outil de base de la *comptabilité de la croissance*, dans laquelle on cherche à attribuer à chaque facteur une part de la croissance de la production. Cependant, étant donné que la croissance de la production est plus rapide que celle des facteurs, il est en général nécessaire de supposer l'existence d'une forme de progrès technique non incorporé. De manière générale, l'introduction du progrès technique amène à ajouter un terme δ dans l'équation de comptabilité de la croissance :

$$g_Y(t) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i g_{X_i}(t) + \delta(t) \quad (\text{B.1.17})$$

Si ce progrès technique est neutre au sens de Hicks et qu'il est représenté par une fonction A de t , l'équation devient :

$$g_Y(t) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i g_{X_i}(t) + g_A(t) \quad (\text{B.1.18})$$

Le dernier terme est également appelé *résidu de Solow*, en référence à l'article de Solow (1957) sur le sujet. Dans ce cadre, l'élasticité de production d'une variable est censée mesurer sa *contribution* à la croissance de la production. Plus l'élasticité est élevée, plus cette contribution est importante. Cependant, cette contribution ne nous dit pas quel est le *moteur* de la croissance, c'est-à-dire le facteur qui cause la croissance des facteurs de production. Ainsi, dans le modèle néoclassique de croissance proposé par Solow (1956), en dernier ressort, ce sont la croissance démographique et le progrès technique qui causent la croissance. Si l'on applique la méthode de comptabilité de la croissance, on attribuera une certaine contribution au capital. Néanmoins, l'accumulation de capital ne peut pas être réellement considérée comme un moteur de la croissance. Elle en est plutôt une conséquence.

En général, pour étudier l'équation de comptabilité de la croissance, on détermine au préalable les élasticités de production. Cela permet notamment de calculer le résidu de Solow en soustrayant à la croissance de la production l'effet supposé des facteurs de production. Pour connaître les élasticités de production, on passe par leur expression à l'aide de la fonction de coût. Comme pour la fonction de production, on note à partir de maintenant G_Y la dérivée partielle de la fonction de coût par rapport à Y , G_i sa dérivée partielle par rapport au prix du facteur i et G_{ij} sa dérivée partielle seconde par rapport aux prix des facteurs i et j . La variable (Y, p) n'est plus explicitement mentionnée dans les formules par simplicité. Ainsi, l'élasticité de production du facteur i est donnée par :

$$\epsilon_i = \frac{p_i G_i}{G} \quad (\text{B.1.19})$$

D'après le lemme de Shephard, le produit des termes qui se trouvent au numérateur donne le coût associé au facteur i , tandis que le terme au dénominateur est le coût total. L'élasticité de production du facteur i est donc égale à sa *part en valeur* (« *cost share* » en anglais), également notée S_i :

$$\epsilon_i = S_i \quad (\text{B.1.20})$$

Dans la perspective néoclassique, ces parts en valeur peuvent donc être utilisées dans l'équation (B.1.18) pour calculer la contribution de chaque facteur à la croissance de la production, et en déduire l'effet résiduel du progrès technique.

B.1.4 Élasticités prix et élasticité de substitution

Les autres élasticité qui intéressent particulièrement les économistes sont celles qui permettent de caractériser les rapports entre différents facteurs. La plus simple d'entre elles est l'élasticité de la demande du facteur i en fonction du prix du facteur j à niveau de production constant, notée η_{ij} . Elle est donc plus aisément exprimée à partir de la fonction de coût, sous la forme :

$$\eta_{ij} = \frac{\partial \ln(G_i)}{\partial \ln(p_j)} = \frac{p_j G_{ij}}{G_i} \quad (\text{B.1.21})$$

L'élasticité prix fournit une première manière d'appréhender la substituabilité entre les facteurs de production. En effet, du fait des hypothèses (B.1.6), l'élasticité d'un facteur par rapport à son propre prix est négative. Mais lorsque les deux facteurs considérés sont différents, l'élasticité peut être négative ou positive. Dans le premier cas, cela signifie que les facteurs sont complémentaires et que l'augmentation du prix de l'un aura tendance à faire diminuer les deux. Dans le cas où l'élasticité prix croisée est positive, cela signifie que les facteurs sont substituables et qu'une augmentation du prix de l'un d'entre eux entraînera une augmentation de l'autre facteur.

Pour appréhender la substituabilité entre les facteurs de production, on peut également utiliser directement une élasticité de substitution. La première définition d'une telle élasticité est due à Hicks (1932), et portait uniquement sur une fonction de deux variables $F(X_1, X_2)$. Cette élasticité vise à mesurer la variation du ratio entre les quantités des deux variables lorsque leur prix relatif varie. Dans le cadre néoclassique, le ratio entre les prix relatifs est égal au ratio entre les productivité marginales des facteurs. L'élasticité de substitution σ est donc donnée par :

$$\sigma = \frac{d \ln \left(\frac{X_1}{X_2} \right)}{d \ln \left(\frac{F_2}{F_1} \right)} = \frac{F_1 F_2}{F F_{12}} \quad (\text{B.1.22})$$

Cette définition de l'élasticité de substitution fait consensus dans le cas avec deux facteurs de production. Cependant, plusieurs généralisations de cette notion ont été proposées dans le cas où la fonction de production a davantage de variables. La première est appelée élasticité de substitution partielle d'Allen (AES), en référence aux travaux

d'Allen (1938) sur ce sujet. Pour en donner l'expression, il faut au préalable définir le déterminant Δ d'ordre $n + 1$:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & F_1 & \cdots & F_n \\ F_1 & F_{11} & \cdots & F_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_n & F_{n1} & \cdots & F_{nn} \end{vmatrix} \quad (\text{B.1.23})$$

On note également Δ_{ij} le cofacteur du coefficient F_{ij} dans le déterminant Δ , c'est-à-dire le déterminant obtenu en supprimant la ligne $i + 1$ et la colonne $j + 1$. Pour une fonction à rendements constants, l'AES σ_{ij}^A entre les facteurs i et j , $i \neq j$, s'exprime alors de la manière suivante :

$$\sigma_{ij}^A = \frac{F}{X_i X_j} \frac{\Delta_{ij}}{\Delta} = \frac{G G_{ij}}{G_i G_j} \quad (\text{B.1.24})$$

D'après ces formules, il est clair que l'AES est symétrique, c'est-à-dire que $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ pour tout $i \neq j$. Par ailleurs, en comparant les formules (B.1.21) et (B.1.24) exprimées dans les termes de la fonction de coût, on voit également qu'il existe une relation reliant l'élasticité prix et l'élasticité de substitution via l'élasticité de production :

$$\eta_{ij} = \epsilon_j \sigma_{ij}^A \quad (\text{B.1.25})$$

Étant donné que l'élasticité de production est positive, le caractère complémentaire ou substituable des deux facteurs en question dépend de la position de σ_{ij}^A par rapport à 0. Si l'élasticité de substitution est négative, les facteurs seront complémentaires, tandis que si elle est positive, ils pourront faire preuve d'une certaine substituabilité. Bien sûr, il s'agit là d'une question de degré : plus la position de σ_{ij}^A d'un côté ou de l'autre sera marquée, plus la complémentarité ou la substituabilité seront importantes.

Certains économistes, tels que Blackorby et Russell (1989), suggèrent cependant que l'AES ne constitue pas la généralisation la plus pertinente du concept d'élasticité de substitution initialement formulé par Hicks pour une fonction de production avec deux facteurs. Ils proposent au contraire d'utiliser l'élasticité de substitution de Morishima (MES), en référence à la contribution pionnière de Morishima (1967) à cet égard. Pour deux facteurs i et j , $i \neq j$, celle-ci est définie de la manière suivante :

$$\sigma_{ij}^M = \frac{p_i G_{ij}}{G_j} - \frac{p_i G_{ii}}{G_i} = \eta_{ji} - \eta_{ii} \quad (\text{B.1.26})$$

D'après cette définition, la MES n'est pas symétrique en toute généralité, au contraire de l'AES. Selon Blackorby et Russell, cette propriété est plutôt un avantage, car elle est plus cohérente avec l'idée que l'élasticité de substitution doit mesurer la courbure des isoquantes de la fonction de production. En ce sens, leur critique porte principalement sur le fait qu'il n'y pas de raison de chercher une expression symétrique pour l'élasticité de substitution. Ils ne remettent pas en question le fait que l'AES est en mesure d'indiquer le degré de substituabilité global entre les facteurs. Ils pensent simplement que ce n'est

pas le rôle principal d'une élasticité de substitution, et que cette fonction est au contraire bien remplie par les élasticités prix croisées.

Pour finir sur les élasticités, il est également important de mentionner la distinction que proposent Berndt et Wood (1979) entre élasticités *nettes* et *brutes*. Pour cela, on considère une partition N_1, \dots, N_r de l'ensemble $N = \{1, \dots, n\}$. On dit alors que la fonction F est *homothétiquement faiblement séparable* par rapport à cette partition si pour tout couple de facteurs pris à l'intérieur d'un des sous-ensembles N_m , leur taux de substitution marginal est indépendant des facteurs de production extérieurs à N_m . Formellement, cette condition s'exprime de la manière suivante :

$$\forall m = 1, \dots, r, \forall i, j \in N_m, \forall k \notin N_m, \frac{\partial(F_i/F_j)}{\partial X_k} = 0 \quad (\text{B.1.27})$$

Cette condition est nécessaire et suffisante pour pouvoir écrire la fonction de production comme une fonction de r variables Z_m , chacune représentant un sous-ensemble de la partition. C'est-à-dire qu'il existe des fonctions F^*, f_1, \dots, f_r ayant les mêmes propriétés que F , et telles que :

$$\forall m = 1, \dots, r, Z_m = f_m(X_i), i \in N_m, Y = F^*(Z_1, \dots, Z_m) \quad (\text{B.1.28})$$

Pour tout couple de facteurs pris à l'intérieur d'un sous-ensemble N_m , on peut alors définir l'élasticité de la demande du premier par rapport au prix du second de deux manières différentes. Si l'on calcule l'élasticité en supposant que Z_m est fixe, alors on parle d'élasticité brute, notée η_{ij}^* . Si on suppose seulement que Y est fixe, alors on parle d'élasticité nette, et cela correspond à l'élasticité prix η_{ij} définie plus haut. On note également ϵ_{jm} l'élasticité de Z_m par rapport à X_j , et η_{mm} l'élasticité de Z_m par rapport à son propre prix dans F^* . On a alors :

$$\eta_{ij} = \eta_{ij}^* + \epsilon_{jm}\eta_{mm} \quad (\text{B.1.29})$$

Étant donné que $\epsilon_{jm} > 0$ et $\eta_{mm} < 0$, on a nécessairement $\eta_{ij} < \eta_{ij}^*$. En particulier, il est possible que l'élasticité nette soit négative alors que l'élasticité brute est positive. Dans cette situation, les facteurs de production seraient perçus comme étant complémentaires au niveau global. Alors qu'au niveau restreint de leur sous-ensemble dans la partition, ils seraient substituables.

B.1.5 Spécifications fonctionnelles

Différentes spécifications fonctionnelles de la fonction de production sont utilisées dans la littérature. Les plus courantes sont présentées ci-dessous. Pour commencer, la fonction de production dite Leontief correspond à la situation dans laquelle les facteurs sont nécessaires en des quantités déterminées pour atteindre un certain niveau de production. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$Y = F_L(X_1, \dots, X_n) = \min \left(\frac{X_1}{\alpha_1}, \dots, \frac{X_n}{\alpha_n} \right), \alpha_1, \dots, \alpha_n > 0 \quad (\text{B.1.30})$$

Il est clair que, quels que soient les prix, la combinaison optimale pour atteindre un niveau donné de production Y est telle que $\frac{X_1}{\alpha_1} = \frac{X_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n} = Y$. La fonction de coût associée vérifie donc :

$$C = G_L(Y, p_1, \dots, p_n) = Y \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i \quad (\text{B.1.31})$$

La fonction de production n'est pas différentiable en de très nombreux points, et en particulier au niveau des points qui constituent les combinaisons optimales de facteurs. De ce fait, les différentes élasticités ne sont pas bien définies du point de vue de la fonction de production. Il est cependant possible de définir les élasticités prix et de substitution du point de vue de la fonction de coût. Cela amène à constater qu'elles sont toutes nulles.

La deuxième spécification fonctionnelle courante est la fonction dite Cobb-Douglas, en référence à son utilisation par Cobb et Douglas (1928)^{viii}. À l'inverse de la fonction de Leontief, cette forme suppose que pour maintenir un niveau de production donné, il est possible de diminuer la quantité d'un facteur et d'augmenter celle d'un autre. Elle traduit cela de la manière la plus simple possible, en multipliant entre elles les quantités de facteurs élevées à une certaine puissance. Ainsi, on a :

$$Y = F_{CD}(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}, \alpha_1, \dots, \alpha_n > 0, \alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1 \quad (\text{B.1.32})$$

Pour trouver la fonction de coût associée, il faut utiliser les méthodes habituelles d'optimisation (lagrangien, etc.) pour trouver la combinaison optimale des facteurs qui minimise le coût, pour un niveau de production et des prix donnés. Il suffit ensuite de faire la somme des produits entre le prix et la quantité optimale de chaque facteur pour obtenir la fonction de coût. En appliquant cela à la fonction de production Cobb-Douglas, on trouve une fonction de coût de forme similaire :

$$C = G_{CD}(Y, p_1, \dots, p_n) = \beta Y \prod_{i=1}^n p_i^{\alpha_i}, \beta = \prod_{i=1}^n \alpha_i^{-\alpha_i} \quad (\text{B.1.33})$$

En utilisant les formules des différentes élasticités, on obtient alors :

$$\forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j, \epsilon_i = \alpha_i, \sigma_{ij}^A = 1, \eta_{ij} = \alpha_j, \eta_{ii} = \alpha_i - 1, \sigma_{ij}^M = 1 \quad (\text{B.1.34})$$

On remarque notamment que les élasticités de production des facteurs sont constantes. Leurs parts en valeur des facteurs doivent donc être constantes si l'on souhaite décrire un secteur à l'aide d'une fonction Cobb-Douglas. Les facteurs sont par ailleurs substituables de tous les points de vue (élasticités prix, AES, MES). Ces propriétés ont amené la fonction Cobb-Douglas à être abondamment utilisée dans les premières contributions à la théorie de la croissance néoclassique. Par la suite, elle reste une référence

viii. Cependant, on trouve cette fonction sous une forme plus ou moins explicite dans des travaux antérieurs, tels que ceux de Knut Wicksell (Humphrey, 1997).

importante, mais des formes plus flexibles vont être développées pour permettre de réaliser des estimations empiriques.

Ainsi, la fonction à élasticité de substitution constante (CES) est utilisée par Arrow *et al.* (1961) pour étudier la substituabilité entre le capital et le travail^{ix}. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$Y = F_{CES}(X_1, \dots, X_n) = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}, \alpha_1, \dots, \alpha_n > 0, \rho < 1, \rho \neq 0 \quad (\text{B.1.35})$$

En appliquant la même démarche que précédemment, on obtient une fonction de coût de forme similaire :

$$C = G_{CES}(Y, p_1, \dots, p_n) = Y \left(\sum_{i=1}^n \beta_i p_i^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}, \forall i, \beta_i = \alpha_i^{\frac{1}{1-\rho}} \quad (\text{B.1.36})$$

Les formules pour les élasticités donnent :

$$\begin{aligned} \forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j, \epsilon_i &= \alpha_i \left(\frac{X_i}{F_{CES}} \right)^\rho, \sigma_{ij}^A = \frac{1}{1-\rho}, \\ \eta_{ij} &= \frac{\epsilon_j}{1-\rho}, \eta_{ii} = \frac{\epsilon_i - 1}{1-\rho}, \sigma_{ij}^M = \frac{1}{1-\rho} \end{aligned} \quad (\text{B.1.37})$$

Ainsi, l'une des caractéristiques les plus importantes de la fonction CES est que les élasticités de substitution (AES et MES) sont constantes et identiques pour tous les couples de facteurs. Réciproquement, Arrow *et al.* (1961) ont montré dans le cas de deux variables que toute fonction de production dont l'élasticité de substitution est constante est de la forme CES ou Cobb-Douglas. Par la suite, différents travaux ont cherché à étendre ce résultat à un nombre quelconque de variables. Ainsi, Uzawa (1962) a montré que les AES sont constantes si et seulement si la fonction de production est constituée de fonctions CES imbriquées dans une fonction Cobb-Douglas. Pour obtenir une fonction CES globale, il faut également imposer que les AES soient identiques pour tous les couples de variables. Au contraire, Blackorby et Russell (1981) ont montré que les MES sont constantes si et seulement si la fonction de production est CES ou Cobb-Douglas.

Notons par ailleurs que la fonction CES converge vers la fonction Leontief lorsque ρ tend vers $-\infty$, c'est-à-dire lorsque les élasticités de substitution tendent vers 0. De même, la fonction CES converge vers la fonction Cobb-Douglas lorsque ρ tend vers 0, c'est-à-dire lorsque les élasticités de substitution tendent vers 1. C'est la raison pour laquelle la fonction CES est généralement considérée comme une spécification fonctionnelle plus générale, qui englobe les deux précédentes.

Des formes offrant encore davantage de flexibilité ont par la suite été recherchées, notamment afin d'imposer moins de restrictions *a priori* sur les élasticités de substitution. La plupart reposent sur l'idée d'utiliser un développement de Taylor au second ordre

ix. Cependant, Solow (1956) avait déjà utilisé la fonction de production CES pour illustrer son modèle de croissance.

afin d'approximer toute fonction de production possible. C'est notamment le cas de la fonction logarithmique transcendantale (Translog), développée par Christensen *et al.* (1973). Celle-ci est en général présentée directement sous la forme de la fonction de coût, et consiste à exprimer le logarithme du coût comme un développement de Taylor à l'ordre 2 des logarithmes des prix et du logarithme de la production. Dans un cas avec rendements constants, cela se traduit par :

$$\ln C = \ln G_T(Y, p_1, \dots, p_n) = \alpha_0 + \ln Y + \sum_{i=1}^n \alpha_i \ln p_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} \ln p_i \ln p_j, \quad (\text{B.1.38})$$

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1, \forall i, j = 1, \dots, n, \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} = 0$$

L'expression des élasticités en fonction de la fonction de coût permet alors d'obtenir les formules suivantes :

$$\forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j, \epsilon_i = \alpha_i + \sum_{k=1}^n \gamma_{ik} \ln p_k, \sigma_{ij}^A = \frac{\gamma_{ij}}{\epsilon_i \epsilon_j} + 1, \quad (\text{B.1.39})$$

$$\eta_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{\epsilon_i} + \epsilon_j, \eta_{ii} = \frac{\gamma_{ii}}{\epsilon_i} + \epsilon_i - 1, \sigma_{ij}^M = 1 + \frac{\gamma_{ij}}{\epsilon_j} - \frac{\gamma_{ii}}{\epsilon_i}$$

Comme l'indiquent ces résultats, la fonction de coût Translog impose peu de contraintes sur les valeurs des différentes élasticités. En particulier, elle n'impose plus que les élasticités de substitution soient constantes et identiques pour tous les couples de facteurs. C'est la raison pour laquelle elle est privilégiée dans la plupart des travaux empiriques impliquant trois facteurs de production ou plus^x.

B.2 Théorie néo-thermodynamique de la production

B.2.1 Critique de la rémunération à la productivité marginale

La théorie néo-thermodynamique de la production reprend à son compte le formalisme des fonctions de production. Cependant, elle en modifie de manière significative certains aspects, à commencer par la relation entre la fonction de production et la répartition des revenus entre les différents facteurs. Elle entend en effet remettre en question ce que Kümmel *et al.* (2010) nomment le « *cost share theorem* », c'est-à-dire l'égalité entre l'élasticité de production d'un facteur et sa part en valeur, donnée par l'équation (B.1.20). Derrière cette égalité, c'est donc l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale qui est en cause. Étant donné la place centrale de cette dernière dans la théorie néoclassique de la production, il s'agit là d'une différence importante.

La critique en question repose sur l'existence de contraintes qui s'exercent sur les combinaisons possibles des facteurs de production. Pour cela, on considère une fonction de production $Y = F(X)$ et des contraintes $f_1(X), \dots, f_m(X)$. Les combinaisons

x. La fonction Translog n'est cependant pas la seule à offrir une telle flexibilité. Voir par exemple Fuss (2017) pour une présentation plus complète.

techniquement possibles des facteurs de production sont alors caractérisées par :

$$\{X \in (\mathbb{R}^+)^n, \forall j = 1, \dots, m, f_j(X) = 0\} \quad (\text{B.2.1})$$

La maximisation du profit (B.1.2) est alors modifiée en conséquence. Pour déterminer la combinaison optimale des facteurs pour un système de prix réels donnés p_1, \dots, p_n , il faut s'intéresser au lagrangien suivant :

$$L(X) = F(X) - \sum_{i=1}^n p_i X_i + \sum_{j=1}^m \mu_j f_j(X), \mu_1, \dots, \mu_m \in \mathbb{R} \quad (\text{B.2.2})$$

Ainsi, les conditions du premier ordre de ce problème d'optimisation sont données par :

$$\forall i = 1, \dots, n, \frac{\partial F}{\partial X_i}(X) - p_i + \sum_{j=1}^m \mu_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i}(X) = 0 \quad (\text{B.2.3})$$

La productivité marginale de chaque facteur est donc égale au prix du facteur auquel il faut ajouter un terme traditionnellement qualifié de « *shadow price* » et défini par :

$$\forall i = 1, \dots, n, s_i(X) = - \sum_{j=1}^m \mu_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i}(X) \quad (\text{B.2.4})$$

De ce fait, les élasticités de production vérifient l'équation suivante :

$$\forall i = 1, \dots, n, \epsilon_i(X) = \frac{X_i}{F(X)}(p_i + s_i(X)) \quad (\text{B.2.5})$$

Dans cette perspective, il est donc possible qu'il y ait un écart significatif entre l'élasticité de production d'un facteur et sa part en valeur. Une difficulté concernant la cohérence de cet argument mérite d'être soulignée, d'autant plus qu'à ma connaissance elle ne l'est pas dans les diverses contributions à la théorie néo-thermodynamique de la production. Dans ce cadre, il est systématiquement fait l'hypothèse que la fonction de production est linéairement homogène. D'après le théorème d'Euler pour les fonctions de plusieurs variables, cela implique que la somme des élasticités de production doit être égale à 1. Si ces dernières satisfont les équations intégrant les contraintes (B.2.5), on a alors :

$$1 = \sum_{i=1}^n \epsilon_i(X) = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{F(X)}(p_i + s_i(X)) \quad (\text{B.2.6})$$

Par ailleurs, une condition minimale de cohérence interne est que la rémunération des facteurs épuise le produit, c'est-à-dire que la somme des parts en valeur soit égale à 1 :

$$1 = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{X_i p_i}{F(X)} \quad (\text{B.2.7})$$

Conjointement, les relations (B.2.6) et (B.2.7) imposent alors une conditions sur les *shadow prices* :

$$\sum_{i=1}^n s_i(X)X_i = 0 \quad (\text{B.2.8})$$

Cette relation n'a *a priori* aucune raison d'être vérifiée sans hypothèses supplémentaires sur les fonctions de contraintes. Si elle ne l'est pas, la détermination des quantités optimales de facteurs de production par la procédure d'optimisation ne garantit plus nécessairement que leur rémunération épuise exactement la production totale. Pour identifier une condition suffisante permettant d'assurer que cette relation est vérifiée, il est utile de réécrire le terme de gauche de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n s_i(X)X_i &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m -\mu_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i}(X)X_i \\ &= \sum_{j=1}^m -\mu_j \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial X_i}(X)X_i = \sum_{j=1}^m -\mu_j df_j(X)(X) \end{aligned} \quad (\text{B.2.9})$$

Dans cette dernière expression, $df_j(X)(X)$ désigne la différentielle de f_j calculée en X et évaluée sur le vecteur X lui-même. Or, toujours d'après le théorème d'Euler, une condition nécessaire et suffisante pour que ce terme soit nul pour tout X est que la fonction f_j soit homogène de degré 0. C'est-à-dire que si tous les facteurs de production varient dans une même proportion, la fonction de contrainte reste constante. Une condition suffisante pour que la relation (B.2.8) soit satisfaite est donc que toutes les fonctions de contrainte soient homogènes de degré 0 :

$$\forall j = 1, \dots, n, \forall X \in (\mathbb{R}^+)^n, \forall \lambda > 0, f_j(\lambda X) = f_j(X) \quad (\text{B.2.10})$$

Revenons maintenant à la manière dont Kümmel *et al.* (2010) utilisent l'argument des contraintes pour convaincre que l'élasticité de production de l'énergie peut être plus importante que sa part en valeur dans le PIB. Notons au passage que l'idée même de part en valeur de l'énergie présente quelques difficultés. Dans les approches néoclassiques appliquées à l'énergie, les fonctions de production représentent en général un secteur de production particulier, tel que le secteur manufacturier. Le secteur de production d'énergie est extérieur au secteur considéré. La part en valeur de l'énergie désigne alors simplement le coût de l'ensemble des inputs d'énergie dans ce secteur. Dans la théorie néothermodynamique de la production, cette approche n'est plus possible, car les auteurs s'intéressent au secteur industriel ou à l'économie dans son ensemble. Dans les deux cas, cela inclut le secteur énergétique. La part en valeur de l'énergie ne peut alors pas être le total des ventes d'énergie, ni même la valeur ajoutée associée à ces ventes. Cela inclurait pour une bonne part la rémunération du capital et du travail dans ce secteur. Or, celles-ci sont déjà comptées dans les parts en valeur du capital et du travail, puisque le secteur lui-même est inclus dans les processus de production considérés. Cette part de la valeur ajoutée serait donc comptée deux fois. La seule rémunération qui peut en un sens être attribuée à l'énergie elle-même est la rente touchée par les propriétaires

des ressources énergétiques. Si cela ne change donc pas fondamentalement le problème, il apparaît important de souligner que les deux conceptions de la part en valeur de l'énergie ne sont pas tout à fait les mêmes.

Dans les deux cas, la part en valeur de l'énergie est faible. C'est la raison pour laquelle Kümmel *et al.* (2010) pensent qu'elle ne fournit pas une estimation convenable de l'élasticité de production de l'énergie. Pour étayer cette position, ils se placent dans le cadre d'une fonction de production agrégée dépendant du capital K , du travail L et de l'énergie E , telle que $Y = F(K, L, E)$. Ils formulent alors deux contraintes qui sont, selon eux, à même de créer une différence significative entre l'élasticité de production de l'énergie et sa part en valeur. La première concerne le degré d'utilisation du capital, noté $\omega(K, L, E)$. Il est fait l'hypothèse que ce degré d'utilisation ne change pas si toutes les variables sont modifiées dans une même proportion, c'est-à-dire qu'il est homogène de degré 0. Kümmel *et al.* proposent alors d'utiliser un développement de Taylor au premier ordre portant sur les logarithmes des variables comme spécification fonctionnelle. Cela aboutit à la forme suivante :

$$\omega(K, L, E) = \omega_0 \left(\frac{L}{K} \right)^\lambda \left(\frac{E}{K} \right)^\nu, \lambda, \nu > 0 \quad (\text{B.2.11})$$

La première contrainte précise simplement que cette utilisation des capacités doit être inférieure à 1. Elle est donc donnée par une inégalité, et non par une égalité, comme dans la définition (B.2.1). Pour mettre la contrainte sous la forme d'une égalité, il faut introduire des « *slack variables* » $L_s, E_s \geq 0$, et définir la contrainte de la manière suivante :

$$f_1(K, L, E, L_s, E_s) = \omega_0 \left(\frac{L + L_s}{K} \right)^\lambda \left(\frac{E + E_s}{K} \right)^\nu - 1 \quad (\text{B.2.12})$$

La deuxième contrainte est présentée sous une forme similaire. Elle est associée à l'idée d'une limite à l'automatisation du processus de production déterminée par un progrès technique exogène. Kümmel *et al.* (2010) illustrent cela par la question de l'espace occupé par le stock de capital. Ils suggèrent qu'en l'absence de miniaturisation, les systèmes informatiques n'auraient pu permettre un degré d'automatisation tel qu'on le connaît actuellement, car les premiers processeurs étaient trop volumineux. Il s'agirait là d'intégrer des éléments techniques qui sont laissés hors de l'analyse par la fonction de production agrégée. Formellement, il est nécessaire pour cela de définir au préalable un niveau de capital correspondant à une automatisation maximale pour un niveau de production donné Y , noté $K_m(Y)$. Les auteurs considèrent alors qu'à chaque instant, il existe une contrainte technique $0 < \rho_T(t) < 1$, qui empêche d'atteindre ce niveau maximal, de sorte que :

$$\frac{K}{K_m(F(K, L, E))} \leq \rho_T(t) \quad (\text{B.2.13})$$

À nouveau, pour mettre cette contrainte sous la forme d'une égalité, il faut introduire une *slack variable* $K_s \geq 0$, et définir la fonction de contrainte suivante :

$$f_2(K, L, E, K_s, t) = \frac{K + K_s}{K_m(F(K, L, E))} - \rho_T(t) \quad (\text{B.2.14})$$

Cette transformation permet d'appliquer la méthode du lagrangien comme indiqué plus haut, mais en ajoutant les nouvelles variables K_s , L_s , et E_s dans la procédure. Notons au passage que ces deux fonctions de contraintes sont homogènes de degré 0, de sorte qu'il n'y a pas de problème en ce qui concerne l'épuisement du produit. Cependant, si l'une des *slack variables* est strictement positive au niveau de la combinaison optimale, cela signifie que la contrainte n'est pas *active*. Elle ne modifie donc pas réellement le résultat de l'optimisation, et les élasticités restent égales aux parts en valeur. Étant donné que Kümmel *et al.* (2010) ne démontrent pas que ce n'est pas le cas, il reste un doute sur la capacité de leur argument à réellement remettre en question l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale.

B.2.2 La fonction de production linéaire exponentielle (Linex)

Outre la critique de la rémunération à la productivité marginale, la théorie néo-thermodynamique de la production repose sur une autre spécification fonctionnelle censée être plus conforme aux contraintes physiques et techniques qui s'exercent sur le processus de production. La démarche sous-jacente est décrite dès le début des années 1980 par Kümmel (1982). Elle consiste à partir de l'équation (B.1.15) pour une fonction de production $F(K, L, E)$ linéairement homogène, et dont $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ désignent les élasticités de production du capital, du travail et de l'énergie. On a alors :

$$\begin{aligned} \frac{dF}{F} &= \alpha \frac{dK}{K} + \beta \frac{dL}{L} + \gamma \frac{dE}{E} \\ \alpha &= \frac{K}{F} \frac{\partial F}{\partial K}, \beta = \frac{L}{F} \frac{\partial F}{\partial L}, \gamma = 1 - \alpha - \beta = \frac{E}{F} \frac{\partial F}{\partial E} \end{aligned} \quad (\text{B.2.15})$$

Étant donné que F est supposée deux fois différentiable, d'après le théorème de Schwarz, ses dérivées partielles secondes doivent être symétriques. En exprimant celles-ci en fonction de α et β on obtient un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui doivent être satisfaites par ces élasticités :

$$K \frac{\partial \alpha}{\partial K} + L \frac{\partial \alpha}{\partial L} + E \frac{\partial \alpha}{\partial E} = 0, K \frac{\partial \beta}{\partial K} + L \frac{\partial \beta}{\partial L} + E \frac{\partial \beta}{\partial E} = 0, L \frac{\partial \alpha}{\partial L} = K \frac{\partial \beta}{\partial K} \quad (\text{B.2.16})$$

L'ensemble des solutions de ces équations sont de la forme suivante, où A et J sont deux fonctions différentiables quelconques :

$$\alpha(K, L, E) = A\left(\frac{L}{K}, \frac{E}{K}\right), \beta(K, L, E) = \int \frac{1}{K} \frac{\partial A}{\partial L} dK + J\left(\frac{L}{E}\right) \quad (\text{B.2.17})$$

La théorie néo-thermodynamique de la production impose alors deux conditions aux limites sur la comportement de α et β . La première stipule que le capital ne peut pas fonctionner sans une dépense minimale d'énergie ou de travail. Formellement, cette condition se traduit par le fait que l'élasticité de production du capital tend vers 0 si les ratios travail/capital et énergie/capital tendent vers 0 :

$$\frac{L}{K} \rightarrow 0, \frac{E}{K} \rightarrow 0 \Rightarrow \alpha(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (\text{B.2.18})$$

La deuxième condition suggère qu'en se rapprochant du stade d'automatisation intégrale du processus de production, le travail devient inutile à la production, c'est-à-dire que son élasticité de production tend vers 0. Pour exprimer cela, on définit le paramètre c qui désigne la quantité d'énergie par unité de capital utilisée au stade d'automatisation maximale $K_m(Y)$, pour tout niveau de production donné Y . La deuxième condition aux limites se formalise alors de la manière suivante :

$$K \rightarrow K_m(Y), E \rightarrow cK_m(Y) \Rightarrow \beta(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (\text{B.2.19})$$

Les élasticités de production les plus simples qui vérifient ces conditions et sont de la forme (B.2.17) sont données par :

$$\alpha(K, L, E) = a \frac{L + E}{K}, \beta(K, L, E) = a \left(c \frac{L}{E} - \frac{L}{K} \right) \quad (\text{B.2.20})$$

En remettant ces équations dans la formule (B.2.15) et en intégrant, la fonction de production prend la forme suivante, où C_0 est une constante d'intégration :

$$Y = F(K, L, E) = C_0 E \exp\left(-a \frac{L + E}{K} + ac \frac{L}{E}\right) \quad (\text{B.2.21})$$

Cette fonction est dite linéaire exponentielle (Linex). Une forme de progrès technique peut également être introduite dans cette spécification fonctionnelle en rendant les paramètres a et c dépendants du temps :

$$Y = F(K, L, E, t) = C_0 E \exp\left(-a(t) \frac{L + E}{K} + a(t)c(t) \frac{L}{E}\right) \quad (\text{B.2.22})$$

Dans l'ensemble, le principal caractère distinctif de la fonction Linex est donc de satisfaire les conditions aux limites (B.2.18) et (B.2.19). Cette propriété est censée garantir un certain réalisme technique à la fonction de production. Dans la théorie néo-thermodynamique, cette spécification fonctionnelle sert principalement à l'estimation des élasticités de production des différents facteurs. Celles-ci visent en particulier à montrer que l'énergie est un facteur important dans la croissance. À l'inverse, la substituabilité entre les facteurs n'occupe pas une place centrale dans cette approche^{xi}.

xi. Lindenberger et Kümmel (2011) donnent les formules des élasticités de substitution de Hicks, mais ils n'en fournissent pas d'estimations empiriques.

Annexe C

Modèle flux-fonds de transition énergétique

Cette annexe donne quelques précisions sur certaines propriétés d'un modèle de transition énergétique dans le cadre de la théorie flux-fonds. Les résultats ci-dessous n'ont pas été établis ailleurs dans la littérature, à ma connaissance. Cependant, ils ne constituent qu'une première ébauche et d'autres aspects de la question demanderaient à être explorés dans ce cadre.

C.1 Énergie nette et viabilité

C.1.1 Cas d'une technologie solaire

Pour discuter de la relation entre énergie nette et viabilité, il est suffisant de d'intéresser tout d'abord au tableau (7). Comme dans le chapitre 5, celui-ci représente un processus P_1 produisant de l'énergie solaire SE , un processus P_2 produisant des capteurs solaires SC , et un processus P_3 produisant des biens d'équipement standards K . Cependant, il intègre explicitement l'hypothèse selon laquelle les éléments d'un processus sont combinés dans des proportions constantes, indépendamment de la taille du processus, donnée par le coefficient λ associé.

TABLEAU 7 – Tableau flux-fonds d'une technologie solaire

	P_1	P_2	P_3
	<i>Flux</i>		
SE	$x_{11}\lambda_1$	$-x_{12}\lambda_2$	$-x_{13}\lambda_3$
SC	$-x_{21}\lambda_1$	$x_{22}\lambda_2$	*
K	$-x_{31}\lambda_1$	$-x_{32}\lambda_2$	$x_{33}\lambda_3$
	<i>Fonds</i>		
SC	$y_{11}\lambda_1$	*	*
K	$y_{21}\lambda_1$	$y_{22}\lambda_2$	$y_{23}\lambda_3$
H	$y_{31}\lambda_1$	$y_{32}\lambda_2$	$y_{33}\lambda_3$

Dans ce cadre, la matrice X et le vecteur λ sont définis par :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & -x_{12} & -x_{13} \\ -x_{21} & x_{22} & 0 \\ -x_{31} & -x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \text{ et } \lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (\text{C.1.1})$$

On suppose par ailleurs que $x_{ij} > 0$ pour tout $(i, j) \neq (2, 3)$. De manière similaire au chapitre 5, on définit également : $a = (1, a_2, a_3)$, le vecteur ligne des coefficients

d'énergie incorporée ; et $\eta = (\eta_1, 0, 0)$, le vecteur ligne de l'énergie nette associée à chaque processus. Par définition, l'énergie incorporée de CE est égale à 1 et tous les processus non producteurs d'énergie ont un bilan neutre en énergie incorporée. Le coefficient η_1 mesure la performance globale du processus de production de l'énergie P_1 , en tenant compte de l'énergie indirecte utilisée dans les processus associés. Par définition, ces variables vérifient l'équation suivante :

$$a.X = \eta \Leftrightarrow \begin{cases} x_{11} - a_2x_{21} - a_3x_{31} = \eta_1 \\ -x_{12} + a_2x_{22} - a_3x_{32} = 0 \\ -x_{13} + a_3x_{33} = 0 \end{cases} \quad (\text{C.1.2})$$

D'après les deux dernières équations du système, il est clair que les coefficients d'énergie incorporée sont définis de manière unique et qu'ils sont strictement positifs. Notons également que les mêmes coefficients seraient toujours solution du système si l'on changeait la taille des processus. Il n'en va pas de même pour l'énergie nette, qui dépend de manière linéaire de la taille du processus P_1 . Pour le voir, il suffit de noter $D(\lambda)$ la matrice diagonale ayant sur la diagonale les coefficients d'un vecteur $\lambda > 0$, qui donnerait la taille des différents processus comme dans le tableau flux-fonds ci-dessus. Alors, en utilisant l'équation (C.1.2), on a :

$$a.X.D(\lambda) = \eta.D(\lambda) = (\lambda_1\eta_1, 0, 0)$$

Donc a serait toujours solution du système si l'on considérait la matrice $X.D(\lambda)$ à la place de X . Cependant, dans le membre de droite η_1 serait remplacé par $\lambda_1\eta_1$. Cette différence a cependant peu d'importance ici, car ce qui nous intéresse est le fait que cette énergie nette soit positive. Plus précisément, une première condition de soutenabilité de la technologie en question est donnée par le fait que la solution du système (C.1.2) soit telle que :

$$\eta_1 > 0 \quad (\text{C.1.3})$$

Voyons maintenant en quoi cette condition est liée à la condition de viabilité proposée par Georgescu-Roegen. Pour le tableau flux-fonds ci-dessus, celle-ci est donnée par :

$$\begin{cases} \lambda_1x_{11} - \lambda_2x_{12} - \lambda_3x_{13} > 0 \\ -\lambda_1x_{21} + \lambda_2x_{22} = 0 \\ -\lambda_1x_{31} - \lambda_2x_{32} + \lambda_3x_{33} = 0 \end{cases} \quad (\text{C.1.4})$$

Cependant, cette condition s'applique à un système donné, correspondant à un vecteur de tailles des processus particulier. Si l'on veut une condition de soutenabilité plus générale, la question est de savoir si pour une matrice X donnée, il existe un vecteur de taille des processus qui permet de satisfaire la condition (C.1.4). Ces tailles étant nécessairement positives, il écoule de la première équation du système que λ_1 devrait nécessairement être strictement positif. En divisant les tailles de tous les processus par λ_1 , la condition ci-dessus resterait vérifiée. Il suffit donc de s'intéresser à la solution du

système suivant :

$$\begin{cases} x_{11} - \lambda_2 x_{12} - \lambda_3 x_{13} = \nu_1 \\ -x_{21} + \lambda_2 x_{22} = 0 \\ -x_{31} - \lambda_2 x_{32} + \lambda_3 x_{33} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow X.\lambda = \nu, \text{ avec } \lambda = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} \text{ et } \nu = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{C.1.5})$$

D'après les deux dernières équations de ce système, il est clair que les coefficients λ_2 et λ_3 sont définis de manière unique et qu'ils sont strictement positifs. Une deuxième condition de soutenabilité de la technologie, qui correspond à la notion de viabilité, est alors donnée par le fait que la solution du système (C.1.2) soit telle que :

$$\nu_1 > 0 \quad (\text{C.1.6})$$

Or, par associativité du produit $a.X.\lambda$, on a :

$$a.X.\lambda = \eta\lambda = a.\nu \Rightarrow \eta_1 = \nu_1 \quad (\text{C.1.7})$$

Les conditions (C.1.3) et (C.1.6) sont donc équivalentes pour la matrice X .

C.1.2 Généralisation

La question qui se pose naturellement est alors de savoir dans quelle mesure ce résultat peut être appliqué à des technologies impliquant davantage de processus. Pour cela, il faudrait considérer une matrice carrée X de dimension $n \geq 3$ dont les coefficients sont strictement positifs sur la diagonale et sont négatifs en dehors^{xii}. Si a et λ , définis comme ci-dessus, existent bien et ont des coefficients positifs, alors il est clair que l'équation est vérifiée, et donc que l'énergie nette est positive si et seulement si la technologie est viable. La principale difficulté consiste donc à montrer que a est bien défini et positif si et seulement si λ l'est aussi. Étant donné que dans les deux cas, le premier coefficient est égal à 1, cela revient à s'intéresser à la situation des $n - 1$ derniers coefficients. Or, en notant X_{11} la sous-matrice de X obtenue en supprimant la première colonne et la première ligne, on a :

$$X_{11} \begin{pmatrix} \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{21} \\ \vdots \\ x_{n1} \end{pmatrix} \quad (\text{C.1.8})$$

$$(a_2, \dots, a_n)X_{11} = (x_{12}, \dots, x_{1n}) \Leftrightarrow {}^tX_{11} \begin{pmatrix} a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{12} \\ \vdots \\ x_{1n} \end{pmatrix} \quad (\text{C.1.9})$$

Dans ces équations, les coefficients x_{ij} désignent l'opposé des coefficients de la matrice X en-dehors de la diagonale, selon la même convention que dans la définition (C.1.1).

xii. Les adjectifs « positif » et « négatif » sont utilisés ici selon la convention française qui inclut le cas nul, contrairement à la tradition anglo-saxonne. Lorsque le cas nul est exclu, cela est précisé par l'adverbe « strictement ». Cette précision est utile pour éviter des confusions sur certaines des subtilités qui suivent.

Ils sont donc positifs. Dans la deuxième équation, ${}^tX_{11}$ désigne la transposée de X_{11} . On retrouve donc là un problème classique, notamment en analyse input-output, qui consiste à savoir dans quelles conditions tous les coefficients des solutions de ces systèmes sont positifs. Dans le cas où l'ensemble des coefficients de la matrice du système sont non nuls, et que les coefficients du membre de droite sont strictement positifs, Hawkins et Simon (1949) ont montré qu'une condition nécessaire et suffisante pour qu'une équation de ce type ait une solution strictement positive est que les mineurs principaux de la matrice du système soient tous strictement positifs^{xiii}. Or, les mineurs principaux de X_{11} sont également ceux de ${}^tX_{11}$. On a donc que a est bien défini et strictement positif si et seulement si λ l'est aussi.

Cependant, les hypothèses de la condition de Hawkins-Simon peuvent apparaître très restrictives. En particulier, le fait que les coefficients de la matrice du système doivent être non nuls apparaît particulièrement gênant. Cela exclurait notamment la technologie solaire étudiée précédemment. Pour cette raison, il est plus utile de faire appel à la condition formulée par Georgescu-Roegen (1951b, Théorème 7) pour une matrice dont les coefficients sont strictement positifs sur la diagonale et simplement négatifs en-dehors. Les coefficients du membre de droite doivent quant à eux toujours être strictement positifs. La condition nécessaire et suffisante pour que le système ait une solution strictement positive est alors qu'un sous-ensemble de mineurs principaux soient strictement positifs. Le sous-ensemble en question est celui obtenu en enlevant d'abord la première ligne et la première colonne, puis les deux premières lignes et deux premières colonnes, et ainsi de suite. Or, ce sous-ensemble de mineurs principaux est à nouveau identique pour X_{11} et ${}^tX_{11}$. Dans ces conditions, on a donc toujours que a est bien défini et strictement positif si et seulement si λ l'est aussi.

La dernière hypothèse qui peut paraître restrictive est celle concernant le fait que le second membre doit être strictement positif. Pour pouvoir appliquer le résultat qui précède il faut donc supposer que tous les coefficients sur la première ligne et la première colonne de la matrice X sont non nuls. Le fait que tous les coefficients de la première ligne soient positifs ne pose pas problème tant que la marchandise qui sert de référence est l'énergie. En effet, on peut penser que l'une de ses propriétés est précisément qu'elle est nécessaire dans n'importe quel processus de production. La situation est plus problématique en ce qui concerne la première colonne. En effet, on peut envisager des technologies dans lesquelles certaines marchandises n'entrent qu'indirectement dans la production d'énergie. C'est par exemple le cas de la matière dans le tableau (3) présenté dans le chapitre 5. Dans ce cas, en combinant la condition de Georgescu-Roegen ci-dessus avec un autre de ses résultats (1951b, Théorème 5), on peut toujours démontrer que si a est bien défini et strictement positif alors λ est bien défini et positif. À l'aide d'un troisième résultat de Georgescu-Roegen (1951b, Théorème 5), on peut également démontrer que si λ est bien défini et strictement positif alors a est également bien défini et strictement positif. Cela est suffisant pour comparer les deux conditions de soutenabilité et montrer qu'elles sont

xiii. Un « mineur » désigne le déterminant d'une sous-matrice carrée de la matrice considérée. Les mineurs « principaux » sont ceux obtenus en sélectionnant les mêmes indices pour les lignes et les colonnes pour construire la sous-matrice.

identiques.

Notons pour finir qu'à chaque fois, on a dû supposer que a ou λ était strictement positif. Si l'on s'intéresse à des cas où l'on suppose seulement que l'un des deux est positif, il est possible que l'on trouve des situations dans lesquels l'autre ne l'est pas. Rien ne permet en tout cas de l'exclure à ce stade, et il faudrait examiner la question de manière plus approfondie pour en savoir plus.

C.2 Modèle dynamique de transition énergétique

C.2.1 Présentation du modèle

On s'intéresse maintenant au modèle de transition énergétique présenté dans le chapitre 5, et représenté dans le tableau 8. Dans ce cadre, P_0 est le processus de production d'énergie préexistant, P_1 est le nouveau processus énergétique, et P_2 produit des biens d'équipement. On peut par exemple imaginer que P_0 désigne la production à partir d'énergies fossiles, et P_1 à partir de l'énergie solaire. Afin de simplifier au maximum le modèle, deux hypothèses importantes sont faites : P_0 et P_1 produisent des formes parfaitement substituables d'énergie contrôlée CE ; les deux processus nécessitent les mêmes biens d'équipement K . Par conséquent, P_0 et P_1 ne diffèrent que par les proportions dans lesquelles les flux et les fonds y sont combinés. On laisse par ailleurs de côté le travail nécessaire dans chaque processus, pour se concentrer sur les contraintes liées à l'accumulation de capital. Afin de simplifier le traitement analytique, les tailles unitaires de chaque processus sont choisies de sorte qu'ils impliquent une unité d'énergie. Tous les coefficients x_i et y_i sont strictement positifs.

TABLEAU 8 – Tableau flux-fonds d'une transition énergétique

	P_0	P_1	P_2
	<i>Flux</i>		
E	$\lambda_0(t)$	$\lambda_1(t)$	$-\lambda_2(t)$
K	$-x_0\lambda_0(t)$	$-x_1\lambda_1(t)$	$x_2\lambda_2(t)$
	<i>Fonds</i>		
K	$y_0\lambda_0(t)$	$y_1\lambda_1(t)$	$y_2\lambda_2(t)$

Dans ce cadre, il n'y aurait pas de sens à faire une transition vers une technologie qui ne serait pas viable. On suppose donc que $\{P_1, P_2\}$ forment une technologie viable. La matrice X associée à cette technologie est alors :

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -x_1 & x_2 \end{pmatrix} \quad (\text{C.2.1})$$

Le système associé à la condition de viabilité est alors :

$$\begin{cases} 1 - \lambda_2 = \nu_1 \\ -x_1 + \lambda_2 x_2 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \nu_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_2} \\ \lambda_2 = \frac{x_1}{x_2} \end{cases} \quad (\text{C.2.2})$$

Donc la technologie est viable si et seulement si $x_2 > x_1$, et l'on suppose que cette condition est satisfaite. La dynamique du système va alors dépendre notamment du fait que P_1 est plus ou moins efficace que P_0 . Ici, on s'intéresse au cas où P_1 est moins efficace. Cette situation correspond par exemple aux craintes exprimées sur le fait que l'énergie solaire pourrait avoir un rendement énergétique (EROI) plus faible que les énergies fossiles, y compris à long terme. On fait donc l'hypothèse suivante :

$$x_0 < x_1 < x_2 \quad (\text{C.2.3})$$

Enfin, il est également supposé que le taux de remplacement du capital est identique dans les deux processus de production d'énergie, de sorte que :

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{x_1}{y_1} \Leftrightarrow y_0 = y_1 \frac{x_0}{x_1} < y_1 \quad (\text{C.2.4})$$

En dehors de ces différentes contraintes associées au processus de production, on suppose qu'il existe également une contrainte de ressource sur P_0 . Si P_0 est assimilé au secteur des énergies fossiles, cette contrainte peut être interprétée de deux manières différentes. Tout d'abord, on peut supposer que le stock total d'énergie fossile est fini et qu'il s'épuise inexorablement au fur et à mesure qu'on en prélève. C'est par exemple dans cette perspective qu'étaient formulés les modèles de croissance avec ressource épuisable des années 1970, étudiés dans le chapitre 2. Cependant, à l'heure actuelle, la principale contrainte sur l'utilisation des énergies fossiles semble plutôt être celle associée aux émissions de CO_2 qui en découlent et au réchauffement climatique qu'elles induisent. De ce point de vue, la contrainte sur P_0 pourrait plutôt être interprétée comme un total d'émission à ne pas dépasser pour rester en-deçà d'un certain niveau de réchauffement. Quelle que soit l'interprétation privilégiée, celle-ci prendrait analytiquement la forme d'une constante S_0 telle que :

$$\int_0^{+\infty} \lambda_0(\tau) d\tau \leq S_0 \quad (\text{C.2.5})$$

De plus, on peut ajouter à cela l'hypothèse suivante^{xiv} :

$$\lambda_0(t) \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0 \quad (\text{C.2.6})$$

xiv. Sur le plan strictement logique, cette hypothèse n'est pas une conséquence nécessaire de la contrainte qui précède. λ_0 pourrait en effet avoir une intégrale finie, mais avoir des « pics » de plus en plus fins qui se répètent jusqu'à l'infini, de sorte que la fonction ne converge pas vers 0. Cependant, il est au moins possible de déduire de la contrainte qui précède l'existence d'une suite croissante t_n tendant vers l'infini et telle que $\lambda_0(t_n) \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} 0$. Cela serait suffisant pour démontrer les résultats qui suivent, et en particulier pour l'inégalité (C.2.28). Néanmoins, l'hypothèse (C.2.6) rend cela plus direct, et elle est par ailleurs tout à fait réaliste.

On suppose par ailleurs qu'à $t = 0$, P_0 et P_2 ont une taille strictement positive. P_1 peut donc croître en accumulant du capital, pris soit sur la production nette, soit en réutilisant du capital déjà utilisé dans P_0 et P_2 ^{xv}. On fait également l'hypothèse que toutes les fonctions du temps sont dérivables et que leurs dérivées sont continues. Cela implique que la réallocation du capital entre deux processus ne peut se faire en bloc. Pour $t \geq 0$, le système d'équations différentielles suivant est satisfait :

$$\begin{cases} z_1(t) = \lambda_0(t) + \lambda_1(t) - \lambda_2(t) \\ z_2(t) = -x_0\lambda_0(t) - x_1\lambda_1(t) + x_2\lambda_2(t) - y_0\dot{\lambda}_0(t) - y_1\dot{\lambda}_1(t) - y_2\dot{\lambda}_2(t) \end{cases} \quad (\text{C.2.7})$$

Ici, on s'intéresse en particulier à la transition entre un état stationnaire, où P_0 et P_1 sont de tailles constantes et la production nette est entièrement consommée. On a donc :

$$\lambda_1(0) = 0 \quad (\text{C.2.8})$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} z_1(0) \\ z_2(0) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -x_0 & x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_0(0) \\ \lambda_2(0) \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \lambda_0(0) \\ \lambda_2(0) \end{pmatrix} &= \frac{1}{x_2 - x_0} \begin{pmatrix} x_2 & 1 \\ x_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(0) \\ z_2(0) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{C.2.9})$$

C.2.2 Résolution du système différentiel

La dynamique du système est donc contrainte par le système différentiel linéaire (C.2.7). Pour le résoudre, il faut considéré deux fonctions comme des inconnues du système, tandis que les autres seraient des données. Le plus pertinent est de considérer z_1 , z_2 , et λ_0 comme des données, et de résoudre le système par rapport à λ_1 et λ_2 . Cela peut s'interpréter par le fait que l'on a des trajectoire de consommation et d'émissions qui sont données, et l'on souhaite savoir s'il est possible de satisfaire ces différentes contraintes en adaptant les variations de P_1 et P_2 . Pour en rendre compte, on peut réécrire le système différentiel de la manière suivante :

$$\begin{cases} z_1(t) - \lambda_0(t) = \lambda_1(t) - \lambda_2(t) \\ z_2(t) + x_0\lambda_0(t) + y_0\dot{\lambda}_0(t) = -x_1\lambda_1(t) + x_2\lambda_2(t) - y_1\dot{\lambda}_1(t) - y_2\dot{\lambda}_2(t) \end{cases} \quad (\text{C.2.10})$$

Pour le résoudre, on procède au changement de variable suivant :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ y_1 & y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} &= \frac{1}{y_1 + y_2} \begin{pmatrix} y_2 & 1 \\ -y_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{C.2.11})$$

xv. Ce genre de réallocation du capital est suggérée par Georgescu-Roegen (1976a, 249).

Pour exprimer le système différentiel en fonction de ces nouvelles variables, on définit α and β de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} -x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & y_1 \\ -1 & y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\alpha \\ \beta \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} -\alpha \\ \beta \end{pmatrix} &= \frac{1}{y_1 + y_2} \begin{pmatrix} y_2 & -y_1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{x_1 y_2 + x_2 y_1}{y_1 + y_2} > 0 \\ \beta = \frac{x_2 - x_1}{y_1 + y_2} > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{C.2.12})$$

Par ailleurs, en utilisant l'hypothèse (C.2.3), on obtient :

$$x_0 < x_1 < \alpha < x_2 \quad (\text{C.2.13})$$

Notons également que l'on a la relation suivante :

$$\beta y_2 - x_2 + \alpha = \frac{(x_2 - x_1)y_2}{y_1 + y_2} + \frac{x_1 y_2 + x_2 y_1}{y_1 + y_2} - \frac{x_2 y_1 + x_2 y_2}{y_1 + y_2} = 0 \quad (\text{C.2.14})$$

Le système différentiel devient alors :

$$\begin{cases} z_1(t) - \lambda_0(t) = \mu_1(t) \\ z_2(t) + x_0 \lambda_0(t) + y_0 \dot{\lambda}_0(t) = -\alpha \mu_1(t) + \beta \mu_2(t) - \dot{\mu}_2(t) \end{cases} \quad (\text{C.2.15})$$

En utilisant la première équation pour enlever μ_1 dans la deuxième, on obtient :

$$\begin{cases} v_1(t) = z_1(t) - \lambda_0(t) = \mu_1(t) \\ v_2(t) = \alpha z_1(t) + z_2(t) + (x_0 - \alpha) \lambda_0(t) + y_0 \dot{\lambda}_0(t) = \beta \mu_2(t) - \dot{\mu}_2(t) \end{cases} \quad (\text{C.2.16})$$

Dans cette dernière formulation, on note v_1 et v_2 les termes de gauche. Ils ne contiennent que des données du problème, et pas d'inconnues. Les solutions du système s'expriment ainsi sous la forme :

$$\begin{cases} \mu_1(t) = v_1(t) \\ \mu_2(t) = e^{\beta t} (\mu_2(0) - \int_0^t e^{-\beta \tau} v_2(\tau) d\tau) \end{cases} \quad (\text{C.2.17})$$

Par ailleurs, en utilisant les équations (C.2.11) et (C.2.8), on a :

$$\begin{cases} \mu_1(0) = -\lambda_2(0) < 0 \\ \mu_2(0) = y_2 \lambda_2(0) > 0 \end{cases} \quad (\text{C.2.18})$$

C.2.3 Contrainte sur la transition

On s'intéresse aux contraintes qui s'exercent sur la transition dans le cadre de ce modèle. Ces contraintes sont notamment liées au fait que $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$ doivent être positifs pour tout $t \geq 0$. D'après l'équation (C.2.11), cela implique que $\mu_2(t)$ doit également être positif. Pour calculer $\mu_2(t)$, il est nécessaire de considérer chaque terme de $\int_0^t e^{-\beta\tau} v_2(\tau) d\tau$. Pour commencer, on intègre par partie la terme en λ_0 , ce qui donne :

$$\int_0^t e^{-\beta\tau} \lambda_0(\tau) d\tau = -\frac{1}{\beta}(e^{-\beta t} \lambda_0(t) - \lambda_0(0)) + \frac{1}{\beta} \int_0^t e^{-\beta\tau} \dot{\lambda}_0(\tau) d\tau \quad (\text{C.2.19})$$

En utilisant cela, ainsi que l'équation (C.2.18), on a :

$$\begin{aligned} \beta e^{-\beta t} \mu_2(t) = & \beta y_2 \lambda_2(0) + (\alpha - x_0) \lambda_0(0) + (x_0 - \alpha) e^{-\beta t} \lambda_0(t) \\ & + (\alpha - x_0 - \beta y_0) \int_0^t e^{-\beta\tau} \dot{\lambda}_0(\tau) d\tau \\ & - \beta \int_0^t e^{-\beta\tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (\text{C.2.20})$$

On utilise alors les équations (C.2.9) pour exprimer $\lambda_0(0)$ et $\lambda_2(0)$ en fonction de $z_1(0)$ et $z_2(0)$. En utilisant également l'équation (C.2.14), le facteur devant $z_1(0)$ devient alors :

$$\frac{\beta y_2 x_0}{x_2 - x_0} + \frac{(\alpha - x_0) x_2}{x_2 - x_0} = \frac{(x_2 - \alpha) x_0}{x_2 - x_0} + \frac{(\alpha - x_0) x_2}{x_2 - x_0} = \alpha \quad (\text{C.2.21})$$

De la même manière, le facteur devant $z_2(0)$ est donné par :

$$\frac{\beta y_2}{x_2 - x_0} + \frac{\alpha - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{x_2 - \alpha}{x_2 - x_0} + \frac{\alpha - x_0}{x_2 - x_0} = 1 \quad (\text{C.2.22})$$

Par ailleurs, on pose :

$$\gamma = \alpha - x_0 - \beta y_0 \quad (\text{C.2.23})$$

Alors, en utilisant les équations (C.2.12) et l'hypothèse (C.2.4), on a :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{x_1 y_2 + x_2 y_1}{y_1 + y_2} - \frac{x_0 (y_1 + y_2)}{y_1 + y_2} - \frac{(x_2 - x_1) y_0}{y_1 + y_2} \\ &= \frac{x_1 (x_1 y_2 + x_2 y_1)}{x_1 (y_1 + y_2)} - \frac{x_1 x_0 (y_1 + y_2)}{x_1 (y_1 + y_2)} - \frac{(x_2 - x_1) x_0 y_1}{x_1 (y_1 + y_2)} \\ &= \frac{x_1 (x_1 y_2 + x_2 y_1) - x_1 x_0 (y_1 + y_2) - (x_2 - x_1) x_0 y_1}{x_1 (y_1 + y_2)} \\ &= \frac{x_1 (x_1 y_2 + x_2 y_1) - x_1 x_0 y_2 - x_2 x_0 y_1}{x_1 (y_1 + y_2)} \\ &= \frac{x_1 y_2 (x_1 - x_0) + x_2 y_1 (x_1 - x_0)}{x_1 (y_1 + y_2)} \\ &= \frac{(x_1 y_2 + x_2 y_1) (x_1 - x_0)}{x_1 (y_1 + y_2)} = \alpha \frac{x_1 - x_0}{x_1} > 0 \end{aligned} \quad (\text{C.2.24})$$

Au final, on a donc :

$$\begin{aligned} \beta e^{-\beta t} \mu_2(t) &= \alpha z_1(0) + z_2(0) + (x_0 - \alpha) e^{-\beta t} \lambda_0(t) + \gamma \int_0^t e^{-\beta \tau} \dot{\lambda}_0(\tau) d\tau \\ &\quad - \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (\text{C.2.25})$$

Pour commencer, on peut donc exprimer la contrainte sous la forme :

$$\begin{aligned} \mu_2(t) \geq 0 &\Leftrightarrow \alpha z_1(0) + z_2(0) + (x_0 - \alpha) e^{-\beta t} \lambda_0(t) + \gamma \int_0^t e^{-\beta \tau} \dot{\lambda}_0(\tau) d\tau \\ &\geq \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (\text{C.2.26})$$

Cette même contrainte peut être exprimée sous une autre forme en utilisant l'intégration par partie (C.2.19) dans l'autre sens, et en simplifiant à l'aide de la définition de γ (C.2.23). On obtient alors :

$$\begin{aligned} \mu_2(t) \geq 0 &\Leftrightarrow \alpha z_1(0) + z_2(0) + (x_0 - \alpha + \gamma) e^{-\beta t} \lambda_0(t) - \gamma \lambda_0(0) \\ &\quad + \gamma \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} \lambda_0(\tau) d\tau \geq \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \\ &\Leftrightarrow \alpha z_1(0) + z_2(0) - \beta y_0 e^{-\beta t} \lambda_0(t) - \gamma \lambda_0(0) + \gamma \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} \lambda_0(\tau) d\tau \\ &\geq \beta \int_0^t e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (\text{C.2.27})$$

Quand t tend vers l'infini, on obtient que la contrainte suivante doit être satisfaite :

$$\alpha z_1(0) + z_2(0) - \gamma \lambda_0(0) + \gamma \beta \int_0^{+\infty} e^{-\beta \tau} \lambda_0(\tau) d\tau \geq \beta \int_0^{+\infty} e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \quad (\text{C.2.28})$$

En utilisant la contrainte de ressource (C.2.5), on a par ailleurs :

$$\int_0^{+\infty} e^{-\beta \tau} \lambda_0(\tau) d\tau \leq \int_0^{+\infty} \lambda_0(\tau) d\tau \leq S_0 \quad (\text{C.2.29})$$

Notons que cette majoration sera d'autant plus précise que l'activité du processus P_0 sera concentrée à proximité de 0 et réduira ensuite rapidement. En intégrant cela dans la contrainte, on obtient :

$$\alpha z_1(0) + z_2(0) + \gamma(\beta S_0 - \lambda_0(0)) \geq \beta \int_0^{+\infty} e^{-\beta \tau} (\alpha z_1(\tau) + z_2(\tau)) d\tau \quad (\text{C.2.30})$$

Cette contrainte mène à deux conclusions importantes. Premièrement, étant donné que le terme de gauche est fini, l'intégrale de droite est également finie. Cela implique

notamment que le taux de croissance asymptotique de z_1 et z_2 ne peut pas dépasser β . Deuxièmement, si l'on note \bar{z}_1 et \bar{z}_2 les minima de z_1 et z_2 , alors ils doivent vérifier :

$$\alpha z_1(0) + z_2(0) + \gamma(\beta S_0 - \lambda_0(0)) \geq \alpha \bar{z}_1 + \bar{z}_2 \quad (\text{C.2.31})$$

En particulier, si $\beta S_0 < \lambda_0(0)$, alors l'un des deux minima doit être strictement inférieur à la valeur initial de la fonction de consommation correspondante. Cela signifie que la consommation de l'une des deux marchandises produites, l'énergie et le capital, doit nécessairement chuter à un certain moment au cours de la transition, avant éventuellement de remonter. Si l'on imagine que S_0 et $\lambda_0(0)$ sont donnés par la situation antérieure, alors cela nous donne un seuil d'efficacité $\beta_0 = \frac{\lambda_0(0)}{S_0}$ pour la technologie de long terme. Si cette technologie a une efficacité plus faible que ce seuil, alors il y aura nécessairement une décroissance temporaire de la consommation d'une des deux marchandises. D'après la définition de β donnée par (C.2.12), ce sera le cas si le paramètre x_1 est suffisamment proche de x_2 , c'est-à-dire si la technologie se rapproche de la condition limite de viabilité.

Cette analyse a permis d'identifier une contrainte importante dans le cadre du modèle de transition énergétique proposé ci-dessus. Il ne s'agit cependant que d'une ébauche, et d'autres aspects du modèle restent à explorer.

Bibliographie

- ADELMAN, Frank L., 1972. Review of *The Entropy Law and the Economic Process*, by Nicholas Georgescu-Roegen. *Journal of Economic Literature*, 10(2):458–460.
- ADELMAN, Irma et ADELMAN, Frank L., 1959. The Dynamic Properties of the Klein-Goldberger Model. *Econometrica*, 27(4):596–625.
- AKERMAN, Johan, 1933. Knut Wicksell, A Pioneer of Econometrics. *Econometrica*, 1(2):113–118.
- AKHABBAR, Amanar, 2019. *Wassily Leontief et la science économique*. ENS Éditions, Lyon.
- AKHABBAR, Amanar et LALLEMENT, Jérôme, 2010. Wassily Leontief and Léon Walras: The Production as a Circular Flow. *Working Paper MPRA*.
- ALLEN, Robert, (dir.), 1980. *World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Gland, CH.
- ALLEN, Roy G. D., 1938. *Mathematical Analysis for Economists*. Macmillan, London.
- AMERICAN ECONOMIC ASSOCIATION, 1972. Nicholas Georgescu-Roegen: Distinguished Fellow 1971. *The American Economic Review*, 62(3).
- APOSTOLAKIS, Bobby E., 1990. Energy-Capital Substitutability/ Complementarity: The Dichotomy. *Energy Economics*, 12(1):48–58.
- ARROW, Kenneth, BOLIN, Bert, COSTANZA, Robert, DASGUPTA, Partha, FOLKE, Carl, HOLLING, Crawford S., JANSSON, Bengt-Owe, LEVIN, Simon, MÄLER, Karl-Göran, PERRINGS, Charles et PIMENTEL, David, 1995. Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment. *Science*, 268(5210):520–521.
- ARROW, K. J., CHENERY, H. B., MINHAS, B. S. et SOLOW, R. M., 1961. Capital-Labor Substitution and Economic Efficiency. *The Review of Economics and Statistics*, 43(3):225–250.
- ARROW, Kenneth J. et DEBREU, Gerard, 1954. Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. *Econometrica*, 22(3):265–290.

- AUMANN, Robert J., 1964. Markets with a Continuum of Traders. *Econometrica*, 32(1/2): 39–50.
- AYDINONAT, N. Emrah, 2018a. The Diversity of Models as a Means to Better Explanations in Economics. *Journal of Economic Methodology*, 25(3):237–251.
- AYDINONAT, N. Emrah, 2018b. Philosophy of Economics Rules: Introduction to the Symposium. *Journal of Economic Methodology*, 25(3):211–217.
- AYRES, Robert U., 1978. *Resources, Environment, and Economics: Epplications of the Materials/Energy Balance Principle*. John Wiley & Sons, New York.
- AYRES, Robert U., 1989. Industrial Metabolism. *In Technology and Environment*. National Academy Press, Washington, DC, pages 23–49.
- AYRES, Robert U., 1993. Cowboys, Cornucopians and Long-Run Sustainability. *Ecological Economics*, 8(3):189–207.
- AYRES, Robert U., 1994. *Information, Entropy, and Progress : A New Evolutionary Paradigm*. American Institute of Physics Press, New York.
- AYRES, Robert U., 1995. Economic Growth: Politically Necessary but not Environmentally Friendly. *Ecological Economics*, 15(2):97–99.
- AYRES, Robert U., 1996. Limits to the Growth Paradigm. *Ecological Economics*, 19(2): 117–134.
- AYRES, Robert U., 1997a. Comments on Georgescu-Roegen. *Ecological Economics*, 22(3):285–287.
- AYRES, Robert U., 1997b. Metals Recycling: Economic and Environmental Implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(3):145–173.
- AYRES, Robert U., 1998. Eco-Thermodynamics: Economics and the Second Law. *Ecological Economics*, 26(2):189–209.
- AYRES, Robert U., 1999. The Second Law, the Fourth Law, Recycling and Limits to Growth. *Ecological Economics*, 29(3):473–483.
- AYRES, Robert U., 2001. The Minimum Complexity of Endogenous Growth Models: The Role of Physical Resource Flows. *Energy*, 26(9):817–838.
- AYRES, Robert U., 2007. On the Practical Limits to Substitution. *Ecological Economics*, 61(1):115–128.
- AYRES, Robert U. et AYRES, Leslie W., 1996. *Industrial Ecology: Closing the Materials Cycle*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- AYRES, Robert U., AYRES, Leslie W. et WARR, Benjamin, 2003. Exergy, Power and Work in the US Economy, 1900-1998. *Energy*, 28(3):219–273.

- AYRES, Robert U. et KNEESE, Allen V., 1969. Production, Consumption, and Externalities. *American Economic Review*, 59(3):282.
- AYRES, Robert U. et MILLER, Steven M., 1980. The Role of Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 7(4):353–371.
- AYRES, Robert U. et NAIR, Indira, 1984. Thermodynamics and Economics. *Physics Today*, 37(11):62–71.
- AYRES, Robert U. et SIMONIS, Udo Ernst, 1994. *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. United Nations University Press, Tokyo.
- AYRES, Robert U. et VOUDOURIS, Vlasios, 2014. The Economic Growth Enigma: Capital, Labour and Useful Energy? *Energy Policy*, 64:16–28.
- AYRES, Robert U. et WARR, Benjamin, 2005. Accounting for Growth: The Role of Physical Work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(2):181–209.
- AYRES, Robert U. et WARR, Benjamin, 2009. *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- BACKHOUSE, Roger E., 1998. The Transformation of U.S. Economics, 1920-1960, Viewed through a Survey of Journal Articles. *History of Political Economy*, 30(Suppl_1):85–107.
- BACKHOUSE, Roger E., 2001. How and Why Should We Write the History of Twentieth-Century Economics? *Journal of the History of economic Thought*, 23(2):243–251.
- BACKHOUSE, Roger E. et CHERRIER, Béatrice, 2017. The Age of the Applied Economist: The Transformation of Economics since the 1970s. *History of Political Economy*, 49(Suppl_1):1–33.
- BAILY, Martin Neil, HULTEN, Charles, CAMPBELL, David, BRESNAHAN, Timothy et CAVES, Richard E., 1992. Productivity Dynamics in Manufacturing Plants. *Brookings Papers on Economic Activity*, pages 187–267.
- BARDI, Ugo, 2009. Peak Oil: The Four Stages of a New Idea. *Energy*, 34(3):323–326.
- BARNETT, H. J. et MORSE, C., 1963. *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*. Resources for the Future Press, Washington, DC.
- BAUMGÄRTNER, Stefan, 2004. The Inada Conditions for Material Resource Inputs Reconsidered. *Environmental & Resource Economics*, 29(3):307–322.
- BAUMGÄRTNER, Stefan, 2005. Temporal and Thermodynamic Irreversibility in Production Theory. *Economic Theory*, 26(3):725–728.

- BAUMGÄRTNER, Stefan, BECKER, Christian, FRANK, Karin, MÜLLER, Birgit et QUAAS, Martin, 2008. Relating the Philosophy and Practice of Ecological Economics: The Role of Concepts, Models, and Case Studies in Inter- and Transdisciplinary Sustainability Research. *Ecological Economics*, 67(3):384–393.
- BEARD, Thomas R. et LOZADA, Gabriel A., 1999. *Economics, Entropy and the Environment: The Extraordinary Economics of Nicholas Georgescu-Roegen*. Edward Elgar Publishing, Northampton, MA.
- BELL, Frederick W., 1965. A Note on the Empirical Estimation of the CES Production Function with the use of Capital Data. *The Review of Economics and Statistics*, 47(3):328–330.
- BENCHEKROUN, Hassan et WITHAGEN, Cees, 2011. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources: A Complete Characterization. *Resource and Energy Economics*, 33(3):612–636.
- BERNDT, Ernst R., 1976. Reconciling Alternative Estimates of the Elasticity of Substitution. *The Review of Economics and Statistics*, 58(1):59–68.
- BERNDT, Ernst R. et CHRISTENSEN, Laurits R., 1973. The Translog Function and the Substitution of Equipment, Structures, and Labor in U.S. Manufacturing 1929–68. *Journal of Econometrics*, 1(1):81–113.
- BERNDT, Ernst R. et WOOD, David O., 1975. Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy. *The Review of Economics and Statistics*, 57(3):259–268.
- BERNDT, Ernst R. et WOOD, David O., 1979. Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity. *The American Economic Review*, 69(3):342–354.
- BERNDT, Ernst R. et WOOD, David O., 1981. Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity: Reply and Further Results. *The American Economic Review*, 71(5):1105–1110.
- BIDARD, Christian et ERREYERS, Guido, 2001. The Corn-Guano Model. *Metroeconomica*, 52(3):243–253.
- BLACKORBY, Charles et RUSSELL, R. Robert, 1981. The Morishima Elasticity of Substitution; Symmetry, Constancy, Separability, and its Relationship to the Hicks and Allen Elasticities. *The Review of Economic Studies*, 48(1):147–158.
- BLACKORBY, Charles et RUSSELL, R. Robert, 1989. Will the Real Elasticity of Substitution Please Stand Up? (A Comparison of the Allen/Uzawa and Morishima Elasticities). *The American Economic Review*, 79(4):882–888.
- BLAUG, Mark, 1990. On the Historiography of Economics. *Journal of the History of Economic Thought*, 12(1):27–37.

- BLAUG, Mark, 2003. The Formalist Revolution of the 1950s. *Journal of the History of Economic Thought*, 25(2):145–156.
- BLOOR, David, 1976. *Knowledge and Social Imagery*. Routledge, London.
- BOBULESCU, Roxana, 2012. The Making of a Schumpeterian Economist: Nicholas Georgescu-Roegen. *European Journal of the History of Economic Thought*, 19(4):625–651.
- BOBULESCU, Roxana, 2013. L'expérience roumaine et son influence sur la pensée de Nicolas Georgescu-Roegen. *Economies et sociétés*, 47(10):1753–1775.
- BOBULESCU, Roxana, 2015. From Lotka's Biophysics to Georgescu-Roegen's Bioeconomics. *Ecological Economics*, 120:194–202.
- BOIANOVSKY, Mauro et HOOVER, Kevin D., 2009. The Neoclassical Growth Model and Twentieth-Century Economics. *History of Political Economy*, 41:1–23.
- BOULDING, Kenneth E., 1950. *A Reconstruction of Economics*. John Wiley & Sons, New York.
- BOULDING, Kenneth E., 1966. The Economics of the Coming Spaceship Earth. In JARRETT, Henry, (dir.) : *Environmental Quality Issues in a Growing Economy*. Johns Hopkins Press, Baltimore, MD, pages 3–14.
- BOULDING, Kenneth E., 1972. Search for Time's Arrow. *Science*, 175(4026):1099–1100.
- BOUMANS, Marcel, 2004. *How Economists Model the World Into Numbers*. Routledge, London.
- BROWN, Donald J. et ROBINSON, Abraham, 1972. A Limit Theorem on the Cores of Large Standard Exchange Economies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69(5):1258–1260.
- BRUNDTLAND, Gro Harlem, 1987. *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press, Oxford.
- BRUNO, Michael et SACHS, Jeffrey, 1982. Input Price Shocks and the Slowdown in Economic Growth: The Case of U.K. Manufacturing. *The Review of Economic Studies*, 49(5):679–705.
- BULLARD, Clark W. et HERENDEEN, Robert A., 1975. The Energy Cost of Goods and Services. *Energy Policy*, 3(4):268–278.
- BURBIDGE, John et HARRISON, Alan, 1984. Testing for the Effects of Oil-Price Rises using Vector Autoregressions. *International Economic Review*, 25(2):459–484.
- CALDWELL, Bruce J., 1980. Positivist Philosophy of Science and the Methodology of Economics. *Journal of Economic Issues*, 14(1):53–76.

- CALLEN, Herbert B., 1985. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. John Wiley & Sons, New York, 2^e édition.
- CARNOT, Sadi, 1824. *Réflexions sur le puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier, Paris.
- CASTLE, Emery N., 1997. A Comment on Georgescu-Roegen, Daly, Solow and Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):305–306.
- CHAPMAN, Peter F., 1974. Energy Costs: A Review of Methods. *Energy policy*, 2(2):91–103.
- CHERRIER, Beatrice, 2014. Toward a History of Economics at Mit, 1940-72. *History of Political Economy*, 46(supp.):15–44.
- CHRISTENSEN, Laurits R., JORGENSEN, Dale W. et LAU, Lawrence J., 1973. Transcendental Logarithmic Production Frontiers. *The Review of Economics and Statistics*, 55(1):28–45.
- CHRISTENSEN, Paul P., 1989. Historical Roots for Ecological Economics – Biophysical versus Allocative Approaches. *Ecological Economics*, 1(1):17–36.
- CLARK, Colin W., 1997. Renewable Resources and Economic Growth. *Ecological Economics*, 22(3):275–276.
- CLARK, John B., 1889. The Possibility of a Scientific Law of Wages. *Publications of the American Economic Association*, 4(1):39–69.
- CLAUSIUS, Rudolf, 1867. *The Mechanical Theory of Heat: With Its Applications to the Steam-engine and to the Physical Properties of Bodies*. J. Van Voorst, London.
- CLEVELAND, Cutler J., 1987. Biophysical Economics: Historical Perspective and Current Research Trends. *Ecological Modelling*, 38(1):47–73.
- CLEVELAND, Cutler J., COSTANZA, Robert, HALL, Charles A. S. et KAUFMANN, Robert K., 1984. Energy and the U. S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*, 225:890–897.
- CLEVELAND, Cutler J., KAUFMANN, Robert K. et STERN, David I., 2000. Aggregation and the Role of Energy in the Economy. *Ecological Economics*, 32(2):301–317.
- 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 Economics. *Ecological Economics*, 22(3):203–223.
- COBB, Charles W. et DOUGLAS, Paul H., 1928. A Theory of Production. *The American Economic Review*, 18(1):139–165.

- COHEN, Avi J. et HARCOURT, G. C., 2003. Retrospectives: Whatever Happened to the Cambridge Capital Theory Controversies? *The Journal of Economic Perspectives*, 17(1):199–214.
- COMMON, Mick, 1997. Is Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz the Important Point? *Ecological Economics*, 22(3):277–279.
- COSTANZA, Robert, 1980. Embodied Energy and Economic Valuation. *Science*, 210(4475):1219–1224.
- COSTANZA, Robert, CUMBERLAND, John H., DALY, Herman, GOODLAND, Robert et NORGAARD, Richard B., 1997. *An Introduction to Ecological Economics*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- COSTANZA, Robert, STERN, David, FISHER, Brendan, HE, Lining et MA, Chunbo, 2004. Influential Publications in Ecological Economics: A Citation Analysis. *Ecological Economics*, 50(3):261–292.
- COT, Annie L. et LALLEMENT, Jérôme, 1996. The Historiography of Economics: A Methodological Approach. In MOSS, Laurence S., (dir.) : *Joseph A. Schumpeter, Historian of Economics: Perspectives on the History of Economic Thought*. Routledge, London, pages 44–59.
- COUX, Quentin, 2019. Natural Resources in the Theory of Production: The Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Controversy. *The European Journal of the History of Economic Thought*, 26(6):1341–1378.
- COURT, Victor, 2018. Energy Capture, Technological Change, and Economic Growth: An Evolutionary Perspective. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 3(3).
- CRAFTS, Nicholas, 2009. Solow and Growth Accounting: A Perspective from Quantitative Economic History. *History of Political Economy*, 41(Suppl_1):200–220.
- da COSTA, Newton et FRENCH, Steven, 2000. Models, Theories, and Structures: Thirty Years on. *Philosophy of Science*, 67:S116–S127.
- DALY, Herman E., 1968. On Economics as a Life Science. *Journal of Political Economy*, 76(3):392–406.
- DALY, Herman E., 1974. The Economics of the Steady State. *The American Economic Review*, 64(2):15–21.
- DALY, Herman E., 1977a. Steady State and Thermodynamics. *BioScience*, 27(12):770–771.
- DALY, Herman E., 1977b. *Steady-State Economics*. Island Press, Washington, DC.

- DALY, Herman E., 1979. Entropy, Growth, and the Political Economy of Scarcity. In SMITH, Kerry V., (dir.) : *Scarcity and Growth Reconsidered*. Resources for the Future Press, New York, pages 67–94.
- DALY, Herman E., 1985. The Circular Flow of Exchange Value and the Linear Throughput of Matter-Energy: A Case of Misplaced Concreteness. *Review of Social Economy*, 43(3):279–297.
- DALY, Herman E., 1987. The Economic Growth Debate: What Some Economists Have Learned but many Have Not. *Journal of Environmental Economics and Management*, 14(4):323–336.
- DALY, Herman E., 1990. Toward some Operational Principles of Sustainable Development. *Ecological Economics*, 2(1):1–6.
- DALY, Herman E., 1995. On Nicholas Georgescu-Roegen's Contributions to Economics: An Obituary Essay. *Ecological Economics*, 13(3):149–154.
- DALY, Herman E., 1997a. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):261–266.
- DALY, Herman E., 1997b. Introduction. *Ecological Economics*, 22(3):173.
- DALY, Herman E., 1997c. Reply to Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):271–273.
- DANTZIG, George Bernard, 1953. *Notes on Linear Programming*. RAND Corporation, Santa Monica, CA.
- DANTZIG, George Bernard, 1963. *Linear Programming and Extensions*. RAND Corporation, Santa Monica, CA.
- DARBY, Michael R., 1982. The Price of Oil and World Inflation and Recession. *The American Economic Review*, 72(4):738–751.
- DASCAL, Marcelo, 1998. The Study of Controversies and the Theory and History of Science. *Science in Context*, 11(2):147–154.
- DASGUPTA, Partha S. et HEAL, Geoffrey M., 1974. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*, 41:3–28.
- DAVID, Paul A. et KLUNDERT, Th. van de, 1965. Biased Efficiency Growth and Capital-Labor Substitution in the U.S., 1899-1960. *The American Economic Review*, 55(3):357–394.
- de CARVALHO, André et SUPRINYAK, Carlos, 2019. An Emigrant Economist in the Tropics: Nicholas Georgescu-Roegen on Brazilian Inflation and Development. *Working Paper Cedeplar*.

- DENISON, Edward Fulton, 1962. *The Sources of Economic Growth in the United States and the Alternatives Before Us*. Committee for Economic Development, New York.
- DENISON, Edward Fulton, 1979a. *Accounting for Slower Economic Growth: The United States in the 1970's*. Brookings Institution Press, Washington, DC.
- DENISON, Edward Fulton, 1979b. Explanations of Declining Productivity Growth. *Survey of Current Business*, 59(8):1–24.
- DESROSIÈRES, Alain, 1993. *La politique des grands nombres: histoire de la raison statistique*. La découverte, Paris.
- DISSOU, Yazid, KARNIZOVA, Lilia et SUN, Qian, 2015. Industry-level Econometric Estimates of Energy-Capital-Labor Substitution with a Nested CES Production Function. *Atlantic Economic Journal*, 43(1):107–121.
- DORFMAN, Robert, SAMUELSON, Paul Anthony et SOLOW, Robert M., 1958. *Linear Programming and Economic Analysis*. Dover Publications, New York.
- DÜPPE, Till et WEINTRAUB, E. Roy, 2014. Siting the New Economic Science: The Cowles Commission's Activity Analysis Conference of June 1949. *Science in Context*, 27(3):453–483.
- ECKSTEIN, Otto, 1978. *The Great Recession, With a Postscript on Stagflation*. North-Holland Publishing, Amsterdam.
- EDDINGTON, Arthur S., 1928. *The Nature of the Physical World*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ERREYGERS, Guido, 2009. Hotelling, Rawls, Solow: How Exhaustible Resources Came to Be Integrated into the Neoclassical Growth Model. *History of Political Economy*, 41(Suppl_1):263–281.
- FAUCETT, Jack, 1973. *Data Development for the I-O Energy Model, Final Report to the Energy Policy Project*. Ford Foundation, Washington, DC.
- FELIPE, Jesus et FISHER, Franklin M., 2003. Aggregation in Production Functions: What Applied Economists should Know. *Metroeconomica*, 54(2-3):208–262.
- FELIPE, Jesus et MCCOMBIE, John S. L., 2013. *The Aggregate Production Function and the Measurement of Technical Change: Not Even Wrong*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- FERGUSON, C. E., 1963. Cross-Section Production Functions and the Elasticity of Substitution in American Manufacturing Industry. *The Review of Economics and Statistics*, 45(3):305–313.
- FERRARI, Sylvie, 2015. Foundations and Bioeconomic Issues of Sustainability: The Contribution of Nicholas Georgescu-Roegen. *Cahiers du GREThA*.

- FISCHER-KOWALSKI, Marina, 1998. Society's Metabolism : The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1):61–78.
- FISCHER-KOWALSKI, Marina et HÜTTLER, Walter, 1998. Society's Metabolism : The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology*, 2(4):107–136.
- FISHER, Franklin M., 1969. The Existence of Aggregate Production Functions. *Econometrica*, pages 553–577.
- FONTANA, Magda, 2006. Simulation in Economics: Evidence on Diffusion and Communication. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(2).
- FRANCO, Marco Paulo Vianna, 2018. Searching for a Scientific Paradigm in Ecological Economics: The History of Ecological Economic Thought, 1880s-1930s. *Ecological Economics*, 153:195–203.
- FRENCH, Steven et LADYMAN, James, 1999. Reinflating the Semantic Approach. *International Studies in the Philosophy of Science*, 13(2):103–121.
- FRIEDMAN, Milton, 1953. The Methodology of Positive Economics. In *Essays in Positive Economics*. University of Chicago Press, Chicago.
- FRISCH, Ragnar, 1970. Econometrics in the World of Today. In ELTIS, Walter A., SCOTT, Maurice F. G. et WOLFE, James N., (dir.) : *Induction, Growth and Trade: Essays in Honour of Sir Roy Harrod*. Clarendon Press, Oxford, pages 152–166.
- FRONDEL, Manuel et SCHMIDT, Christoph M., 2002. The Capital-Energy Controversy: An Artifact of Cost Shares? *The Energy Journal*, 23(3):53–79.
- FUNTOWICZ, Silvio O. et RAVETZ, Jerome R., 1994. The Worth of a Songbird: Ecological Economics as a Post-normal Science. *Ecological Economics*, 10(3):197–207.
- FUSS, Melvyn A., 2017. Production and Cost Functions. In *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan, London.
- GADDY, Clifford G., 1993. Remaking the Mathematician as an Economist: Knut Wicksell and the Mittag-Leffler Circle. *History of Political Economy*, 25(Suppl_1):175–201.
- GALE, David, 1960. *The Theory of Linear Economic Models*. University of Chicago press, Chicago.
- GALOR, Oded, 2011. *Unified Growth Theory*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1930. Le problème de la recherche des composantes cycliques d'un phénomène. *Journal de la société française de statistique*, 71:217–264.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1930-1994. Papers. David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library, Duke University, Durham, NC.

- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1935a. Fixed Coefficients of Production and the Marginal Productivity Theory. *The Review of Economic Studies*, 3(1):40–49.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1935b. Note on a Proposition of Pareto. *The Quarterly Journal of Economics*, 49(4):706–714.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1936. The Pure Theory of Consumer's Behavior. *The Quarterly Journal of Economics*, 50(4):545–593.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1950a. Leontief's System in the Light of Recent Results. *The Review of Economics and Statistics*, 32(3):214–222.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1950b. The Theory of Choice and the Constancy of Economic Laws. *The Quarterly Journal of Economics*, 64(1):125–138.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1951a. Relaxation Phenomena in Linear Dynamic Models. In KOOPMANS, Tjalling, (dir.) : *Activity Analysis of Production and Allocation*. John Wiley & Sons, New York, pages 116–131.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1951b. Some Properties of a Generalized Leontief Model. In KOOPMANS, Tjalling, (dir.) : *Activity Analysis of Production and Allocation*. John Wiley & Sons, New York, pages 165–173.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1954. Choice, Expectations and Measurability. *The Quarterly Journal of Economics*, 68(4):503–534.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1958a. The Nature of Expectation and Uncertainty. In BOWMAN, Mary J., (dir.) : *Expectations, Uncertainty and Business Behaviour*. Social Science Research Council, New York, pages 11–29.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1958b. Threshold in Choice and the Theory of Demand. *Econometrica*, 26(1):157–168.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1960a. Economic Theory and Agrarian Economics. *Oxford Economic Papers*, 12(1):1–40.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1960b. Mathematical Proofs of the Breakdown of Capitalism. *Econometrica*, 28(2):225–243.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1966a. *Analytical Economics: Issues and Problems*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1966b. Limitationality, Limitativeness, and Economic Equilibrium. In *Analytical Economics : Issues and Problems*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1969. Process in Farming versus Process in Manufacturing: A Problem of Balanced Development. In PAPI, Ugo et NUNN, Charles, (dir.) : *Economic Problems of Agriculture in Industrial Societies*. Springer, Dordrecht, pages 497–533.

- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1970. The Economics of Production. *American Economic Review*, 60(2):1–9.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1972. Process Analysis and the Neoclassical Theory of Production. *American Journal of Agricultural Economics*, 54(2):279–294.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1975. Energy and Economic Myths. *Southern Economic Journal*, 41(3):347–381.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1976a. Dynamic Models and Economic Growth. In *Energy and Economic Myths: Institutional and Analytical Economic Essays*. Pergamon Press, New York, pages 235–253.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1976b. Further Thoughts on Corrado Gini's Dellusioni dell'econometria. In *Energy and Economic Myths: Institutional and Analytical Economic Essays*. Pergamon Press, New York, pages 255–271.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1976c. Structural Inflation-Lock and Balanced Growth. In *Energy and Economic Myths: Institutional and Analytical Economic Essays*. Pergamon Press, New York, pages 149–197. Published for the first time in 1970, in *Économie et société*.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1977a. The Steady State and Ecological Salvation: A Thermodynamic Analysis. *BioScience*, 27(4):266–270.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1977b. What Thermodynamics and Biology Can Teach Economists. *Atlantic Economic Journal*, 5(1):13–21.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1978a. De la science économique à la bioéconomie. *Revue d'économie politique*, 88(3):337–382.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1978b. Technology Assessment: The Case of the Direct Use of Solar Energy. *Atlantic Economic Journal*, 6(4):15–21.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1979a. Comments on the Papers by Daly and Stiglitz. In SMITH, Kerry V., (dir.) : *Scarcity and Growth Reconsidered*. Resources for the Future Press, New York, pages 95–105.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1979b. *Demain la décroissance: entropie, écologie, économie*. Éditions Favre, Lausanne.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1979c. Energy Analysis and Economic Valuation. *Southern Economic Journal*, 45(4):1023–1058.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1979d. Methods in Economic Science. *Journal of Economic Issues*, 13(2):317–328.

- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1981. The Crisis of Natural Resources. *Challenge*, 24(1):50–56.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1982. La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine. *Economie appliquée*, 35(1-2):1–26.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1984. Feasible Recipes versus Viable Technologies. *Atlantic Economic Journal*, 12(1):21–31.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1986a. The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect. *Eastern Economic Journal*, 12(1):3–25.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1986b. Man and Production. In BARANZINI, Mauro L. et SCAZZIERI, Roberto, (dir.) : *Foundations of Economics*. Basil Blackwell, Oxford, pages 247–280.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1988. Closing Remarks: About Economic Growth - A Variation on a Theme by David Hilbert. *Economic Development and Cultural Change*, 36(3):S291–S307.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1989. An emigrant from a developing country: autobiographical notes I. In KREGEL, Jan Allen, (dir.) : *Recollections of Eminent Economists*. Springer, pages 99–127.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1992. Nicholas Georgescu-Roegen about Himself. In SZENBERG, Michael, (dir.) : *Eminent Economists: Their Life Philosophies*. Cambridge University Press, New York, pages 128–59.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1993. An Emigrant from a Developing Country: Autobiographical Notes II. *Banca Nazionale del Lavoro Quarterly Review*, 46(184).
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 2011. La dégradation entropique et la destinée prométhéenne de la technologie humaine. In *La décroissance*. Sang de la Terre, Paris, 3ème édition.
- GERMAIN, Marc, 2019. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz: Back to a Controversy. *Ecological Economics*, 160:168–182.
- GIAMPIETRO, Mario et MAYUMI, Kozo, 2000. Multiple-Scale Integrated Assessments of Societal Metabolism: Integrating Biophysical and Economic Representations Across Scales. *Population and Environment*, 22(2):155–210.
- GIAMPIETRO, Mario, MAYUMI, Kozo et RAMOS-MARTIN, Jesus, 2009. Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM): Theoretical Concepts and Basic Rationale. *Energy*, 34(3):313–322.
- GIERE, Ronald N., 2004. How Models Are Used to Represent Reality. *Philosophy of Science*, 71(5):742–752.

- GILLILAND, Martha W., 1975. Energy Analysis and Public Policy. *Science*, 189(4208): 1051–1056.
- GOUTSMEDT, Aurélien, 2017. *Les macroéconomistes et la stagflation : essais sur les transformations de la macroéconomie dans les années 1970*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.
- GOUTSMEDT, Aurélien, 2020. The Second Life of Stagflation: A History of Macroeconomists' Explanations of the US Stagflation. *Working Paper*.
- GOUTSMEDT, Aurélien, PINZÓN-FUCHS, Erich, RENAULT, Matthieu et SERGI, Francesco, 2019. Reacting to the Lucas Critique: The Keynesians' Replies. *History of Political Economy*, 51(3):535–556.
- GOWDY, John et MESNER, Susan, 1998. The Evolution of Georgescu-Roegen's Bioeconomics. *Review of Social Economy*, 56(2):136–156.
- GREEN, M. J., 1974. Revue de The Entropy Law and the Economic Process, par Nicholas Georgescu-Roegen. *Revue économique*, 25(5):842–844.
- GRIFFIN, James M., 1981. Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity: Comment. *The American Economic Review*, 71(5):1100–1104.
- GRIFFIN, James M., 1995. Methodological Advances in Energy Modelling: 1970-90. In *Models for Energy Policy*. Routledge, London, pages 28–35.
- GRIFFIN, James M. et GREGORY, Paul R., 1976. An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses. *The American Economic Review*, 66(5):845–857.
- GUITTON, Henri, 1972. Economie et entropie. Revue de The Entropy Law and the Economic Process, par Nicholas Georgescu-Roegen. *Revue d'économie politique*, 82(6): 1184–1187.
- HAGEMANN, Harald, 2011. European émigrés and the 'Americanization' of Economics. *The European Journal of the History of Economic Thought*, 18(5):643–671.
- HALL, Charles, LAVINE, Mitchell et SLOANE, Joanna, 1979. Efficiency of Energy Delivery Systems: I. An Economic and Energy Analysis. *Environmental Management*, 3(6):493–504.
- HALL, Charles AS et CLEVELAND, Cutler J., 1981. Petroleum Drilling and Production in the United States: Yield per Effort and Net Energy Analysis. *Science*, 211(4482):576–579.
- HALSMAYER, Verena, 2014. From Exploratory Modeling to Technical Expertise: Solow's Growth Model as a Multipurpose Design. *History of Political Economy*, 46:229–251.

- HALSMAYER, Verena et HOOVER, Kevin D., 2016. Solow's Harrod: Transforming Macroeconomic Dynamics into a Model of Long-Run Growth. *The European Journal of the History of Economic Thought*, 23(4):561–596.
- HAMILTON, James D., 1983. Oil and the Macroeconomy since World War II. *Journal of political economy*, 91(2):228–248.
- HANDS, D. W., 2006. Integrability, Rationalizability, and Path-Dependency in the History of Demand Theory. *History of Political Economy*, 38(Suppl 1):153–185.
- HANNON, Bruce, 2010. The Role of Input-Output Analysis of Energy and Ecologic Systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1):30–38.
- HARCOURT, G. C., 1969. Some Cambridge Controversies in the Theory of Capital. *Journal of Economic Literature*, 7(2):369–405.
- HAUSMAN, Daniel M., (dir.), 2007. *The Philosophy of Economics: An Anthology*. Cambridge University Press, New York, 3 édition.
- HAWKINS, David et SIMON, Herbert A., 1949. Note: Some Conditions of Macroeconomic Stability. *Econometrica*, 17(3/4):245–248.
- HEINZEL, Christoph, 2013. Schumpeter and Georgescu-Roegen on the Foundations of an Evolutionary Analysis. *Cambridge Journal of Economics*, 37(2):251–271.
- HICKS, John, 1932. *The Theory of Wages*. Macmillan, London.
- HICKS, John et HOLLANDER, Samuel, 1977. Mr. Ricardo and the Moderns. *The Quarterly Journal of Economics*, 91(3):351–369.
- HIRSCH HADORN, Gertrude, BRADLEY, David, POHL, Christian, RIST, Stephan et WIESMANN, Urs, 2006. Implications of Transdisciplinarity for Sustainability Research. *Ecological Economics*, 60(1):119–128.
- HODGSON, Geoffrey M., (dir.), 1998. *The Foundations of Evolutionary Economics: 1890-1973*. Edward Elgar Publishing, Northampton, MA.
- HOGAN, William W., MANNE, A. S. et HITCH, Charles J., 1977. Energy-Economy Interactions: The Fable of the Elephant and the Rabbit? *In Modeling Energy-Economy Interactions: Five Approaches*. Resources for the Future Press, Washington, DC.
- HOTELLING, Harold, 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2):137–175.
- HOUSCADE, Jean-Charles, GRUBB, Michael et MÉJEAN, Aurélie, 2015. The 'Dark Matter' in the Search for Sustainable Growth: Energy, Innovation and the Financially Paradoxical Role of Climate Confidence. *In ARESTIS, Philip et SAWYER, Malcolm, (dir.) : Finance and the Macroeconomics of Environmental Policies*. Palgrave Macmillan, London, pages 233–271.

- HOURCADE, Jean Charles, SASSI, Olivier, CRASSOUS, Renaud, GITZ, Vincent, WAISMAN, Henri et GUIVARCH, Céline, 2010. IMACLIM-R: A Modelling Framework to Simulate Sustainable Development Pathways. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1/2):5–24.
- HUDSON, Edward A. et JORGENSEN, Dale W., 1974. US Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000. *Bell Journal of Economics*, 5(2):461–514.
- HUDSON, Edward A. et JORGENSEN, Dale W., 1978. Energy Policy and U.S. Economic Growth. *The American Economic Review*, 68(2):118–123.
- HUETTNER, David A., 1976. Net Energy Analysis: An Economic Assessment. *Science*, 192(4235):101–104.
- HUMPHREY, Thomas M., 1997. Algebraic Production Functions and their Uses Before Cobb-Douglas. *FRB Richmond Economic Quarterly*, 83(1):51–83.
- ISARD, Walter, BASSETT, Kenneth, CHOGUILL, Charles, FURTADO, John, IZUMITA, Ronald, KISSIN, John, ROMANOFF, Eliahu, SEYFARTH, Richard et TATLOCK, Richard, 1968. On the Likage of Socio-economic and Ecologic Systems. *Papers of the Regional Science Association*, 21(1):79–99.
- JAHN, Thomas, BERGMANN, Matthias et KEIL, Florian, 2012. Transdisciplinarity: Between Mainstreaming and Marginalization. *Ecological Economics*, 79:1–10.
- JEVONS, William Stanley, 1865. *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-Mines*. Macmillan, London.
- JEVONS, William Stanley, 1871. *The Theory of Political Economy*. Macmillan, London.
- JORGENSEN, Dale W., 1984. The Role of Energy in Productivity Growth. *The Energy Journal*, 5(3):11–26.
- JORGENSEN, Dale W., BERNDT, Ernst R., CHRISTENSEN, Laurits R. et HUDSON, Edward A., 1973. *Energy Resources and Economic Growth, Final Report to the Energy Policy Project*. Ford Foundation, Washington, DC.
- JORGENSEN, Dale W. et GRILICHES, Zvi, 1967. The Explanation of Productivity Change. *Review of Economic Studies*, 34(3):249–283.
- KEEN, Steve, AYRES, Robert U. et STANDISH, Russell, 2019. A Note on the Role of Energy in Production. *Ecological Economics*, 157:40–46.
- KEYNES, John Maynard, 1936. *The General Theory of Employment, Interest, and Money*. Palgrave Macmillan, London.
- KHAN, Mohammed, 2014. Representation, Language, and Theory: Georgescu-Roegen on Methods in Economic Science. *Journal of Economic Issues*, 48(1):49–88.

- KIM, Jihyo et HEO, Eunnyeong, 2013. Asymmetric Substitutability Between Energy and Capital: Evidence from the Manufacturing Sectors in 10 OECD Countries. *Energy Economics*, 40:81–89.
- KLEIN, Julie Thompson, 2010. A Taxonomy of Interdisciplinarity. In KLEIN, Julie Thompson, MITCHAM, Carl et FRODEMAN, Robert, (dir.) : *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*. Oxford University Press, Oxford, pages 15–30.
- KLEIN, Lawrence R., 1978. The Supply Side. *The American Economic Review*, 68(1):1–7.
- KNEESE, Allen V., AYRES, Robert U. et D'ARGE, Ralph C., 1970. *Economics and the Environment: A Materials Balance Approach*. Johns Hopkins Press, Baltimore.
- KNUUTTILA, Tarja, 2005. Models, Representation, and Mediation. *Philosophy of Science*, 72(5):1260–1271.
- KOETSE, Mark J., de GROOT, Henri L. F. et FLORAX, Raymond J. G. M., 2008. Capital-Energy Substitution and Shifts in Factor Demand: A Meta-Analysis. *Energy Economics*, 30(5):2236–2251.
- KOOPMANS, Tjalling C., 1947. Measurement Without Theory. *The Review of Economics and Statistics*, 29(3):161–172.
- KOOPMANS, Tjalling C., 1949. Koopmans on the Choice of Variables to be Studied and the Methods of Measurement: A Reply. *The Review of Economics and Statistics*, 31(2):86–91.
- KOOPMANS, Tjalling C., (dir.), 1951. *Activity Analysis of Production and Allocation: Proceedings of a Conference*. John Wiley & Sons, New York.
- KOOPMANS, Tjalling C., 1957. *Three Essays on the State of Economic Science*. McGraw-Hill, New York.
- KOOPMANS, Tjalling C., TINBERGEN, Jan, GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas et ORCUTT, Guy H., 1952. Toward Partial Redirection of Econometrics: Comments. *The Review of Economics and Statistics*, 34(3):200–213.
- KRYSIAK, Frank C., 2006. Entropy, Limits to Growth, and the Prospects for Weak Sustainability. *Ecological Economics*, 58(1):182–191.
- KUHN, Thomas S., 1959. Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery. In CLAGETT, Marshall, (dir.) : *Critical Problems in the History of Science*. The University of Wisconsin Press, Madison, pages 321–356.
- KULA, Erhun, 2013. *History of Environmental Economic Thought*. Routledge, London.
- KÜMMEL, Reiner, 1982. The Impact of Energy on Industrial Growth. *Energy*, 7(2):189–203.

- KÜMMEL, Reiner, 1989. Energy as a Factor of Production and Entropy as a Pollution Indicator in Macroeconomic Modelling. *Ecological Economics*, 1(2):161–180.
- KÜMMEL, Reiner, 2011. *The Second Law of Economics: Energy, Entropy, and the Origins of Wealth*. Springer, Dordrecht.
- KÜMMEL, Reiner, AYRES, Robert U. et LINDENBERGER, Dietmar, 2010. Thermodynamic Laws, Economic Methods and the Productive Power of Energy. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 35(2):145–179.
- KÜMMEL, Reiner, HENN, Julian et LINDENBERGER, Dietmar, 2002. Capital, Labor, Energy and Creativity: Modeling Innovation Diffusion. *Structural Change and Economic Dynamics*, 13(4):415–433.
- KÜMMEL, Reiner, STRASSL, W., GOSSNER, A. et EICHHORN, W., 1985. Technical Progress and Energy Dependent Production Functions. *Zeitschrift für Nationalökonomie/Journal of Economics*, 45(3):285–311.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 1995. *Theory of Production: A Long-Period Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2000. 'Classical' Roots of Input-Output Analysis: A Short Account of its Long Prehistory. *Economic Systems Research*, 12(2):153–179.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2001a. Classical Economics and the Problem of Exhaustible Resources. *Metroeconomica*, 52(3):282–296.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2001b. Sraffa and von Neumann. *Review of Political Economy*, 13(2):161–180.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2003. Fund-Flow versus Flow-Flow in Production Theory: Reflections on Georgescu-Roegen's Contribution. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 51(4):487–505.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2004. Von Neumann, the Classical Economists and Arrow-Debreu. *Acta Oeconomica*, 54(1):39–62.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2005. Representing the Production and Circulation of Commodities in Material Terms: On Sraffa's Objectivism. *Review of Political Economy*, 17(3):413–441.
- KURZ, Heinz D. et SALVADORI, Neri, 2006. Input-Output Analysis from a Wider Perspective: A Comparison of the Early Works of Leontief and Sraffa. *Economic Systems Research*, 18(4):373–390.
- LAPIDUS, André, 1996. Introduction à une Histoire de la pensée économique qui ne verra jamais le jour. *Revue économique*, 47(4):867–892.

- LEFÈVRE, Julien, 2016. *Hybridization Challenges in Energy-Economy Integrated Models and Representation of the Low Carbon Transition: An Application to the Brazilian Case*. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, Paris.
- LENFANT, Jean-Sébastien, 2012. Indifference Curves and the Ordinalist Revolution. *History of Political Economy*, 44(1):113–155.
- LEONTIEF, Wassily W., 1928. Die wirtschaft als kreislauf. *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik*, 60:577–623.
- LEONTIEF, Wassily W., 1936. Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 18(3):105–125.
- LEONTIEF, Wassily W., 1937. Interrelation of Prices, Output, Savings, and Investment. *The Review of Economics and Statistics*, 19(3):109–132.
- LEONTIEF, Wassily W., 1970. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3):262–271.
- LEONTIEF, Wassily W., 1971. Theoretical Assumptions and Nonobserved Facts. *American Economic Review*, 61(1):1–7.
- 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*, 69(11):2271–2278.
- LEVHARI, David et SAMUELSON, Paul A., 1966. The Nonswitching Theorem is False. *Quarterly Journal of Economics*, 80(4):503–517.
- LICHNEROWICZ, Marc et LICHNEROWICZ, A., 1971. économie et thermodynamique: un modèle d'échange économique. *Economies et Sociétés*, 5:47–59.
- LINDENBERGER, Dietmar et KÜMMEL, Reiner, 2011. Energy and the State of Nations. *Energy*, 36(10):6010–6018.
- LINDENBERGER, Dietmar, WEISER, Florian, WINKLER, Tobias et KÜMMEL, Reiner, 2017. Economic Growth in the USA and Germany 1960-2013: The Underestimated Role of Energy. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2(3).
- LOCQUENEUX, Robert, 2009. *Histoire de la thermodynamique classique : de Sadi Carnot à Gibbs*. Collection Belin sup. Belin, Paris. couv. ill. en coul. 24 cm. La page de titre porte en plus : "sciences. Bibliogr. 409-414. Index.
- LOZADA, Gabriel A., 1999. The Role of Entropy and Energy in Natural Resource Economics. In MAYUMI, Kozo et GOWDY, John M., (dir.) : *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, pages 326–351.

- MA, Hengyun, OXLEY, Les, GIBSON, John et KIM, Bonggeun, 2008. China's Energy Economy: Technical Change, Factor Demand and Interfactor/Interfuel Substitution. *Energy Economics*, 30(5):2167–2183.
- MÄKI, Uskali, 2009a. Economics Imperialism: Concept and Constraints. *Philosophy of the Social Sciences*, 39(3):351–380.
- MÄKI, Uskali, 2009b. *The Methodology of Positive Economics: Reflections on the Milton Friedman Legacy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MÄKI, Uskali, 2009c. Missing the World. Models as Isolations and Credible Surrogate Systems. *Erkenntnis*, 70(1):29–43.
- MÄKI, Uskali, 2011. Models and the Locus of their Truth. *Synthese*, 180(1):47–63.
- MÄKI, Uskali, 2012. Realism and Antirealism about Economics. In MÄKI, Uskali, (dir.) : *Philosophy of Economics*. Elsevier, Amsterdam, volume 13 de Handbook of the Philosophy of Science, pages 3–24.
- MÄKI, Uskali, 2013. Scientific Imperialism: Difficulties in Definition, Identification, and Assessment. *International Studies in the Philosophy of Science*, 27(3):325–339.
- MÄKI, Uskali, 2018. Rights and Wrongs of Economic Modelling: Refining Rodrik. *Journal of Economic Methodology*, 25(3):218–236.
- MÄKI, Uskali, WALSH, Adrian et PINTO, Manuela Fernández, (dir.), 2018. *Scientific Imperialism: Exploring the Boundaries of Interdisciplinarity*. Routledge, London.
- MANESCHI, Andrea et ZAMAGNI, Stefano, 1997. Nicholas Georgescu-Roegen, 1906-1994. *The Economic Journal*, 107(442):695–707.
- MANKIW, N. Gregory, 2010. *Macroeconomics*. Worth Publishers, 5 édition.
- MANNE, Alan S., 1976. ETA: A Model for Energy Technology Assessment. *The Bell Journal of Economics*, 7(2):379–406.
- MANNE, Alan S., MENDELSON, Robert et RICHEL, Richard, 1995. MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23(1):17–34.
- MANNE, Alan S. et WENE, Clas-Otto, 1992. *MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-Economy Analysis*. Brookhaven National Laboratory, , New York.
- MARTINEZ-ALIER, Juan, 1987. *Ecological Economics: Energy, Environment and Society*. Basil Blackwell, Cambridge, MA.
- MASON, Edward S., 1982. The Harvard Department of Economics from the Beginning to World War II. *The Quarterly Journal of Economics*, 97(3):383–433.

- MAX-NEEF, Manfred A., 2005. Foundations of Transdisciplinarity. *Ecological Economics*, 53(1):5–16.
- MAYUMI, Kozo, 1997. Information, Pseudo Measures and Entropy: An Elaboration on Nicholas Georgescu-Roegen's Critique. *Ecological Economics*, 22(3):249–259.
- MAYUMI, Kozo, 1999. Embodied Energy Analysis, Sraffa's Analysis, Georgescu-Roegen's Flow-Fund Model and Viability of Solar Technology. In MAYUMI, Kozo et GOWDY, John M., (dir.) : *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, pages 173–193.
- MAYUMI, Kozo, 2005. An Epistemological Critique of the Open Leontief Dynamic Model: Balanced and Sustained Growth, Delays, and Anticipatory Systems Theory. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(4):540–556.
- MAYUMI, Kozo, GIAMPIETRO, Mario et GOWDY, John M., 1998. Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Revisited. *Ecological Economics*, 27(2):115–117.
- MEADOWS, Donella H., MEADOWS, Dennis L., RANDERS, Jorgen et BEHRENS, William W., 1972. *The Limits to Growth*. Universe Books, New York.
- MILL, John Stuart, 1848. *Principles of political economy with some of their applications to social philosophy*. John W. Parker, London.
- MIROWSKI, Philip, 1988. Energy and Energetics in Economic Theory: A Review Essay. *Journal of Economic Issues*, 22(3):811–830.
- MIROWSKI, Philip, 1989a. The Measurement Without Theory Controversy. *Oeconomia*, 11:65–87.
- MIROWSKI, Philip, 1989b. *More Heat Than Light*. Cambridge University Press, New York.
- MIROWSKI, Philip, 1992. Nicholas Georgescu-Roegen. In SAMUELS, Warren J., (dir.) : *New Horizons in Economic Thought: Appraisals of Leading Economists*. Edward Elgar Publishing, Aldershot, pages 86–105.
- MIROWSKI, Philip, 2001. Review : Economics, Entropy and the Environment: The Extraordinary Economics of Nicholas Georgescu-Roegen. *The Economic Journal*, 111(472):F474–F476.
- MIROWSKI, Philip, 2002. *Machine Dreams: Economics Becomes a Cyborg Science*. Cambridge University Press, New York.
- MISSEMER, Antoine, 2012. William Stanley Jevons' The Coal Question (1865), Beyond the Rebound Effect. *Ecological Economics*, 82:97–103.
- MISSEMER, Antoine, 2013. *Nicholas Georgescu-Roegen, pour une révolution bioéconomique*. ENS Éditions, Lyon.

- MISSEMER, Antoine, 2017a. *Les économistes et la fin des énergies fossiles (1865-1931)*. Classiques Garnier, Paris.
- MISSEMER, Antoine, 2017b. Nicholas Georgescu-Roegen and Degrowth. *The European Journal of the History of Economic Thought*, 24(3):493–506.
- MISSEMER, Antoine, 2018. Natural Capital as an Economic Concept, History and Contemporary Issues. *Ecological Economics*, 143:90–96.
- MISSEMER, Antoine et NADAUD, Franck, 2020. Energy as a Factor of Production: Historical Roots in the American Institutional Context. *Energy Economics*, 86.
- MITCHELL, Wesley C., 1925. Quantitative Analysis in Economic Theory. *The American Economic Review*, 15(1):1–12.
- MORGAN, Mary S., 2001. Models, Stories and the Economic World. *Journal of Economic Methodology*, 8(3):361–384.
- MORGAN, Mary S., 2004. Simulation : The Birth of a Technology to Create “Evidence” in Economics. *Revue d’histoire des sciences*, 57(2):339–375.
- MORGAN, Mary S., 2012. *The World in the Model: How Economists Work and Think*. Cambridge University Press, New York.
- MORGAN, Mary S. et KNUUTTILA, Tarja, 2012. Models and Modelling in Economics. In MÄKI, Uskali, (dir.) : *Philosophy of Economics*. Elsevier, Amsterdam, volume 13 de Handbook of the Philosophy of Science, pages 49–88.
- MORGAN, Mary S. et MORRISON, Margaret, 1999a. Models as Mediating Instruments. In MORGAN, Mary S. et MORRISON, Margaret, (dir.) : *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, volume 52 de Ideas in Context, pages 10–37.
- MORGAN, Mary S. et MORRISON, Margaret, (dir.), 1999b. *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, volume 52 de Ideas in Context. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MORGAN, Mary S. et RUTHERFORD, Malcolm, 1998. American Economics: The Character of the Transformation. *History of Political Economy*, 30(Suppl_1):1–26.
- MORISHIMA, Michio, 1967. A Few Suggestions on the Theory of Elasticity. *Keizai Hyoron/Economic Review*, 16:144–150.
- MORRISON, Catherine J. et BERNDT, Ernst R., 1981. Short-run Labor Productivity in a Dynamic Model. *Journal of Econometrics*, 16(3):339–365.
- MORRONI, Mario, 1992. *Production Process and Technical Change*. Cambridge University Press, New York.

- NORDHAUS, William D., 1973. The Allocation of Energy Resources. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1973(3):529–576.
- NORDHAUS, William D., 1992. Lethal Model 2: The Limits to Growth Revisited. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1992(2):1–59.
- NORDHAUS, William D., 1993. Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the “DICE” Model. *The American Economic Review*, 83(2):313–317.
- NORDHAUS, William D. et TOBIN, James, 1972. Is Growth Obsolete? In *Economic Growth*. National Bureau of Economic Research, volume 5 de Economic Research: Retrospect and Prospect, pages 1–80.
- NORGAARD, Richard B., 1989. The Case for Methodological Pluralism. *Ecological Economics*, 1(1):37–57.
- NOVICK, David, 1954. Mathematics: Logic, Quantity, and Method. *The Review of Economics and Statistics*, 36(4):357–358.
- O’CONNOR, Martin, 1993. Entropic Irreversibility and Uncontrolled Technological Change in Economy and Environment. *Journal of Evolutionary Economics*, 3(4):285–315.
- O’DONNELL, R. M., 1990. Keynes on Mathematics: Philosophical Foundations and Economic Applications. *Cambridge Journal of Economics*, 14(1):29–47.
- OPSCHOOR, J. B., 1997. The Hope, Faith and Love of Neoclassical Environmental Economics. *Ecological Economics*, 22(3):281–283.
- OSTWALD, Wilhelm, 1907. The Modern Theory of Energetics. *The Monist*, 17(4):481–515.
- OSTWALD, Wilhelm, 1911. Efficiency. *The Independent*, 71:867–871.
- OULD BOYE, Isselmou, 2014. *Quelques traits caractéristiques de l’émergence d’une « hétérodoxie » : le cas de l’économie écologique*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.
- PALEY, W., BROWN, G., BUNKER, A., HODGINS, E. et MASON, E., 1952. *Resources for Freedom: A Report to the President by the President’s Materials Policy Commission*. U. S. Government Printing Office, Washington, DC.
- PARRA, Francisco, 2004. *Oil Politics: A Modern History of Petroleum*. IB Tauris, London.
- PARRINELLO, Sergio, 1983. Exhaustible Natural Resources and the Classical Method of Long-Period Equilibrium. In KREGEL, J. A., (dir.) : *Distribution, Effective Demand and International Economic Relations: Proceedings of a Conference held by the Centro di Studi Economici Avanzati, Trieste, at Villa Manin di Passariano, Udine*. Palgrave Macmillan, London, pages 186–199.

- PARYS, Wilfried, 2016. The Interaction Between Leontief and Sraffa: No Meeting, no Citation, no Attention? *The European Journal of the History of Economic Thought*, 23(6):971–1000.
- PASSET, René, 1979. *L'économie et le vivant*. Payot, Paris.
- PEARCE, David W., 1988. Economics, Equity and Sustainable Development. *Futures*, 20(6):598–605.
- PEARCE, David W., 1992. *Economic Valuation and the Natural World*. World Bank Publications, Washington, DC.
- PEARCE, David W., 1997. Substitution and Sustainability: Some Reflections on Georgescu-Roegen. *Ecological Economics*, 22(3):295–297.
- PEARCE, David W., 2002. An Intellectual History of Environmental Economics. *Annual Review of Energy and the Environment*, 27(1):57–81.
- PEARCE, David W. et ATKINSON, Giles D., 1993. Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: An Indicator of “Weak” Sustainability. *Ecological Economics*, 8(2):103–108.
- PEARCE, David W., MARKANDYA, Anil et BARBIER, Edward, 1989. *Blueprint for a Green Economy*. Earthscan Publications, London.
- PEARCE, David W. et TURNER, Kerry R., 1990. *Economics of Natural Resources and the Environment*. Johns Hopkins Press, Baltimore, MD.
- PEET, John, 1997. ‘Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz’...but What Is the Real Question? *Ecological Economics*, 22(3):293–294.
- PERRINGS, Charles, 1986. Conservation of Mass and Instability in a Dynamic Economy-Environment System. *Journal of Environmental Economics and Management*, 13(3):199–211.
- PERRINGS, Charles, 1987. *Economy and Environment: A Theoretical Essay on the Interdependence of Economic and Environmental Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, MA.
- PERRINGS, Charles, 1997. Georgescu-Roegen and the ‘Irreversibility’ of Material Processes. *Ecological Economics*, 22(3):303–304.
- PERRY, George L., 1977. Potential Output: Recent Issues and Present Trends. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 59(12):2–21.
- PIGOU, Arthur C., FRIEDMAN, Milton et GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, 1936. Marginal Utility of Money and Elasticities of Demand. *The Quarterly Journal of Economics*, 50(3):532–539.

- PLUMECOCQ, Gaël, 2014. The Second Generation of Ecological Economics: How Far Has the Apple Fallen from the Tree? *Ecological Economics*, 107:457–468.
- PODOLINSKY, Sergei, 1880. Le socialisme et l'unité des forces physiques. *La revue socialiste*, 8:353–365.
- PODOLINSKY, Sergei, 2008. Human Labour and Unity of Force. *Historical Materialism*, 16(1):163–183.
- POLANYI, Karl, 1975. L'économie en tant que procès institutionnalisé. In ARENSBERG, Conrad et POLANYI, Karl, (dir.) : *Les systèmes économiques dans l'histoire et dans la théorie*. Librairie Larousse, Paris, pages 239–260.
- POTTIER, Antonin, 2014. *L'économie dans l'impasse climatique. Développement matériel, théorie immatérielle et utopie auto-stabilisatrice*. Thèse de doctorat, EHESS, Paris.
- PRIGOGINE, Ilya, 1967. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. John Wiley & Sons, New York, 3 édition.
- PRIGOGINE, Ilya, 1972. La thermodynamique de la vie. *La Recherche*, 3(24):547–562.
- RASCHE, Robert H. et TATOM, John A., 1977a. The Effects of the New Energy Regime on Economic Capacity, Production, and Prices. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 59(5):2–12.
- RASCHE, Robert H. et TATOM, John A., 1977b. Energy Resources and Potential GNP. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 59(6):10–24.
- RASHID, Salim, 1981. Methods in Economic Science: Comment. *Journal of Economic Issues*, 15(1):183–188.
- ROBINSON, Joan, 1953. The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*, 21(2):81–106.
- RODRIK, Dani, 2015. *Economics Rules: Why Economics Works, When it Fails, and How to Tell the Difference*. Oxford University Press, Oxford.
- ROPKE, Inge, 2004. The Early History of Modern Ecological Economics. *Ecological Economics*, 50(3):293–314.
- ROPKE, Inge, 2005. Trends in the Development of Ecological Economics from the Late 1980s to the Early 2000s. *Ecological Economics*, 55(2):262–290.
- RORTY, Richard, 1984. The Historiography of Philosophy: Four Genres. In RORTY, Richard, SCHNEEWIND, J. B. et SKINNER, Quentin, (dir.) : *Philosophy in History: Essays on the Historiography of Philosophy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, Ideas in Context, pages 49–75.

- ROSE, Adam et MIERNYK, William, 1989. Input-Output Analysis: The First Fifty Years. *Economic Systems Research*, 1(2):229–272.
- RUTH, Matthias, 1993. *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*. Springer Science & Business Media, New York.
- SAMUELSON, Paul A., 1948. *Economics: An Introductory Analysis*. McGraw-Hill, New York.
- SAMUELSON, Paul A., 1951. Schumpeter as a Teacher and Economic Theorist. *The Review of Economics and Statistics*, 33(2):98–103.
- SAMUELSON, Paul A., 1966a. Foreword. In GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, (dir.) : *Analytical Economics: Issues and Problems*. Harvard University Press, Cambridge, MA, pages vii–ix.
- SAMUELSON, Paul A., 1966b. Samuelson on Induced Innovation: Rejoinder: Agreements, Disagreements, Doubts, and the Case of Induced Harrod-neutral Technical Change. *The Review of Economics and Statistics*, 48(4):444–448.
- SAMUELSON, Paul A., 1968. *Economics: An Introductory Analysis*. McGraw-Hill, New York, 2 édition.
- SAMUELSON, Paul A., 1999. Foreword. In MAYUMI, Kozo et GOWDY, John M., (dir.) : *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, pages xiii–xvii.
- SAMUELSON, Paul A., KLEIN, Lawrence R., CHIPMAN, John S., DUESENBERY, James S., TINBERGEN, Jan, CHAMPERNOWNE, D. G., SOLOW, Robert M., DORFMAN, Robert et KOOPMANS, Tjalling C., 1954. Mathematics in Economics: Discussion of Mr. Novick's Article. *The Review of Economics and Statistics*, 36(4):359–386.
- SAMUELSON, Paul A. et NORDHAUS, William D., 2009. *Economics*. McGraw-Hill, New York, 19 édition.
- SANTOS, João, DOMINGOS, Tiago, SOUSA, Tânia et ST. AUBYN, Miguel, 2018. Useful Exergy Is Key in Obtaining Plausible Aggregate Production Functions and Recognizing the Role of Energy in Economic Growth: Portugal 1960-2009. *Ecological Economics*, 148:103–120.
- SCAZZIERI, Roberto, 1993. *A Theory of Production: Tasks, Processes, and Technical Practices*. Clarendon Press, Oxford.
- SCHFOLD, Bertram, 1977. Energy and Economic Theory. *Zeitschrift für Wirtschafts und Sozialwissenschaften*, 97(3):227–49.
- SCHFOLD, Bertram, 1987. Une digression sur les ressources épuisables: existe-t-il une théorie classique des ressources épuisables? In *La rente : actualité de l'approche classique*. Economica, Paris, pages 83–97.

- SCHLEGEL, Richard, PFOUTS, Ralph W., HOCHWALD, Werner et JOHNSON, Glenn L., 1973. Four Reviews of The Entropy Law and the Economic Process, by Nicholas Georgescu-Roegen. *Journal of Economic Issues*, 7(3):475–499.
- SCHRÖDINGER, Erwin, 1944. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell and Mind*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- SCHUMPETER, Joseph A., 1934. *The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Interest, and the Business Cycle*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- SEIFERT, Eberhard K., 1994. Georgescu-Roegen, Nicholas. In HODGSON, Geoffrey M., SAMUELS, Warren J. et TOOL, Marc R., (dir.) : *The Elgar Companion to Institutional and Evolutionary Economics*. Edward Elgar Publishing, Aldershot, volume 1, pages 277–283.
- SERGI, Francesco, 2017. *De la révolution lucasienne aux modèles DSGE : réflexions sur les développements récents de la modélisation macroéconomique*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- SHAIKH, Anwar, 1974. Laws of Production and Laws of Algebra: The Humbug Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, 56(1):115–120.
- SHEPHARD, Ronald W., 1953. *Cost and Production Functions*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- SLESSER, Malcolm, 1975. Accounting for Energy. *Nature*, 254(5497):170–172.
- SODDY, Frederick, 1922. *Cartesian Economics: The Bearing of Physical Science upon State Stewardship*. Hendersons, London.
- SOLER, Léna, 2000. *Introduction à l'épistémologie*. Ellipses, Paris.
- SOLO, Robert A., 1974. Arithmomorphism and Entropy. Review of The Entropy and the Economic Process, by Nicholas Georgescu-Roegen. *Economic Development and Cultural Change*, 22(3):510–517.
- SOLOW, John L., 1987. The Capital-Energy Complementarity Debate Revisited. *The American Economic Review*, 77(4):605–614.
- SOLOW, Robert M., 1951-2011. Papers. David M. Rubenstein Rare Book and Manuscript Library, Duke University, Durham, NC.
- SOLOW, Robert M., 1955. The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*, 23(2):101–108.
- SOLOW, Robert M., 1956. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1):65–94.

- SOLOW, Robert M., 1957. Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, 39(3):312–320.
- SOLOW, Robert M., 1960. Investment and Technical Progress. In ARROW, Kenneth J., KARLIN, Samuel et SUPPES, Patrick, (dir.) : *Mathematical Methods in the Social Sciences*. Stanford University Press, Stanford, CA, pages 48–93.
- SOLOW, Robert M., 1973. Is the End of the World at Hand? *Challenge*, 16(1):39–50.
- SOLOW, Robert M., 1974a. The Economics of Resources or the Resources of Economics. *The American Economic Review*, 64(2):1–14.
- SOLOW, Robert M., 1974b. Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*, 41:29–45.
- SOLOW, Robert M., 1978. Resources and Economic Growth. *The American Economist*, 22(2):5–11.
- SOLOW, Robert M., 1988. Growth Theory and After. *The American Economic Review*, 78(3):307–317.
- SOLOW, Robert M., 1993. An Almost Practical Step toward Sustainability. *Resources Policy*, 19(3):162–172.
- SOLOW, Robert M., 1997. Georgescu-Roegen versus Solow-Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):267–268.
- SOLOW, Robert M., 2009a. An Amateur Among Professionals. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1):1–14.
- SOLOW, Robert M., 2009b. Does Growth Have a Future? Does Growth Theory Have a Future? Are These Questions Related? *History of Political Economy*, 41(Suppl_1):27–34.
- SOLOW, Robert M. et WAN, Frederic Y., 1976. Extraction Costs in the Theory of Exhaustible Resources. *The Bell Journal of Economics*, 7(2):359–370.
- SOUSA, Tânia et DOMINGOS, Tiago, 2006a. Equilibrium Econophysics: A Unified Formalism for Neoclassical Economics and Equilibrium Thermodynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 371(2):492–512.
- SOUSA, Tânia et DOMINGOS, Tiago, 2006b. Is Neoclassical Microeconomics Formally Valid? An Approach Based on an Analogy With Equilibrium Thermodynamics. *Ecological Economics*, 58(1):160–169.
- SPASH, Clive L., 1999. The Development of Environmental Thinking in Economics. *Environmental Values*, 8(4):413–435.

- SPASH, Clive L., 2012. New Foundations for Ecological Economics. *Ecological Economics*, 77:36–47.
- SPASH, Clive L., 2013. The Shallow or the Deep Ecological Economics Movement? *Ecological Economics*, 93:351–362.
- SRAFFA, Piero, 1960. *Production of Commodities by Means of Commodities: Prelude to a Critique of Economic Theory*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- STERN, David I., 1993. Energy and Economic Growth in the USA: A Multivariate Approach. *Energy economics*, 15(2):137–150.
- STERN, David I., 2000. A Multivariate Cointegration Analysis of the Role of Energy in the US Macroeconomy. *Energy Economics*, 22(2):267–283.
- STERN, David I., 2011. The Role of Energy in Economic Growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219:26–51.
- STERN, David I., 2017. Energy-GDP Relationship. In *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan, London.
- STIGLITZ, Joseph E., 1974a. The Cambridge-Cambridge Controversy in the Theory of Capital; A View from New Haven: A Review Article. *Journal of Political Economy*, 82(4):893–903.
- STIGLITZ, Joseph E., 1974b. Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *The Review of Economic Studies*, 41:123–137.
- STIGLITZ, Joseph E., 1974c. Growth with Exhaustible Natural Resources: The Competitive Economy. *The Review of Economic Studies*, 41:139–152.
- STIGLITZ, Joseph E., 1976. Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. *The American Economic Review*, 66(4):655–661.
- STIGLITZ, Joseph E., 1979. A Neoclassical Analysis of the Economics of Natural Resources. In SMITH, Kerry V., (dir.) : *Scarcity and Growth Reconsidered*. Resources for the Future Press, New York, pages 36–66.
- STIGLITZ, Joseph E., 1997. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):269–270.
- STIGLITZ, Joseph E., 2019. Addressing Climate Change Through Price and Non-Price Interventions. *European Economic Review*, 119:594–612.
- STIGLITZ, Joseph E., STERN, Nicholas, DUAN, Maosheng, EDENHOFER, Ottmar, GI-RAUD, Gaël, HEAL, Geoffrey M., la ROVERE, Emilio Lèbre, MORRIS, Adele, MOYER, Elisabeth et PANGESTU, Mari, 2017. *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. World Bank Publications, Washington, DC.

- SUÁREZ, Mauricio, 2004. An Inferential Conception of Scientific Representation. *Philosophy of Science*, 71(5):767–779.
- SUPPE, Frederick, 1989. *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*. University of Illinois Press, Urbana, IL.
- SUPRINYAK, Carlos Eduardo, 2018. Nicholas Georgescu-Roegen, Development Economist. *Working Paper Cedeplar*.
- SWAN, T. W., 1956. Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32(2):334–361.
- TACCONI, Luca, 1998. Scientific Methodology for Ecological Economics. *Ecological Economics*, 27(1):91–105.
- TANG, Anthony M., WESTFIELD, Fred M. et WORLEY, James S., (dir.), 1976. *Evolution, Welfare, and Time in Economics: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Lexington Books, Lexington, MA.
- THOMPSON, Peter et TAYLOR, Timothy G., 1995. The Capital-Energy Substitutability Debate: A New Look. *The Review of Economics and Statistics*, 77(3):565–569.
- TISDELL, Clem, 1997. Capital/Natural Resource Substitution: The Debate of Georgescu-Roegen (through Daly) with Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22(3):289–291.
- TRYON, Frederick G., 1927. An Index of Consumption of Fuels and Water Power. *Journal of the American Statistical Association*, 22(159):271–282.
- TURNBULL, Thomas, 2017. *From Paradox to Policy: The Problem of Energy Resource Conservation in Britain and America, 1865-1981*. Thèse de doctorat, University of Oxford, Oxford.
- TURNER, Kerry R., 1997. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz: A Pluralistic and Interdisciplinary Perspective. *Ecological Economics*, 22(3):299–302.
- UZAWA, Hirofumi, 1962. Production Functions with Constant Elasticities of Substitution. *The Review of Economic Studies*, 29(4):291–299.
- UZAWA, Hirofumi, 1964. Duality Principles in the Theory of Cost and Production. *International Economic Review*, 5(2):216–220.
- van den BERGH, Jeroen C. J. M., 1999. Materials, Capital, Direct/Indirect Substitution, and Mass Balance Production Functions. *Land Economics*, 75(4):547–561.
- VERGER, Yoann, 2015. Sraffa and Ecological Economics. *Working Paper*. working paper or preprint.
- VERGER, Yoann, 2016. *Sraffa et l'économie écologique : liens et possibilités*. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, Paris.

- VICTOR, Peter A., 1991. Indicators of Sustainable Development: Some Lessons from Capital Theory. *Ecological Economics*, 4(3):191–213.
- VIÉILLE BLANCHARD, Elodie, 2011. *Les limites à la croissance dans un monde global : modélisations, prospectives, réfutations*. Thèse de doctorat, EHESS, Paris.
- VINING, Rutledge, 1949. Koopmans on the Choice of Variables to be Studied and the Methods of Measurement. *The Review of Economics and Statistics*, 31(2):77–86.
- VITTUCCI MARZETTI, Giuseppe, 2013. The Fund-Flow Approach: A Critical Survey. *Journal of Economic Surveys*, 27(2):209–233.
- VIVIEN, Franck-Dominique, 2007. *Le développement soutenable*. La découverte, Paris.
- VON NEUMANN, J., 1945. A Model of General Economic Equilibrium. *The Review of Economic Studies*, 13(1):1–9.
- WARR, Benjamin et AYRES, Robert U., 2012. Useful Work and Information as Drivers of Economic Growth. *Ecological Economics*, 73:93–102.
- WEINTRAUB, E. Roy, 1999. How Should We Write the History of Twentieth-Century Economics? *Oxford Review of Economic Policy*, 15(4):139–152.
- WEINTRAUB, E. Roy, 2002. *How Economics Became a Mathematical Science*. Duke University Press, Durham.
- WEINTRAUB, E. Roy et GAYER, Ted, 2001. Equilibrium Proofmaking. *Journal of the History of Economic Thought*, 23(4):421–442.
- WEITZMAN, Martin L., 1970. Soviet Postwar Economic Growth and Capital-Labor Substitution. *The American Economic Review*, 60(4):676–692.
- WICKSELL, Knut, 1954. *Value, Capital, and Rent*. George Allen & Unwin, London.
- WICKSTEED, Philip H., 1894. *An Essay on the Co-ordination of the Laws of Distribution*. Macmillan, London.
- WRIGHT, David J., 1974. Good and Services: An Input-Output Analysis. *Energy Policy*, 2(4):307–315.

Table des figures

1.1	Schéma circulaire de l'économie dans la vision standard	60
1.2	Schéma de l'économie écologique	63
1.3	Production annuelle mondiale d'une sélection de métaux	72
3.1	La relation entre l'élasticité prix η_{KE} et la part en valeur de l'énergie S_E .	139
6.1	Frontières méthodologiques liées à l'interdisciplinarité et à la modélisation	255

Liste des tableaux

1	Tableau flux-fonds avec processus multiples	220
2	Tableau flux-fonds dynamique	223
3	Tableau flux-fonds avec matière et énergie	230
4	Tableau flux-fonds d'une technologie solaire	242
5	Tableau flux-fonds d'une transition énergétique	246
6	Tableau synthétique des théories de la production étudiées dans la thèse	253
7	Tableau flux-fonds d'une technologie solaire	294
8	Tableau flux-fonds d'une transition énergétique	298

Table des matières

Introduction générale	1
0.1 Objet de la thèse	3
0.1.1 Définition et caractérisation élémentaire	3
0.1.2 Position dans la discipline économique	7
Thermodynamique et économie depuis le 19 ^e siècle	7
L'économie de l'environnement dans la deuxième moitié du 20 ^e siècle	11
0.2 Perspectives historiographique et méthodologique	17
0.2.1 Une historiographie à finalité méthodologique	17
0.2.2 Méthodologie économique et modélisation	22
Théories, modèles et données	22
La philosophie de l'économie écologique	25
Registre de la représentation et registre des manipulations	27
0.2.3 L'interdisciplinarité entre économie et thermodynamique	32
0.3 Problématique	37
0.4 Plan de la thèse	41
1 La conception thermodynamique de l'économie	45
1.1 Fondements de la conception thermodynamique de l'économie	49
1.1.1 De la thermodynamique à l'économie	49
1.1.2 Une critique de la théorie économique « standard »	58
1.2 Ressources naturelles et limites à la croissance	64
1.2.1 Les ressources énergétiques : stocks terrestres et flux solaire	64
1.2.2 Matière, dissipation et recyclage	69
1.2.3 Les limites physiques à la croissance	75
L'état stationnaire	75
Progrès technique et développement soutenable	78
1.3 Conclusion	83
2 La controverse Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz	85
2.1 Solow, Stiglitz et les origines de la théorie néoclassique des ressources	88
2.1.1 Fonctions de production et théorie de la croissance avant les années	
1970	88
2.1.2 Modèles de croissance et productivité illimitée des ressources	91

2.1.3	Méthodologie de la modélisation dans la théorie néoclassique des ressources	94
	Exploration théorique et tests empiriques des modèles	95
	Fondements conceptuels et réalisme des modèles	97
2.2	Georgescu-Roegen et l'hypothèse de limite thermodynamique	100
2.2.1	Énergie accessible et efficacité limitée	100
2.2.2	Limite thermodynamique au progrès technique	102
2.2.3	La conception thermodynamique de l'économie à l'épreuve de l'opérationnalisation	104
2.3	Le débat entre économistes écologiques et néoclassiques à la fin des années 1990	107
2.3.1	Contexte du débat	107
2.3.2	Horizon temporel des modèles et lois de la thermodynamique	109
2.3.3	Articulation entre les dimensions physique et économique de la production	112
2.3.4	Retour à la distinction entre substitution et progrès technique	115
2.4	Conclusion	118
3	L'énergie et les fonctions de production agrégées	121
3.1	L'énergie dans l'approche standard	125
3.1.1	La controverse sur la substituabilité entre le capital et l'énergie	127
	Première contribution et cadre général de la controverse	127
	Résultats divergents et tentatives d'explication	130
3.1.2	Enjeux méthodologiques de la controverse et de ses prolongements	133
	Une notion de substitution équivoque	133
	Les estimations empiriques comme produit d'un artifice théorique	138
3.1.3	Des divergences sur la relation entre énergie et productivité	142
3.2	La théorie néo-thermodynamique de la production	145
3.2.1	L'énergie comme facteur de production primordial	147
3.2.2	Une conception physique de la fonction de production agrégée	153
3.2.3	Les estimations économétriques : instruments de mesure et tests empiriques	159
3.3	Conclusion	164
4	Georgescu-Roegen et la méthodologie de l'économie mathématique	169
4.1	De l'économie mathématique à sa critique	172
4.1.1	Un mathématicien au cœur des transformations de l'économie au 20 ^e siècle	172
4.1.2	La réception de la critique de Georgescu-Roegen	179
4.2	La méthodologie de Georgescu-Roegen	185
4.2.1	Arithmomorphisme et dialectique	186
4.2.2	Fonctions des modèles	189
4.2.3	Principes de construction des modèles	193
4.2.4	Georgescu-Roegen et l'image des mathématiques	199

4.3	Conclusion	202
5	La théorie flux-fonds de la production	205
5.1	La conception circulaire de la production	208
5.1.1	Des classiques à Leontief et Sraffa	208
5.1.2	Les modèles linéaires et la théorie de l'équilibre générale	210
5.1.3	Applications empiriques et questions environnementales	213
5.2	Fondements méthodologiques et théoriques de l'approche flux-fonds	215
5.2.1	Concepts fondamentaux et modèle temporel de la production	215
5.2.2	Modèle à processus multiples	220
5.2.3	Modèle dynamique et changement qualitatif	223
5.3	Dimensions physique et économique de la production	228
5.3.1	Flux physiques et lois de la thermodynamique	228
5.3.2	Théorie de la valeur et des prix	234
	Une conception anti-réductionniste de la valeur et des prix	234
	Georgescu-Roegen et Sraffa	239
5.3.3	Viabilité et technologies prométhéennes	241
5.4	Conclusion	248
	Conclusion générale	251
	Apports de la thèse	255
	Prolongements possibles	260
	Annexes	267
	A Introduction à la thermodynamique	267
	B Les fonctions de production	275
B.1	Théorie néoclassique de la production	276
B.1.1	Définition et hypothèses standards de la fonction de production	276
B.1.2	Fonction de coût duale	278
B.1.3	Élasticités de production et comptabilité de la croissance	279
B.1.4	Élasticités prix et élasticités de substitution	281
B.1.5	Spécifications fonctionnelles	283
B.2	Théorie néo-thermodynamique de la production	286
B.2.1	Critique de la rémunération à la productivité marginale	286
B.2.2	La fonction de production linéaire exponentielle (Linex)	290
	C Modèle flux-fonds de transition énergétique	293
C.1	Énergie nette et viabilité	294
C.1.1	Cas d'une technologie solaire	294
C.1.2	Généralisation	296
C.2	Modèle dynamique de transition énergétique	298
C.2.1	Présentation du modèle	298

C.2.2	Résolution du système différentiel	300
C.2.3	Contrainte sur la transition	302
Bibliographie		305
Table des figures		337
Liste des tableaux		339
Table des matières		344
Remerciements		345
Résumés		349

Remerciements

Je n'en croyais pas mes yeux, il me semblait que c'était un rêve, lorsque je voyais sous mes pieds ces cimes majestueuses, ces redoutables aiguilles, le Midi, l'Argentière, le Géant, dont les bases mêmes avaient été pour moi d'un accès si difficile et si dangereux. Je saisissais leurs rapports, leur liaison, leur structure, et un seul regard levait des doutes que des années de travail n'avaient pu éclaircir.

—Horace Bénédict de Saussure, *Voyages dans les Alpes*, 1796

Ayant grandi dans les Alpes, l'image qui me vient le plus naturellement pour décrire cette thèse est celle d'une longue ascension. Cette ascension a été le produit d'un effort éminemment collectif, et je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont, à un moment ou à un autre, pris part à cette « cordée ».

Mes remerciements vont tout d'abord à mon directeur de thèse, Jérôme Lallement, qui s'est montré un guide aguerri tout au long de ces années. Il a porté une attention bienveillante et constante à mon travail, même lorsque celui-ci s'aventurait sur un terrain peu fréquenté, aux frontières de l'économie et de la physique. Ses remarques et ses questions m'ont été d'un secours indispensable pour éviter crevasses et impasses, et ainsi trouver mon chemin sur les sentiers escarpés de la théorie économique.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté de m'accompagner sur l'arrête sommitale, ô combien périlleuse, qui mène à la soutenance de thèse. Ils ont été très compréhensifs face aux conditions mouvementées engendrées par la crise du coronavirus. Mais surtout, ils ont accepté de dédier du temps et de l'attention à l'examen de mon travail. Pour tout cela, je remercie très sincèrement Annie Cot, Muriel Dal Pont Legrand, Christophe Goupil, Jean-Charles Hourcade, Antoine Missemmer et Antonin Pottier.

Mes remerciements vont également aux membres du personnel administratif de l'École doctorale Économie Panthéon Sorbonne et du Centre d'économie de la Sorbonne, qui ont fourni le support technique indispensable à cette entreprise. Je remercie tout particulièrement Jean-Philippe Carrié, Francesca Di Legge, Nathalie Louni et Loïc Sorel pour leurs réponses à mes nombreuses requêtes.

Cette thèse doit énormément à l'ambiance chaleureuse et à l'effervescence intellectuelle du groupe de recherche en épistémologie et en histoire de la pensée économique récente (REHPERE), et de son très formateur séminaire de thèse Albert O. Hirschman. Cet environnement a servi de camp de base à chacune de mes excursions sur les pentes abruptes de la pensée économique. Mes plans d'ascension y ont été scrutés, rectifiés et enrichis, à toutes les étapes de mon cheminement. Par ailleurs, au-delà des aspects strictement intellectuels, ce groupe de recherche a fait de cette thèse une formidable expérience humaine. Pour toutes ces raisons, je tiens à remercier très chaleureusement Annie, Jérôme, Jean-Sébastien, Francesco, Aurélien, Thomas, Guillaume, Malo, Niels, Pierrick, Matthieu, Erich, Kevin, Cristian, Thibaud, Elizaveta, Nathanaël, Nicolas, Justine, Julien, Judith, Cléo, Juan, Maxime, Raphaël, Dorian et Tom.

Outre les personnes mentionnées ci-dessus, de nombreux autres doctorants et doctorantes, de la Maison des sciences économiques et d'ailleurs, ont contribué à donner à

cette rude ascension les apparences d'une joyeuse balade dans de verdoyants pâturages. Dans les passages les plus ardues, il s'est toujours trouvé quelqu'un pour apporter de la joie et de la bonne humeur, par exemple, en racontant une bonne « tranquette ». Que les personnes suivantes en soient affectueusement remerciées : Sofia, Antoine, Fatma, Hadrien, Jeff, Rudy, Simona, Adriana, Romain, Margarita, Sophie, Marion, Robin, Ignacio, Quitterie, Sarah et Dorian.

En-dehors du monde académique, je voudrais tout d'abord rendre hommage aux intrépides « kangoux », avec lesquels j'ai vécu certaines de mes expéditions les plus engagées. Pour cette superbe aventure collective, un grand merci à Youlie, Charlotte, Wilfried, Mélanie, Alexis, Clément, Pierre, Ariane, Arthur, Jean-Marie, Jean-Jacques, Jean-François, Charles, Barbara, et à toutes celles et tous ceux qui y ont pris part.

Durant ces années de thèse, d'autres amis n'ont jamais manqué à l'appel lorsqu'il s'agissait d'aller d'arpenter quelque sympathique adret pour s'aérer l'esprit, d'explorer les profondeurs catacombesques de la capitale, ou plus simplement de boire un verre. Et lorsque je n'étais pas disponible, tout entier dévoué à la rédaction de ma thèse, ils ne m'ont pas pour autant jeté l'anathème. Pour ces moments partagés, je remercie Mezian, Timothée, Florian, François, Étienne, Nathan, Cécile, Yohan, Alex, Julien, Colette, Aurélien, Alexandre, Gregory, Nicolas et Minh-Tu. Et bien sûr, j'ai une pensée particulière pour Clémence.

Enfin, mes remerciements vont à ma famille, à qui je dois le goût de l'effort et la confiance en soi sans lesquels cette épopée eût été impossible. Mon père, Jean-François, a redoublé d'imagination culinaire et pris soin de moi lors de mes nombreux séjours chez lui, me permettant ainsi de me consacrer pleinement à ma thèse. Ma mère, Christine, bien qu'à distance la plupart du temps, a toujours su m'apporter l'aide et l'affection nécessaires aux moments opportuns. Mon frère, Jérémie, et sa petite famille, Sarah et Elio, m'ont souvent accueilli dans le giron réconfortant de leur appartement montreuillois. Mes grands-parents, Janine, Bernard, Joséphine et André, m'ont accompagné de leur tendresse indéfectible. Mon oncle et ma tante, Cyrille et Catherine, ont apporté leur présence chaleureuse à tous les moments importants. Mon beau-père, François, n'a jamais manqué d'un bon mot pour égayer les réunions familiales. Quant à mon arrière-grand-tante et mon arrière-grand-oncle, Marguerite et Edmond, ils m'ont transmis leur curiosité intellectuelle. À tous, je tiens à leur dire combien leur amour m'est cher.

Pour finir, je voudrais honorer la mémoire d'Alexandre Abdelaziz. Alexandre a été un camarade formidable, tant dans le domaine académique, que dans nos engagements communs. L'étendue de sa curiosité intellectuelle était apparemment sans limite, et il avait toujours une nouvelle découverte à partager. Cependant, sur la voie de l'enseignement et de la recherche à laquelle il aspirait, sa dyslexie représentait un handicap majeur, engendrant une profonde souffrance. Son expérience montre combien il est urgent de construire une société plus inclusive, dans laquelle chacun puisse trouver sa place. Mes pensées vont à ses proches, et en particulier à ses parents, Janine et Kamel.

Résumés

Résumé :

Cette thèse examine les questions méthodologiques soulevées par la prise en compte de la dimension physique du processus économique dans la théorie économique. Pour cela, elle s'intéresse principalement à la conception thermodynamique de l'économie, développée notamment par Nicholas Georgescu-Roegen et Robert Ayres. Plus précisément, cette thèse étudie la façon dont la conception thermodynamique de l'économie s'incarne dans deux représentations formelles de la production, la théorie néo-thermodynamique et la théorie flux-fonds, et comment ces approches se confrontent à la théorie néo-classique des ressources. Pour appréhender les enjeux méthodologiques associés à ces diverses théories, la thèse met l'accent sur les questions liées à la modélisation et à l'interdisciplinarité. Elle montre que la théorie néoclassique des ressources et la théorie néo-thermodynamique partagent une même conception de la modélisation, qui se traduit par le recours aux fonctions de production agrégées. Or, cette représentation de la production se révèle inadéquate pour rendre compte de la dimension physique de la production, tant sur le plan conceptuel que sur le plan empirique. La théorie flux-fonds constitue au contraire une rupture méthodologique radicale vis-à-vis de la fonction de production agrégée. Elle s'avère plus à même d'appréhender la dimension physique de la production d'un point de vue conceptuel, mais souffre d'un manque d'application. Dans l'ensemble, la thèse montre que les enjeux méthodologiques liés à la modélisation devraient faire l'objet de davantage d'attention lorsqu'il s'agit de rendre compte de la dimension physique du processus économique.

Mots-clés : Ressources naturelles ; Thermodynamique ; Modélisation ; Interdisciplinarité ; Fonctions de production agrégées ; Modèle flux-fonds ; Nicholas Georgescu-Roegen ; Robert Ayres.

Summary:

This thesis examines the methodological questions raised by the consideration of the physical dimension of the economic process in economic theory. For this purpose, it is mainly interested in the thermodynamic conception of the economy, developed in particular by Nicholas Georgescu-Roegen and Robert Ayres. More precisely, this thesis studies how the thermodynamic conception of economics is embodied in two formal representations of production—the neo-thermodynamic theory and the flow-fund theory—and how these approaches compare with the neoclassical theory of resources. To understand the methodological issues associated with these various theories, the thesis emphasizes questions related to modeling and interdisciplinarity. It shows that the neoclassical theory of resources and the neo-thermodynamic theory share the same conception of modeling, which results in the use of aggregate production functions. However, this representation of production turns out to be inadequate to account for the physical dimension of production, both conceptually and empirically. The flow-fund theory, on the contrary, constitutes a radical methodological break with regard to the aggregate production function. It is more capable of understanding the physical dimension of production from a conceptual point of view, but suffers from a lack of application. Overall, the thesis shows that the methodological issues linked to modeling should receive more attention when it comes to accounting for the physical dimension of the economic process.

Keywords: Natural resources; Thermodynamics; Modeling; Interdisciplinarity; Aggregate production functions; Flow-fund model; Nicholas Georgescu-Roegen; Robert Ayres.