

CES

Centre d'Économie de la Sorbonne  
UMR 8174

**L'énergie et les fonctions de production agrégées :  
perspectives historique et méthodologique**

Quentin COUX

2019.27



# L'énergie et les fonctions de production agrégées : perspectives historique et méthodologique

Quentin Couix\*

**Abstract :** From a historical and methodological perspective, this paper focuses on empirical work on energy based on the aggregate production function, from the early 1970s to the late 2000s. It starts with the standard neoclassical approach, and in particular the controversy over the substitutability between capital and energy. Then it tackles the thermodynamic approach, which focuses on the explanation of the long-term growth. It shows continuity in the methodological issues raised by this work. At the theoretical level, the aggregate production function offers little conceptual insight into the physical aspects of the production process. At the empirical level, the results of estimates of energy production functions raise questions. In the neoclassical framework, the estimation is done indirectly through the cost function, so that the result is overdetermined by the marginal productivity pricing assumption. The thermodynamic approach proceeds in the opposite direction to a direct estimate, which encounters statistical problems no less important. If these difficulties relate more generally to the aggregate production function, energy issues reveal them in a very striking way.

Key words : energy, aggregate production function, growth accounting, thermodynamics.

JEL classification : B23, B41, O47, Q01, Q43.

**Résumé :** Dans une perspective historique et méthodologique, cet article s'intéresse aux travaux empiriques sur l'énergie qui reposent sur la fonction de production agrégée, du début des années 1970 à la fin des années 2000. Il traite dans un premier temps de l'approche néoclassique standard, et en particulier de la controverse sur la substituabilité entre le capital et l'énergie. Puis il aborde l'approche thermodynamique, davantage tournée vers l'explication de la croissance à long terme. Il montre une continuité dans les enjeux méthodologiques soulevés par ces travaux. Au niveau théorique, la fonction de production agrégée offre peu de prise conceptuelle pour rendre compte des aspects physiques du processus de production. Au niveau empirique, les résultats des estimations de fonctions de production avec énergie soulèvent des interrogations. Dans le cadre néoclassique, l'estimation est réalisée de manière indirecte via la fonction de coût, de sorte que le résultat est surdéterminé par l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. L'approche thermodynamique procède à l'inverse à une estimation directe, qui rencontre des problèmes statistiques non moins importants. Si ces difficultés concernent de manière plus générale la fonction de production agrégée, la question de l'énergie les révèle de façon très frappante.

Mots clefs : énergie, fonction de production agrégée, comptabilité de la croissance, thermodynamique.

---

\*Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne - Centre d'économie de la Sorbonne (CES).  
Quentin.Couix@univ-paris1.fr.

## Introduction

Du fait de la place prépondérante occupée par le charbon ou le pétrole dans le développement industriel, les questions liées à l'énergie ont, dès le 19<sup>e</sup> siècle, reçu une certaine attention de la part de la théorie économique<sup>1</sup>. Mais il est clair que les années 1970 ont de ce point de vue marqué une rupture importante et permis à ces questions d'acquiescer une place plus centrale dans la discipline, au moins temporairement. Deux éléments contextuels semblent avoir joué un rôle majeur dans cette situation. Tout d'abord, la montée des préoccupations environnementales en général, au sein desquelles l'épuisement des énergies fossiles représente une question particulièrement cruciale. Ces préoccupations se diffusent à la fois dans l'opinion publique et dans les milieux académiques, notamment aux États-Unis. L'une de leurs manifestations les plus importantes est certainement le rapport du Club de Rome, *The Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972), dont les simulations suggèrent que la poursuite de la croissance serait impossible du fait de l'épuisement des ressources naturelles et de l'accumulation de pollutions. Ce rapport va avoir un impact considérable sur la discipline économique, dans la mesure où il va être perçu comme une attaque envers l'un des principaux objectifs poursuivis par les politiques macroéconomiques. Pour y répondre, et en contester les conclusions, des économistes tels que Solow (1974) et Stiglitz (1974) vont proposer les premiers modèles de croissance avec des ressources épuisables. Ces contributions vont donner une nouvelle dynamique à la théorie néoclassique des ressources naturelles dans les années 1970.

Si cette préoccupation pour l'épuisement des ressources est indéniablement présente dans les travaux portant plus spécifiquement sur l'énergie, le premier choc pétrolier de 1973, et sa réplique en 1979, vont jouer un rôle encore plus important dans ce domaine. 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 1972 et ne parvient pas à suivre la demande, entraînant une dépendance accrue aux importations. Dans la période qui suit cet événement, 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 importants<sup>2</sup>.

Pour approfondir ces questions, l'approche standard va consister à s'appuyer sur le formalisme de la théorie néoclassique de la croissance et sur les méthodes empiriques qui y sont associées. À la suite des contributions fondatrices de Solow (1956, 1957), la théorie

---

1. Voir par exemple Missemmer (2017) pour une histoire de l'analyse économique des énergies fossiles entre la fin du 19<sup>e</sup> siècle et le début du 20<sup>e</sup>.

2. James Griffin (1995) témoigne rétrospectivement des spécificités de cette période en la matière : « 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'étaient pas exprimée 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. »

Cette période voit également l'émergence d'un champ spécialisé dans l'analyse économique des questions énergétiques. La 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.

néoclassique de la croissance est devenue très populaire dans les années 1960 (Boianovsky et Hoover, 2009). Sur le plan empirique, elle donne un nouvel élan à la comptabilité de la croissance, bien que celle-ci lui soit antérieure (Crafts, 2009). Denison (1962) et Jorgenson et Griliches (1967) vont notamment fournir des contributions importantes dans ce domaine, en réduisant la part inexplicée de la croissance, aussi appelée résidu de Solow. Ce cadre d'analyse repose notamment sur la notion de fonction de production agrégée en guise de représentation formelle du processus de production.

Dans ce contexte, on s'intéresse ici tout d'abord aux travaux empiriques sur l'énergie qui se sont inscrits dans la continuité de l'approche néoclassique de la production et de la croissance. Deux aspects apparaissent particulièrement importants de ce point de vue. 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. Sans clore tout à fait le débat, la contribution de Frondel et Schmidt (2002) apporte néanmoins une explication convaincante des divergences, qui 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 relation entre l'énergie et la productivité. Jorgenson (Hudson et Jorgenson, 1974, 1978; Jorgenson, 1984) est notamment très intéressé par ces questions et convaincu du rôle central de l'énergie, tandis que Denison (1979a) en minimise l'importance.

Cependant, après avoir occupé une position relativement importante dans la théorie économique des années 1970 et au début des années 1980, les questions relatives à l'énergie vont progressivement refluer vers des courants spécialisés, en marge de la discipline. Parmi ceux-là, on trouve notamment l'économie écologique, qui s'institutionnalise à la fin des années 1980. Ce courant accorde une place plus importante aux aspects physiques du processus économique, et s'inspire pour cela de la thermodynamique, c'est-à-dire de la physique de l'énergie. Parmi les diverses approches qui partagent cette vision, on se concentre ici sur celle qui se rapproche le plus de la perspective néoclassique standard, sur le plan théorique et méthodologique. Les premières contributions de cette approche sont fournies dès les années 1980 par Kümmel (Kümmel, 1982, 1989; Kümmel *et al.*, 1985), avant de connaître un regain d'intérêt au début des années 2000, sous l'impulsion notamment de Ayres (Ayres, 2001; Ayres *et al.*, 2003; Ayres et Warr, 2005). Tout en appartenant clairement au courant de l'économie écologique, ils s'y distinguent par le fait qu'ils cherchent à faire entrer la perspective thermodynamique dans le formalisme néoclassique des fonctions de production agrégées et à estimer empiriquement le rôle de l'énergie dans la production et la croissance. Bien que ce programme de recherche se poursuive de manière soutenue depuis lors, les ouvrages de Ayres et Warr (2010) et Kümmel (2011) en fournissent une première synthèse.

Ce double point de vue, à partir de l'approche néoclassique standard et de sa variante en économie écologique, donne une vision d'ensemble des enjeux méthodologiques que soulèvent la question de l'énergie dans le cadre d'une représentation agrégée de la production <sup>3</sup>.

---

3. Cet article ne vise donc pas à saisir l'intégralité des réflexions relatives à l'énergie dans la théorie économique, mais seulement celles qui permettent de saisir les enjeux méthodologiques propres à une représentation agrégée de la production. Parmi les questions qui pourraient apparaître proches, on trouve notamment 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.

Ce sont précisément ces enjeux méthodologiques qui constituent ici l'objectif principal. Pour les appréhender, on s'appuie sur le cadre des « modèles comme médiateurs » proposé notamment par Morgan et Morrison (1999), et actualisé par Morgan (2012). Ce cadre repose sur l'idée que les modèles disposent d'une certaine autonomie vis-à-vis de la théorie et des données empiriques, et permettent par là même de faire le pont entre les deux. Il souligne par la même occasion la diversité des fonctions que remplissent les modèles dans l'activité scientifique. Deux seront particulièrement importantes ici, celles d'instrument de mesure et de test empirique de la théorie. Au contraire, les fonctions d'exploration théorique ou d'évaluation de politique économique n'occupent pas une place centrale dans les travaux considérés.

Les enjeux théoriques ne sont pas pour autant absents des considérations méthodologiques, mais de ce point de vue on se concentre davantage sur la notion de représentation. La représentation renvoie à la relation qu'entretient le modèle avec la conception plus générale que l'on se fait du système étudié. Elle soulève donc de nombreuses questions conceptuelles ayant trait à l'interprétation du modèle. Sur ce point, on s'appuie également sur l'approche de Mäki (2009b) qui vise à rétablir des critères permettant d'évaluer la qualité d'un modèle. Il souligne notamment l'importance du « commentaire », au sens d'une discussion substantielle des caractéristiques conceptuelles du modèle et de leur pertinence à l'égard du problème considéré. En l'absence d'une telle discussion, le modèle est dépourvu de sens, et par extension, il n'est pas possible de fournir une interprétation convaincante des résultats empiriques qui en découlent. L'ensemble de ces catégories permettent notamment de questionner la nature de la fonction de production agrégée et des diverses méthodes d'estimation empirique dont elle fait l'objet.

Il apparaît également nécessaire de croiser cette analyse des modèles avec la littérature sur l'interdisciplinarité. Cette nécessité tient pour une part à la question de l'énergie elle-même, dont le concept même provient de la thermodynamique et implique donc une interaction entre la physique et l'économie. Si cette interaction se trouve réduite au minimum dans la plupart des travaux empiriques de l'approche néoclassique standard, elle est au contraire constitutive des travaux qui se situent dans le courant de l'économie écologique. Dans les deux cas, il est important de caractériser le type de rapport entre les disciplines qui sont en cause. On s'appuie pour cela sur les catégories générales proposées par Klein (2010), les réflexions de Mäki (2009a) sur l'impérialisme scientifique, et les contributions à la philosophie de l'économie écologique de Baumgärtner *et al.* (2008) et Spash (2012).

Dans cette perspective, la section 1 s'intéresse à la manière dont l'approche néoclassique standard s'est emparée de la question de l'énergie à partir des années 1970. Elle met en évidence les divergences quant au rôle de l'énergie dans la production et la croissance, tant du point de vue de sa substituabilité avec le capital que de sa relation avec la productivité. L'explication de ces divergences amène à souligner les difficultés méthodologiques sous-jacentes à ces approches, notamment en ce qui concerne l'utilisation de la fonction de coût comme instrument de mesure. La section 2 concerne l'approche thermodynamique de la production et son incorporation dans le cadre de la fonction de production agrégée. Cette incorporation soulève rapidement de nombreuses questions conceptuelles du fait des difficultés à rendre compte des aspects physiques du processus de production dans une représentation agrégée. Par ailleurs, si elle contourne le problème empirique principal rencontré par l'approche néoclassique standard, cette perspective se retrouve confrontée à des difficultés nouvelles qui peuvent laisser penser que ses résultats empiriques sont davantage le produit d'un artifice mathématique. La conclusion souligne alors 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.

## 1 L'énergie dans l'approche néoclassique standard

L'approche néoclassique de la production et de la croissance s'est construite sur la théorie de la rémunération des facteurs à leur productivité marginale suggérée par Clark (1889) et son articulation dans le cadre formel d'une fonction de production par Wicksteed (1894). Ce cadre est ensuite utilisé par Cobb et Douglas (1928) pour étudier empiriquement les variations conjointes d'indicateurs agrégés de la production, du capital et du travail. Solow (1956, 1957) quant à lui fournit le premier modèle théorique de croissance utilisant une fonction de production agrégée, et il se sert de ce même outil pour étudier empiriquement les contributions respectives du capital et du travail à la croissance. Alors que chez Wicksteed la terre était encore considérée comme un facteur de production central, à l'image des classiques, le capital et le travail sont les seuls facteurs de production considérés dans ces travaux ultérieurs.

Solow n'est pas le premier à avoir réalisé une 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 (Crafts, 2009). Les travaux de Solow s'avèrent cependant cruciaux dans la mesure où ils relient cette décomposition à la représentation formelle de la production à l'aide d'une fonction agrégée. Ils confirment par ailleurs le résultat paradoxal déjà identifié par les études antérieures, 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 exogène. Les travaux de comptabilité de la croissance, tels que ceux de Denison (1962) ou de Jorgenson et Griliches (1967) vont alors chercher à réduire cette part attribuable au progrès technique en ajustant les données concernant les facteurs de production pour mieux tenir compte du degré d'utilisation du capital et de la qualité du travail.

C'est sur ce cadre théorique et empirique, devenue dominant dans les années 1960, que vont s'appuyer les travaux des années 1970 sur l'énergie. Alors que le capital et le travail étaient jusque là considérés comme les seuls facteurs de production pertinents à prendre en compte, l'une des principales ruptures opérées par ces travaux va consister à introduire l'énergie dans la fonction de production agrégée. Deux questions centrales vont alors apparaître. La première concerne le degré de substituabilité entre l'énergie et le capital, et va donner lieu à une controverse importante dans l'*American Economic Review* entre Griffin et Gregory (1976) d'une part, et Berndt et Wood (1979) d'autre part. La seconde concerne la relation entre l'énergie et la productivité. Si elle ne se structure pas de manière aussi claire en une controverse entre deux camps, elle 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. Cette section analyse successivement ces deux questions, en tâchant d'en saisir les enjeux méthodologiques sous-jacents.

## 1.1 La controverse sur la substituabilité capital-énergie

La contribution qui va servir de point de départ à la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital est celle de Berndt et Wood (1975)<sup>4</sup>. Ces derniers s'intéressent à l'industrie manufacturière aux Etats-Unis, entre 1947 et 1971. Ils partent de l'idée qu'il existe une fonction de production agrégée pour ce secteur, reliant la quantité produite  $Y$ , aux quantités des quatre facteurs de production considérés que sont le capital  $K$ , le travail  $L$ , l'énergie  $E$ , et les autres matériaux intermédiaires  $M$ <sup>5</sup>. Ils font également l'hypothèse que les rendements de cette fonction de production sont constants, et que le progrès technique est neutre au sens de Hicks, c'est-à-dire qu'il est indépendant des facteurs de production. La fonction de production prend donc la forme suivante :

$$Y = F(K, L, E, M, t) = A(t)F_1(K, L, E, M) \quad (1)$$

Si un niveau de production  $Y$  et des prix  $P_K, P_L, P_E, P_M$  sont donnés, cette fonction de production permet de trouver les quantités qui minimisent le coût de production total. Au niveau de ces quantités optimales, les productivités marginales des facteurs doivent être égales aux prix<sup>6</sup>. Sur cette base, il est donc possible d'exprimer les quantités en fonctions des prix, et *in fine* d'obtenir une fonction de coût de la forme suivante :

$$C = G(Y, P_K, P_L, P_E, P_M) \quad (2)$$

C'est cette fonction de coût qui va être réellement estimée par Berndt et Wood, et en ce sens l'estimation de la fonction de production correspondante est *indirecte*. Pour cela, il est cependant nécessaire de préciser une forme fonctionnelle. Ils choisissent une fonction de coût dite « logarithmique transcendantale » ou « Translog », qui équivaut à la relation suivante<sup>7</sup> :

$$\begin{aligned} \ln C &= \ln \alpha_0 + \ln Y + \sum_i \alpha_i \ln P_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \gamma_{ij} \ln P_i \ln P_j, \\ \gamma_{ij} &= \gamma_{ji}, \sum_i \alpha_i = 1, \sum_j \gamma_{ij} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Les atouts avancés en faveur de cette forme fonctionnelle sont qu'elle n'impose pas de restriction *a priori* sur les élasticités de substitution entre les facteurs, et qu'elle constitue une approximation au second degré de n'importe quelle fonction de coût. En notant  $S_K, S_L, S_E$ , et  $S_M$ , les parts de chaque facteur dans le coût total, les fonctions de demande

---

4. Berndt est à cette époque un contributeur important des débats économétriques. Outre cet article avec Wood, ses publications les plus influentes concernent l'estimation de la substituabilité entre le travail et le capital (Berndt et Christensen, 1973), ainsi que les estimations de modèles structurels non linéaires (Berndt *et al.*, 1974).

5. Pour cette raison, ce modèle est parfois évoqué sous l'acronyme KLEM. 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.

6. Ce raisonnement fait parfaitement sens au niveau de producteurs isolés, sans préjuger que ceux-ci agissent effectivement ainsi. Cependant, les travaux de macroéconomie de la croissance extrapolent ce résultat à l'échelle de l'économie dans son ensemble, sans apporter de preuve formelle qu'il s'agit là d'une conséquence des comportements maximisateurs à l'échelle individuelle. Une telle preuve apparaît d'autant plus invraisemblable que l'existence même d'une fonction de production agrégée qui serait déduite des fonctions de production microéconomiques nécessitent des conditions très contraignantes, comme l'a démontré Fisher (1969).

7. La fonction Translog est introduite peu de temps auparavant par Christensen *et al.* (1973). Dans les équations qui suivent, les indices  $i$  et  $j$  parcourent systématiquement l'ensemble des valeurs  $K, L, E, M$ .

des différents facteurs prennent la forme <sup>8</sup> :

$$S_i = \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln P_j \quad (4)$$

Ce sont ces fonctions de demande qui sont estimées par Berndt et Wood à l'aide d'une variante de la méthode des moindres carrés <sup>9</sup>. Les données nécessaires pour réaliser ces estimations sont les séries temporelles des prix des facteurs et de leurs parts respectives dans le coût total de la production manufacturière, entre 1947 et 1971. Pour le capital, le prix est calculé de manière indépendante et multiplié par la quantité pour obtenir la dépense totale associée. De plus, cette quantité tient compte du degré d'utilisation du capital et mesure donc les services rendus par le capital. Pour les autres facteurs, le montant total des dépenses associées est divisé par la quantité pour obtenir un prix. Dans tous les cas, cela nécessite de calculer la quantité utilisée de chaque facteur, qui est obtenue par la méthode d'agrégation de Divisia. Cette méthode tient compte des prix et des changements de qualité des éléments qui sont agrégés. Elle est donc purement économique, et à l'inverse, elle ne repose pas sur des bases physiques. Ce point est particulièrement important en ce qui concerne l'énergie, qui dispose également de plusieurs critères d'agrégation physiques <sup>10</sup>.

Une fois les estimations économétriques des paramètres de la fonction de coût réalisées, on peut 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 de Allen (AES) entre les facteurs  $i$  et  $j$ , notée  $\sigma_{ij}$  <sup>11</sup>. Dans le cas de la fonction de coût Translog, cette élasticité s'expriment sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_i S_j} + 1, i \neq j \quad (5)$$

La deuxième mesure de la substituabilité est donnée par l'élasticité de la demande du facteur  $i$  par rapport au prix du facteur  $j$ , notée  $\eta_{ij}$ . Dans le cadre de la fonction Translog, elle vérifie l'équation :

$$\eta_{ij} = S_j \sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_i} + S_j, i \neq j \quad (6)$$

Sur la période allant de 1947 à 1971, les résultats empiriques de Berndt et Wood suggèrent alors que l'énergie et le capital sont plutôt des facteurs complémentaires <sup>12</sup>. Quand

8. Ces relations découlent de l'utilisation du lemme de Shephard, qui indique que la quantité demandée de chaque facteur est égale à la dérivée partielle de la fonction de coût par rapport au prix de ce facteur. Il constitue en quelque sorte l'équivalent de la rémunération à la productivité marginale du point de vue de la fonction de coût.

9. Cette estimation présente cependant plusieurs difficultés. Tout d'abord, au niveau d'agrégation choisi, il se peut que les prix ne soient pas tout à fait exogènes et qu'ils ne soient pas décorrélés des erreurs. Pour contourner ce problème, Berndt et Wood recourent à la méthode des variables instrumentales, consistant à régresser au préalable les prix sur des variables considérés exogènes, et à utiliser ces variables dans l'estimation des fonctions de demande des facteurs. La deuxième difficulté provient du fait que la somme des  $S_i$  est toujours égale à 1, ce qui implique que la matrice de covariance des erreurs est singulière. Pour cette raison, il est nécessaire de n'estimer que trois équations parmi les quatre, à l'aide de la méthode des moindres carrés en trois étapes (« *three-stage least squares* » ou 3SLS). L'estimation n'est cependant pas indépendante des équations choisies. Pour obtenir une estimation invariante, il convient d'itérer la méthode des moindres en trois étapes jusqu'à convergence (« *iterative three-stage least squares* » ou I3SLS).

10. Les rapports entre les différentes méthodes d'agrégation de l'énergie sont discutés plus longuement dans la section 2.2.

11. Cette élasticité est une des généralisations possibles de l'élasticité de substitution définie par Hicks dans le cas de deux variables. Sa définition formelle et son expression à l'aide de la fonction de coût ont notamment été élaborées par Uzawa (1962).

12.  $\sigma_{KE}$  se situe aux alentours de  $-3,2$  et  $\eta_{KE}$  est proche de  $-0,15$ .

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 limitée<sup>13</sup>. 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 notamment 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 devienne 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<sup>14</sup>.

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). Le problème le plus important est selon eux 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 aux variations de prix ne peuvent se faire par un renouvellement des biens d'équipement donnant lieu à une plus grande efficacité, mais seulement par une modification de l'utilisation des capacités. Or, à équipement donné, la quantité d'énergie consommée est complémentaire de la durée d'utilisation. Pour Griffin et Gregory, cet aspect explique les résultats trouvés par Berndt et Wood<sup>15</sup>.

A 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.

Du fait d'un manque de données sur les matériaux intermédiaires, 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 Divisia<sup>16</sup>. 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 élevé<sup>17</sup>. De l'autre, Griffin et Gregory trouvent que l'énergie et le capital sont substituables et non complémentaires<sup>18</sup>. 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 leur intuition initiale 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.

---

13.  $\sigma_{LE}$  est en moyenne de 0,65 et  $\eta_{LE}$  de 0,03.

14. Bien que Berndt et Wood n'y fassent pas directement référence, cela remet en question l'idée centrale des modèles théoriques de croissance (Solow, 1974; Stiglitz, 1974) selon laquelle la substitution du capital aux ressources permettrait de contrecarrer leur épuisement à long terme. Voir Couix (2019) sur ce sujet.

15. 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.

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

17.  $\sigma_{LE}$  varie de 0,72 à 0,87 selon les pays, et  $\eta_{LE}$  de 0,05 à 0,15.

18.  $\sigma_{KE}$  est entre 1,02 et 1,07, et  $\eta_{KE}$  entre 0,08 et 0,17.

En réponse, Berndt et Wood (1979) vont proposer une autre interprétation des différences entre leurs estimations et celles de Griffin et Gregory<sup>19</sup>. Cette interprétation repose pour l'essentiel sur l'omission des matériaux intermédiaires  $M$  dans l'estimation réalisée par ces derniers. Selon Berndt et Wood, cette omission revient à supposer que la fonction de production est séparable par rapport à  $(K, L, E)$  d'un côté et  $M$  de l'autre. Cette propriété signifie qu'il existe une fonction  $f$  de  $K, L$ , et  $E$ , et une fonction  $F^*$  de deux variables, telles que :

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

Ils définissent alors l'élasticité prix *brute*  $\eta_{KE}^*$  comme étant celle calculée par rapport à  $f$ . D'autre part, en notant  $V = f(K, L, E)$ , ils définissent  $S_{EV}$  comme la part en valeur de  $E$  dans  $V$ , et  $\eta_{VV}$  comme l'élasticité de la demande de  $V$  par rapport au prix de  $V$ . L'élasticité  $\eta_{KE}$ , qualifiée d'élasticité prix *nette*, vérifie alors la relation :

$$\eta_{KE} = \eta_{KE}^* + S_{EV}\eta_{VV} \quad (8)$$

L'élasticité nette est donc toujours inférieure à l'élasticité brute, car  $S_{EV}$  est positif par définition, et  $\eta_{VV}$  est négatif par hypothèse. Selon Berndt et Wood, l'estimation de Griffin et Gregory correspondrait à l'élasticité brute, puisqu'ils omettent la variable  $M$ , tandis que la leur mesurerait l'élasticité nette. Leurs résultats seraient donc compatibles, et mesureraient simplement des élasticités différents<sup>20</sup>.

Griffin (1981) réplique par un court commentaire sur l'article de Berndt et Wood, dans lequel il suggère que la distinction entre élasticités brute et nette est insuffisante pour expliquer les différences entre leurs estimations respectives. Pour cela, il faudrait une substituabilité entre les matériaux intermédiaires et les autres facteurs de production qu'il juge trop élevée<sup>21</sup>. De plus, il souligne que si les différences entre estimations s'expliquent par la présence ou non de  $M$ , alors cela devrait également s'appliquer si l'on réalise une estimation d'un modèle KLE avec des séries temporelles. En procédant à une telle estimation, il trouve une élasticité de substitution plus élevée que l'estimation de Berndt et Wood, mais encore loin de celle de Griffin et Gregory<sup>22</sup>.

En réponse à ce commentaire, Berndt et Wood (1981) admettent que la distinction entre élasticités brute et nette 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 et long termes.

19. La même année, Berndt et Khaled (1979) réalisent une nouvelle étude sur l'industrie manufacturière des Etats-Unis entre 1947 et 1971. Ils adoptent un modèle KLEM imposant moins de restrictions, notamment en ne présupposant pas des rendements constants et la neutralité du progrès technique. Leurs résultats empiriques aboutissent à nouveau à l'idée d'une complémentarité entre l'énergie et le capital.

20. Pour illustrer cela, Berndt et Wood utilisent les données de Griffin et Gregory sur les États-Unis pour l'année 1965, lorsque  $S_{EV} = 0,13$ . Ils notent que si  $\eta_{VV} = -1,5$ , alors l'élasticité brute estimée de 0,13 implique une élasticité nette de  $-0,065$ , à comparer avec leur propre estimation de  $-0,14$ .

21. Sur cette base, Griffin calcule que  $\sigma_{VM}$  devrait être égal à 3,7 pour expliquer la différence entre les deux estimations uniquement à l'aide de la distinction entre élasticités brute et nette.

22. Griffin trouve  $\sigma_{KE} = -1,31$ , là où Berndt et Wood trouvent  $-3,2$ , et Griffin et Gregory 1,07.

Par ailleurs, Berndt et Wood (1981) suggèrent que les données utilisées ont été construites de manière différentes, et que cela contribuerait également à expliquer les différences d'estimation<sup>23</sup>. 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 Gregory<sup>24</sup>. 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 inexplicable demeure et que « la raison pour laquelle ces différences persistent est mystérieuse » (Berndt et Wood, 1981, 1109)<sup>25</sup>.

## 1.2 Aspects méthodologiques de la controverse et de ses suites

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 termes de zone géographique et de périmètre (pays, secteur, entreprises, etc), tout en conservant une certaine unité méthodologique. Dans leur méta-analyse, Koetse *et al.* (2008) ont sélectionné 34 études différentes réalisées entre 1975 et 2002, qui leurs fournissent 317 estimations d'élasticités prix<sup>26</sup>. 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 la littérature en question ont par ailleurs été réalisées périodiquement (Apostolakis, 1990; Frondel et Schmidt, 2002). On ne cherche pas ici à faire un examen exhaustif de cette littérature, mais plutôt à approfondir les enjeux méthodologiques sous-jacents, et à voir comment certaines contributions ont cherché à y répondre.

On s'intéresse pour commencer à la manière dont l'énergie est introduite dans la théorie de néoclassique de la production. De ce point de vue, il convient de souligner l'absence de références à la signification physique du concept d'énergie, et plus généralement l'absence d'une réflexion sur le rôle spécifique de l'énergie dans le processus de production. 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. Dans ce cadre, 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. Il en va donc là de ce que Mäki (2009a) qualifie d'expansion « dérivationnelle » du domaine de la théorie. C'est-à-dire qu'il s'agit d'une application d'outils propres à une discipline dans un domaine se trouvant à l'intersection avec une autre, en l'occurrence ici avec la physique et l'ingénierie. Cela caractérise une forme faible d'interdisciplinarité, au sens où l'interaction entre les disciplines est réduite au minimum (Klein,

23. Berndt et Wood notent d'une part que la mesure du prix du capital  $P_K$  qu'ils utilisent inclut les taxes, tandis que celle de Griffin et Gregory ne les prend pas en compte. D'autre part, en calculant les revenus du capital comme la différence entre la valeur ajoutée et les salaires, Griffin et Gregory surévaluent ceux-ci selon eux.

24. Alors que l'estimation initiale par Berndt et Wood de l'élasticité nette  $\eta_{KE}$  était de  $-0,14$ , ils trouvent une élasticité prix brute  $\eta_{KE}^*$  égale à  $-0,11$  sans révision des données, et  $0,05$  avec, là où Griffin et Gregory avaient obtenu  $0,13$  avec leurs données en coupe transversale.

25. L'estimation de  $\eta_{KE}^*$  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, et notamment que la rémunération du capital devrait prendre en compte les taxes.

26. Pour les travaux à partir de séries temporelles, tels que Berndt et Wood (1975), les estimations relatives à différentes dates sont utilisées. Pour les études en coupe transversale, tels que Griffin et Gregory (1976), ce sont au contraire les estimations par pays qui sont sélectionnées.

2010).

La question de l'interdisciplinarité n'offrant pas ici davantage matière à réflexion, on se concentre sur les enjeux méthodologiques propres aux rapports entre théorie, modèles, et données. Il convient tout d'abord de revenir sur la manière dont ces enjeux se manifestent dans les travaux fondateurs de Berndt et Wood d'une part, et Griffin et Gregory d'autre part. Dans l'ensemble, ceux-ci font preuve d'une certaine prudence à l'égard de leurs résultats empiriques. Berndt et Wood (1979, 351) concluent ainsi que les « questions empiriques concernant la complémentarité [entre l'énergie et le capital] ne sont pas encore toutes réglées », et ils font notamment référence aux problèmes de mesure des variables et de spécification des modèles. De leur côté, Griffin et Gregory mentionnent deux problèmes dès le début de leur premier article sur le sujet :

First, the existence of an aggregate manufacturing cost function might be questioned. A second tack [*sic*] is to consider the ability of econometric techniques to elicit such a function if one does indeed exist. (Griffin et Gregory, 1976, 845)

Bien qu'ils passent outre pour mener à bien leurs estimations empiriques, ils soulèvent donc la question de la pertinence d'un modèle agrégé<sup>27</sup>. Cette question est à nouveau soulevée par Griffin (1981, 1102), qui remarque que les études au niveau des industries ont trouvé que « l'énergie elle-même ne forme pas un agrégat ». Mais il écarte ce problème en suggérant que « l'hypothèse d'un agrégat d'énergie permet des simplifications théoriques et empiriques considérables qui compensent probablement le sacrifice en terme de réalisme ».

Outre ces questions empiriques, l'adoption d'un modèle agrégé soulève des problèmes conceptuels. Ceux-ci concernent en particulier la notion de substitution, du fait de la distinction entre court et long termes. Cette distinction est initialement présentée 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 et long termes 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. 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 différeraient par leur intensité énergétique. C'est vraisemblablement de ces problèmes conceptuels qu'émerge en partie la confusion autour de la signification des estimations empiriques.

---

27. Griffin et Gregory insèrent notamment une référence explicite à la contribution de Fisher (1969) qui questionne l'existence même d'une fonction de production agrégée en montrant qu'elle ne peut être déduite simplement de fonctions de production microéconomiques. Ils reviennent par ailleurs sur le sujet en conclusion de leur article, lorsqu'ils mentionnent, parmi les « questions importantes qui n'ont pas reçu suffisamment d'attention », les « biais d'agrégation » et le fait que les « différences de substitution entre formes d'énergie pourraient exclure le recours à une variable agrégée » (1976, 855).

Par ailleurs, derrière cette distinction entre substituabilités de court et de long termes, il semble y avoir une hiérarchie implicite, à savoir que celle de long terme est la plus pertinente. Ce présupposé n'est jamais réellement explicité, mais il est perceptible par exemple lorsque Griffin et Gregory (1976, 855, italiques ajoutées) affirment qu'à partir de leurs estimations ils « *rejettent* les résultats de Berndt et Wood [...] concernant la complémentarité entre le capital et l'énergie »<sup>28</sup>. Cette hiérarchie ne va cependant pas de soi, car on pourrait penser que l'utilité de l'une ou l'autre des estimations dépend d'abord des objectifs poursuivis. Si l'on souhaite par exemple comprendre l'effet d'un choc pétrolier, alors la substituabilité de court terme apparaît plus pertinente, au moins pour les premières années qui suivent<sup>29</sup>. Dans cette perspective, la dualité des estimations ne serait donc pas un problème en soi, mais il conviendrait pour chaque problème spécifique de se questionner sur le choix le plus adéquat. La limite entre court et long termes étant en pratique relativement floue, ce choix n'est pas pour autant aisé.

Plutôt que de nier l'existence d'une hiérarchie entre court et long termes, Berndt et Wood vont questionner la nature même de cette dichotomie en ce qui concerne la substituabilité. Ils suggèrent notamment qu'elle n'a pas été suffisamment explorée sur le plan théorique. 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 ainsi que Morrison et Berndt (1981) procèdent. Après estimation de leur modèle, ils concluent au contraire que la complémentarité est plus importante dans le long terme que dans le court terme. Ils vont donc à l'encontre de l'intuition initiale de Griffin et Gregory<sup>30</sup>. Plutôt que de clore la question, l'approche par les modèles dynamiques ouvre donc tout un nouveau champ d'exploration.

La question des biais induits par une approche agrégée continue par ailleurs de se poser. Face à l'absence de consensus empirique, Apostolakis (1990) suggère d'aller dans la direction d'une désagrégation à tous les niveaux : les secteurs de demande d'énergie, les formes d'énergie, les équipements en capital, et même les travailleurs. Cette approche soulève à la fois des questions empiriques et théoriques. Sur le plan empirique, elle demande un degré de finesse plus important en ce qui concerne les données, pour pouvoir tracer précisément les différents flux d'énergie<sup>31</sup>. Sur le plan théorique, la désagrégation contribue à un éclatement de la notion de substitution dont on s'aperçoit qu'elle recouvre une variété de mécanismes : substitution entre les formes d'énergies, entre les types de capital, entre les demandes finales de bien, etc. L'effet agrégé devient alors la combinaison de ces différents mécanismes sous-jacents<sup>32</sup>.

Ce dernier aspect est bien illustré par la contribution théorique de John L. Solow

---

28. C'est également ainsi que le débat est perçu par Berndt et Wood (1979, 352, italiques ajoutées) : « Deuxièmement, il reste le problème, exprimé vigoureusement par Griffin et Gregory, que l'estimation de la complémentarité entre l'énergie et le capital fondée sur des séries temporelles annuelles reflète en fait des variations de court terme dans l'utilisation des capacités, et que la *'vraie'* relation de long terme est une substituabilité. »

29. A l'inverse, lorsque Berndt et Wood (1975) se servent de leur résultats pour discuter l'effet des incitations fiscales à l'investissement sur la consommation d'énergie, on peut penser que la substituabilité de long terme serait plus pertinente dès lors qu'un renouvellement des biens d'équipement est en cause, et non seulement un ajustement dans son degré d'utilisation.

30. 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.

31. Par ailleurs, s'il existe une classification stable des différentes formes d'énergie (pétrole, charbon, gaz, électricité, etc), le problème est moins clair en ce qui concerne le capital et le travail.

32. La multitude de mécanismes qui peuvent être impliqués derrière la notion de substitution n'est pas propre à cette controverse empirique. On la retrouve de manière très significative dans les premiers modèles de croissance intégrant les ressources naturelles (Solow, 1974; Stiglitz, 1974). Voir à ce sujet Couix (2019).

(1987)<sup>33</sup>. Ce dernier s'intéresse aux changements dans la composition de la demande finale de produits. Il montre qu'ils peuvent induire au niveau agrégé des phénomènes de complémentarité ou de substituabilité, selon les situations. Il 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 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. (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 production<sup>34</sup>. Cependant, ce que l'on peut plutôt retenir de la contribution de 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. Cela apparaît d'autant plus important que cette dimension conceptuelle détermine la manière dont les résultats empiriques peuvent ensuite être interprétés<sup>35</sup>.

D'un point de vue méthodologique, il en va ici de la capacité de « représentation » du modèle au sens de Morgan et Morrison (1999), c'est-à-dire du rapport entre le modèle et la réalité qu'il entend représenter. En l'occurrence, la réalité en question concerne l'ensemble des activités productives dans l'économie dans son ensemble ou dans un secteur particulier. De ce point de vue, ce qui fait défaut dans la littérature empirique étudiée ici c'est une discussion plus approfondie de la manière dont les différents facteurs, et en particulier l'énergie, entrent dans la production, et de la mesure dans laquelle le modèle en rend. Si un modèle constitue toujours une forme d'idéalisation de la réalité, il est néanmoins nécessaire de préciser les aspects sur lesquels porte cette idéalisation. C'est ce que Mäki (2009b) nomme le « commentaire », et ce qui doit permettre de cerner plus précisément le domaine de pertinence du modèle. Or cette dimension est très peu développée dans la littérature

---

33. Robert M. Solow ayant lui aussi contribué à la littérature sur les ressources naturelles, il est important de souligner qu'il s'agit là d'un autre économiste.

34. C'est effectivement ce qui transparait 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.

35. 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 Solow agit principalement dans le long terme, alors il pourrait expliquer en partie ce résultat paradoxal.

sur la substituabilité entre l'énergie et le capital. En l'absence d'une compréhension plus fine de ce que la fonction de production agrégée est censée représenter, le sens même de la notion de substitution est incertain. C'est ce que la contribution de Solow vient rappeler en fournissant l'une des rares discussions conceptuelles sur le sujet <sup>36</sup>

D'autres contributions ont suggéré que la controverse était construite en quelque sorte sur une illusion. C'est le cas de celle de Thompson et Taylor (1995). Leur approche repose sur l'idée que l'élasticité de substitution partielle de Allen (AES) est une mesure inappropriée de la substituabilité. Ils proposent au contraire de s'intéresser à l'élasticité de substitution de Morishima (MES) <sup>37</sup>. Ils calculent la valeur de cet indicateur pour un certain nombre d'études antérieures qui laissaient apparaître des disparités importantes d'AES. Ils concluent alors que les MES ne présentent plus de forte variabilité, et qu'elles confirment une substituabilité entre l'énergie et le capital. La démonstration n'est cependant pas convaincante à plusieurs égards. Tout d'abord, les MES pour le seul secteur manufacturier des États-Unis donnent encore à voir une certaine variabilité <sup>38</sup>. Ensuite, les différences d'AES traduisent un problème plus général, à savoir l'existence 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. Enfin, la controverse se fondait également sur les disparités en termes d'élasticités prix, auxquelles cet argument ne fournit aucune explication.

A l'inverse, Frondel et Schmidt (2002) fournissent l'argument le plus clair et le plus convaincant pour expliquer les divergences entre les diverses estimations des élasticités prix. Leur explication s'appuie sur l'expression de l'élasticité prix  $\eta_{ij}$  donnée par la formule (6). Lorsque celle-ci est appliquée à l'élasticité de la demande en capital par rapport au prix de l'énergie, on obtient :

$$\eta_{KE} = \frac{\gamma_{KE}}{S_K} + S_E \quad (9)$$

Frondelet 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  $\gamma_{KE}$  est en général de faible amplitude <sup>39</sup>. En particulier, sa valeur absolue est largement inférieure à la part en valeur du capital  $S_K$ , de sorte que le premier terme dans la partie de droite ne permet pas de dévier grandement de  $S_E$ . Dit autrement, lorsque  $S_E$  est élevée on doit s'attendre à ce que  $\eta_{KE}$  le soit également. Et lorsque  $S_E$  est faible,  $\eta_{KE}$  devrait être proche de 0, voire négatif. De plus, cette relation est d'autant plus forte que  $S_K$  est important relativement à  $\gamma_{KE}$ .

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 les résultats de soixante-neuf estimations, et ils obtiennent le graphique reproduit dans la

36. Dans une certaine mesure cependant, l'objectif affiché de l'article de Solow n'est pas atteint. Celui-ci affirme en effet en introduction que « le but de cet article est de suggérer que la réconciliation des estimations n'est peut-être pas possible » (1987, 606). Or le mécanisme qu'il propose permet seulement d'expliquer pourquoi une hausse des prix de l'énergie pourrait entraîner un effet de substitution à un endroit et un moment donné, et un effet de complémentarité dans une autre situation. Mais les travaux empiriques trouvent des estimations différentes pour les mêmes endroits et aux mêmes moments, notamment pour les États-Unis dans les années 1960.

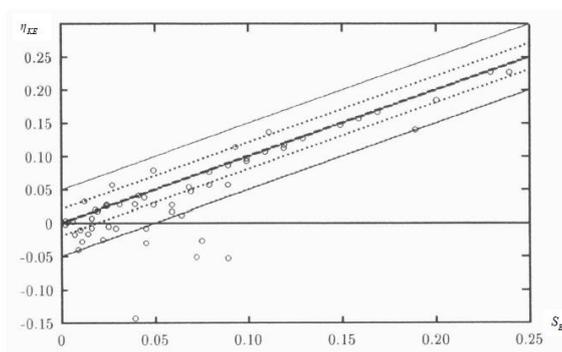
37. La MES a été introduite par Morishima (1967). La critique de Thompson et Taylor s'insère dans une tendance plus générale à la remise en cause de l'AES comme extension naturelle du concept d'élasticité de substitution formulé par Hicks pour deux variables. Cette critique est initiée notamment par Blackorby et Russell (1989).

38. Elles vont de  $-0,07$  à  $0,33$ .

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

figure 1<sup>40</sup>. L'estimation de Berndt et Wood (1975) est celle qui obtient l'écart le plus important, avec une différence de 0,20. 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 en effet que  $S_E$  et  $S_K$  soient faibles, et que le coefficient estimé  $\gamma_{KE}$  soit négatif. Il est donc normal qu'un nombre plus important d'études trouvent que l'énergie et le capital sont substituables.

FIGURE 1 – La relation entre  $\eta_{KE}$  et  $S_E$



Source : Frondel et Schmidt (2002, 63)

L'argument de Frondel et Schmidt pour expliquer les divergences entre les estimations d'élasticités prix est compatible avec les explications initialement fournies par Berndt et Wood (1979, 1981). Ils 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 probable de conclure à une substituabilité entre l'énergie et le capital<sup>41</sup>. A l'inverse, dans ce cadre, 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<sup>42</sup>.

Il est important de noter que cette analyse a une portée plus générale que la seule question de la substituabilité entre l'énergie et le capital. Les résultats en ce qui concerne les autres élasticités prix, par exemple entre le capital et le travail, sont directement concernés par cet argument<sup>43</sup>. La conclusion tirée par Frondel et Schmidt est donc d'autant plus

40. Frondel et Schmidt notent en particulier que l'écart entre  $S_E$  et  $\eta_{KE}$  est supérieur à 0,05 dans seulement cinq cas. 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  $0,15$ .

41. Bien que Frondel et Schmidt ne la discute 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.

42. C'est notamment le cas du fait que les données pour  $M$  sont disponibles pour un nombre restreint de pays et par conséquent sont souvent omises dans les études basées sur des données en coupe transversale.

43. Par ailleurs, cet argument peut s'appliquer à toute élasticité prix déduite d'une estimation d'une fonction de coût de type Translog. Or cette forme est utilisée du fait qu'elle constitue une approximation du second degré de n'importe quelle fonction de production, ce qui lui confère un caractère très général.

importante. Selon eux, « 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 » (2002, 72).

La signification méthodologique de cette dernière remarque est fondamentale et demande à être approfondie. Ce qui est en cause derrière elle, c'est la « fonction » du modèle telle que l'envisagent notamment Morgan et Morrison (1999). En l'occurrence, cette fonction est celle d'un *instrument de mesure* qui doit permettre d'évaluer quantitativement une relation. La mesure est ici indirecte. C'est-à-dire que le degré de substituabilité ne se donne pas d'emblée sous une forme accessible, et 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 sujet à la question de savoir si l'on mesure bien ce que l'on souhaite mesurer, du fait notamment des biais qu'introduit la théorie.

Dans le cas présent, le problème ne se situe donc 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 cependant 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. Plus exactement, il provient du fait que le lien entre les deux repose uniquement sur l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. C'est en effet cette hypothèse qui permet de contourner l'estimation directe de la fonction de production et de passer par la fonction de coût, d'où découle la relation (9). Le cadre théorique surdétermine donc ici le résultat de la mesure.

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 capital<sup>44</sup>. 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 pas 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 cependant après 2008<sup>45</sup>.

Par ailleurs, il est important de noter que les résultats de la méta-analyse de Koetse *et al.* (2008) vont à l'encontre de l'explication des divergences entre estimations fournie par Frondel et Schmidt. A partir de l'ensemble des estimations qu'ils ont réuni, ils étudient statistiquement l'impact des différents facteurs pouvant expliquer les différences. Ils trouvent que l'effet de l'inclusion ou non de  $M$  est faible, tandis que le choix entre séries temporelles et données en coupe transversale a un impact significatif.

---

44. 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 la portée critique. A l'inverse, Hourcade *et al.* (2010) s'appuient sur cette dimension pour rejeter les fonctions de production habituellement utilisées dans les modèles économiques. Ils proposent au contraire une approche des techniques de production fondée sur celle des ingénieurs.

45. 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, et n'y apportent donc aucune réponse.

Néanmoins, l'argument de Frondel et Schmidt n'a à ce jour pas été contesté directement. Il convient donc de s'interroger sur ses conséquences en termes théorique et empirique. 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 rémunération à la productivité marginale 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. La plupart du temps, elle n'est même pas explicitement mentionnée comme l'une des hypothèses du modèle. 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 la théorie néoclassique de la production.

### 1.3 Des divergences sur la relation entre énergie et productivité

Les débats sur la substituabilité entre capital et énergie ont principalement une visée de politique économique. Ils entendent évaluer la pertinence d'une taxe sur l'énergie ou d'une subvention à l'investissement. Bien que l'on puisse s'en servir pour étudier les effets des chocs pétroliers, cela n'est jamais envisagé comme tel dans cette littérature. En parallèle, d'autres travaux vont cependant chercher à estimer plus précisément ces effets. S'ils s'inscrivent toujours dans le cadre de la théorie néoclassique de la production, leurs approches ne s'insèrent pas de manière claire dans les débats qui précèdent.

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 de la fonction Cobb-Douglas avec progrès technique suivante :

$$Y = A_1 e^{rt} K^\alpha L^\beta E^\gamma, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (10)$$

Ils souhaitent estimer cette fonction uniquement sur le secteur productif privé. Alors qu'ils disposent des données nécessaires pour  $K$  et  $L$ , les données concernant la consommation d'énergie dans ce secteur ne sont pas disponibles. Ils transforment donc l'équation précédente en utilisant l'hypothèse de rémunération à la productivité générale afin de faire intervenir le prix de l'énergie<sup>46</sup> :

$$Y = (A_2 e^{rt} K^\alpha L^\beta P_E^{-\gamma})^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (12)$$

46. D'après l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, la demande d'énergie s'exprime en fonction de son prix relatif  $P_E$  de la manière suivante :

$$E = \gamma Y P_E^{-1} \quad (11)$$

En introduisant cette équation dans la précédente et en isolant  $Y$ , on obtient donc la relation 12, où  $A_2 = \gamma^\gamma A_1$  est une nouvelle constante.

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 équation portant sur les prix des facteurs. C'est cette dernière équation mixte qui est estimée à partir des données du secteur productif privé. L'un des paramètres les plus importants dans cette approche est l'élasticité de production de l'énergie  $\gamma$ , qui mesure l'effet d'une variation de l'énergie sur la production. D'après leur estimation, cette dernière est de 0,12<sup>47</sup>.

Afin de déduire l'effet du premier choc pétrolier sur les capacités de production, ils comparent alors la production potentielle associée à leur modèle avec celle calculée par le Council of Economic Advisors (CEA). La production potentielle désigne dans ce cadre 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<sup>48</sup>. Par ailleurs, il construit l'indicateur de la quantité d'énergie utilisée dans le secteur productif privé qui faisait justement défaut à Rasche et Tatom. Il reconnaît cependant que ses données sont partielles, et donc sujet à caution. Au lieu de s'en servir pour estimer une autre forme de fonction de production, il estime l'équation simplifiée suivante, où  $U$  désigne le taux d'utilisation des capacités de production :

$$\ln\left(\frac{E}{Y}\right) = A + rt + a \ln(U) \quad (13)$$

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 alors l'effet propre de ce dernier 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 le premier, ce deuxième article va influencer Denison (1979a), l'un des principaux auteurs de la comptabilité de la croissance. Partant de l'estimation de Perry concernant la diminution de l'intensité énergétique, il ajoute à cela une critique de l'élasticité de production de l'énergie trouvée par Rasche et Tatom. L'hypothèse de rémunération à la productivité marginale implique en effet 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 cette part en valeur, ce qui mène à un effet se situant entre

47. Rasche et Tatom (1977b, 15) affirment par ailleurs que « l'hypothèse d'une fonction de production Cobb-Douglas ne peut pas être rejetée à partir des données examinées ». Dit autrement, l'estimation confirmerait la pertinence du modèle choisi.

48. Plus exactement, Perry conteste l'hypothèse que l'élasticité de la demande d'énergie par rapport à son prix est égale à 1, comme l'indique la relation (11). Cette hypothèse implique en effet que la hausse du prix de l'énergie de 57 % entre 1973 et 1976 aurait du réduire la demande de 34 %, ce qui paraît démesuré.

0,15 et 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 personnel pour l'énergie. Il en va autrement de Jorgenson, une autre figure importante de la comptabilité de la croissance. Hudson et Jorgenson (1974) vont notamment élaborer un modèle macroéconométrique visant à étudier l'effet des politiques énergétiques<sup>49</sup>. Sur la base de ce modèle, Hudson et Jorgenson (1978) vont étudier l'effet du premier choc pétrolier aux États-Unis<sup>50</sup>. Ils concluent que la quantité d'énergie consommée a diminué de 8,8 % et le 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). A 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 faible<sup>51</sup>.

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. Deux enjeux principaux se dégagent néanmoins. Premièrement, il apparaît important de distinguer les effets des différents facteurs qui affectent la consommation d'énergie, notamment l'effet des prix et l'effet du progrès technique. Deux méthodes sont utilisées pour cela, la fonction de demande d'énergie (Rasche et Tatom, 1977b) et la construction d'un contrefactuel (Perry, 1977; Hudson et Jorgenson, 1978). Mais les appréciations divergentes du rôle de l'énergie ne sont pas clairement reliées au choix de l'une ou l'autre.

Deuxièmement, l'estimation de l'élasticité de production est nécessaire pour évaluer l'impact des variations de la consommation d'énergie sur la production. Sur ce point, la diversité tient à la fois au choix des méthodes et au choix des données. Concernant les méthodes, il peut s'agir d'une estimation directe de la fonction de production (Perry, 1977), ou d'une estimation indirecte faisant intervenir les prix (Rasche et Tatom, 1977b; Hudson et Jorgenson, 1978). Mais l'estimation peut aussi se réduire à l'assimilation avec la part en valeur de l'énergie (Denison, 1979a). Les données peuvent être agrégées à un niveau donné (Rasche et Tatom, 1977b; Perry, 1977), ou être désagrégées en un certain nombre de secteurs (Hudson et Jorgenson, 1978).

S'il est moins aisé d'identifier les causes des désaccords quant à la relation entre énergie et productivité, cette diversité montre que la fonction de production agrégée est utilisée de manière très flexible par les différents auteurs. Il s'en dégage une conception *instrumentale* de l'utilisation des modèles. Plus précisément, la fonction de production sert à nouveau ici d'instrument de mesure au sens de Morgan et Morrison (1999). C'est-à-dire qu'elle permet de mesurer de manière indirecte des relations entre les variables pour lesquelles une procédure directe fait défaut. Cependant, cette flexibilité a aussi pour conséquence qu'il est difficile de cerner exactement quelle robustesse est attribuée à ces mesures. Dès lors que le modèle n'est plus conçu comme une représentation fidèle de la réalité, les estimations

---

49. Hudson et Jorgenson adoptent une représentation désagrégée de la production qui distingue une dizaine de secteurs différents. Chaque secteur est lui-même représenté par une fonction de coût Translog.

50. Sur le plan méthodologique, ils procèdent de manière similaire à Perry. Ils construisent un contrefactuel 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.

51. 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. A nouveau, cette différence provient donc d'un désaccord sur l'amplitude de l'élasticité de production.

empiriques qui en découlent sont sujet à caution. Les auteurs eux-mêmes ne s'étendent pas sur ces aspects épistémologiques, et il est donc difficile de savoir plus précisément quelle fiabilité ils confèrent à leurs estimations.

Par ailleurs, l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale apparaît à nouveau comme un élément théorique central. Elle se manifeste notamment sous la forme de l'égalité entre la part en valeur d'un facteur et son élasticité de production. Seul Perry (1977) n'y a pas recours car il procède à une estimation directe de la fonction de production. La plupart des autres travaux en font un usage implicite dès lors qu'ils procèdent à l'estimation de la fonction de coût (Hudson et Jorgenson, 1978) ou d'une fonction mixte (Rasche et Tatom, 1977b). Denison (1979a) est le seul à se contenter de cette hypothèse théorique pour estimer l'élasticité de production. À l'inverse, aucune de ces contributions ne remet explicitement en question cette hypothèse.

Enfin, il est important de noter un point commun entre tous ces travaux, qui les distingue de ceux concernant la substituabilité entre l'énergie et le capital. Il s'agit du fait que la mesure de l'énergie adoptée est une mesure physique, en général la « *British Thermal Unit* » (BTU). À l'inverse, les études sur la substituabilité avaient recours à une mesure économique utilisant les prix pour réaliser une agrégation par la méthode de Divisia. Cette différence ne fait cependant l'objet d'aucune discussion dans l'une ou l'autre des littératures.

Les travaux discutés dans l'ensemble de cette section montrent donc que les questions énergétiques sont relativement centrales dans les 1970 parmi les contributions empiriques sur la production et la croissance. 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 manière symptomatique, on retrouve ces préoccupations dans l'adresse présidentielle que Lawrence Klein (1978) prononce devant l'American Economic Association (AEA). 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<sup>52</sup>. 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). Cette ambition restera dans une large mesure lettre morte, et la question de l'énergie se verra repoussée dans les marges de la discipline durant les années 1980. Les travaux qui précèdent n'en soulèvent pas moins des questions méthodologiques importantes, dont les implications vont au-delà du sujet de l'énergie, et concernent plus généralement la théorie néoclassique de la production.

## 2 L'approche thermodynamique de la production et de la croissance

Les travaux qui précèdent constituent une extension assez directe de la théorie de la production néoclassique. S'ils prennent en compte l'énergie comme facteur de production, à l'inverse de la théorie la plus standard, ils restent très proche de cette dernière par

---

52. Klein mentionne explicitement les modèles KLEM comme étant la référence pour dans l'étude empirique des secteurs industriels. Les modèles désagrégés, tels que ceux de Jorgenson, sont quant à eux présentés comme un outil pertinent pour étudier l'économie dans son ensemble. 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 ».

leur recours à une fonction de production agrégée et à l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Les travaux dont il est question dans cette section marquent une distance plus importante vis-à-vis de la théorie néoclassique de la production, tout en conservant certains de ses outils, tels que la fonction de production agrégée. Théoriquement et institutionnellement, ils se situent davantage dans le courant de l'économie écologique. Les racines modernes de ce courant remontent aux années 1970 et son institutionnalisation date de la fin des années 1980. Il s'est en partie construit en opposition vis-à-vis de la théorie néoclassique des ressources naturelles, et propose notamment d'accorder une place plus importante aux aspects physiques du processus de production.

L'une des sources d'inspiration de l'économie écologique se trouve dans la thermodynamique, c'est-à-dire la branche de la physique qui étudie l'énergie. Deux principes de la thermodynamique sont particulièrement importants dans ce domaine<sup>53</sup>. Le premier principe stipule que, lors de chaque transformation physique d'un système dit « isolé », l'énergie totale du système est conservée. En d'autres termes, l'énergie *change de forme*, par exemple d'énergie mécanique en énergie thermique du fait de frictions, mais sa *quantité est conservée*. Le deuxième principe de la thermodynamique montre cependant que toutes les transformations entre différentes formes d'énergie qui en conservent la quantité ne sont pas possibles. En particulier, la chaleur dissipée dans l'atmosphère ne peut pas être convertie à nouveau en travail mécanique. Plus généralement, ce principe suggère que les transformations vont nécessairement dans le sens d'une « dégradation qualitative » de l'énergie. Pour en rendre compte, la physique introduit une nouvelle variable, nommée « entropie », et qui varie dans le sens inverse de la qualité de l'énergie du système considéré<sup>54</sup>. Le second principe de la thermodynamique prend alors le nom de loi d'entropie, et stipule que l'entropie d'un système isolé augmente vers un maximum.

L'ouvrage qui a le plus contribué à l'introduction des principes de la thermodynamique en économie est celui de Nicholas Georgescu-Roegen, intitulé *The Entropy Law and the Economic Process* (1971). Bien qu'il ait lui-même contribué à la formalisation de la théorie néoclassique au début de sa carrière, Georgescu-Roegen était alors devenu très critique envers cette dernière. Il rejetait en particulier les fonctions de production agrégées, et proposait un formalisme alternatif qualifié de modèle « flux-fonds ». Cependant, d'autres auteurs adoptant une approche thermodynamique très similaire ont par la suite mis en œuvre un programme de recherche empirique s'appuyant sur la fonction de production agrégée. Les premières contributions de cette approche sont fournies dès les années 1980, notamment par Reiner Kümmel (Kümmel, 1982, 1989; Kümmel *et al.*, 1985)<sup>55</sup>. Elles ne trouvent pas immédiatement d'échos, mais au début des années 2000, les travaux de Robert Ayres et de ses coauteurs (Ayres, 2001; Ayres *et al.*, 2003; Ayres et Warr, 2005) vont relancer ce programme de recherche. 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'hui. Pour en saisir les enjeux, il apparaît suffisant de se concentrer sur la période antérieure aux années 2010, qui se conclut notamment par la publication de deux ouvrages

---

53. Pour une introduction plus complète à la thermodynamique, voir par exemple Callen (1985).

54. La définition formelle de l'entropie est relativement technique, ce qui empêche de l'introduire ici. On peut à nouveau se référer à Callen (1985) pour plus de détails.

55. 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 1.

de synthèse par Ayres et Warr (2010), et Kümmel (2011)<sup>56</sup>.

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. Mais 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.

Sur le plan théorique, cette approche partage cependant des aspects importants de la théorie néoclassique de la production<sup>57</sup>. En particulier, elle s'appuie sur les fonctions de production agrégées et l'ensemble des notions qui les accompagnent, telles que celle d'élasticité de production. Afin de donner à l'énergie la place centrale que suggère la thermodynamique, ce programme de recherche va néanmoins procéder 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 la production qui soutient ces travaux. Pour cette raison, il apparaît pertinent les désigner sous le nom de « théorie thermodynamique de la production ».

Cette section s'intéresse précisément à la manière dont la conception thermodynamique de la production se confronte aux outils formels et empiriques de la théorie néoclassique. Il s'agit à la fois de comprendre les effets de ces outils sur la manière 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 1, et cherche à voir dans quelle mesure ce programme de recherche prolonge ou se distingue du précédent, apporte des réponses aux questions soulevées et en pose de nouvelles.

---

56. Au sein de l'économie écologique, d'autres travaux importants sur l'énergie se rapprochent de ceux de Ayres et Kümmel. On pense notamment aux contributions de Cleveland *et al.* (1984) et Cleveland *et al.* (2000) sur l'intensité énergétique, et celles de Stern (1993, 2000) sur la causalité entre énergie et croissance. Ces travaux se situent dans une approche thermodynamique du processus de production 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 l'on cherche ici à apprécier à la lueur des questions énergétiques.

57. En ce sens, on peut comprendre ce programme de recherche comme une tentative de rétablir le dialogue avec les économistes néoclassiques, là où l'économie écologique s'était initialement construite en opposition à la théorie néoclassique des ressources naturelles. 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 (Couix, 2019).

## 2.1 L'énergie comme facteur de production primordial

La motivation principale derrière la théorie thermodynamique de la production est le sentiment que le rôle de l'énergie a été sous-estimé dans la théorie néoclassique. 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 entend préciser 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 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<sup>58</sup>. Sur le plan physique, la quantité d'énergie utilisée dans le processus est conservée, du fait du premier principe de la thermodynamique. Mais, comme le note la dernière phrase de la citation précédente, l'entropie quant à elle augmente. C'est-à-dire que l'énergie a connu une forme de dégradation qui empêche de l'utiliser à nouveau dans un autre processus de production.

C'est donc bien la thermodynamique, et plus généralement une approche physique de la production, qui constitue le socle sur lequel se construit cette théorie. A 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 les amène à

---

58. Le travail humain quant à lui peut servir deux fonctions. D'un côté, il peut être impliqué directement dans la transformation de la matière à travers des activités physiques. Dans ce cas, la dépense biologique d'énergie est fortement liée à la finalité de l'activité de production elle-même. D'un autre côté, le travail sert également d'instance de contrôle permettant la coordination des activités de transformation en mobilisant des facultés cognitives. Si la dépense biologique d'énergie n'est dans ce cas plus étroitement liée au service de coordination lui-même, ce type d'activité ne peut se passer de celles pour lesquelles l'énergie constitue un facteur primordial.

adopter une représentation de la production similaire aux travaux étudiés dans la section 1, sous la forme d'une fonction de production agrégée avec  $K$ ,  $L$  et  $E$  comme facteurs<sup>59</sup> :

$$Y = F(K, L, E, t) \quad (14)$$

Sur le plan méthodologique, les éléments qui précèdent caractérisent donc d'emblée 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, c'est-à-dire dans l'appréhension conceptuelle de la question, à travers notamment la description du processus de production ci-dessus. La théorie néoclassique quant à elle est mobilisée au niveau analytique, c'est-à-dire qu'elle fournit les outils formels qui vont servir à analyser le problème. Il y a donc interdisciplinarités à la fois théorique et méthodologique, au sens de Klein (2010). La première 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). En ce sens, on peut également dire qu'il s'agit là d'une expansion « ontologique » du domaine de la théorie économique au sens de Mäki (2009a) : l'application des outils de cette dernière s'accompagne d'un renouvellement en profondeur de l'analyse de la production à la lueur de la dimension physique apportée par l'énergie.

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 1, cette hypothèse est omniprésente dans les travaux néoclassiques sur le sujet. Ici, c'est une utilisation très spécifique de cette hypothèse concernant les élasticités de production qui pose problème. Pour le comprendre, rappelons qu'étant donné une fonction de production  $Y = F(X_1, \dots, X_n, t)$ , l'élasticité de production d'un facteur mesure l'effet d'une variation de ce facteur sur la production. Formellement, elle est définie par :

$$\epsilon_i = \frac{X_i}{Y} \frac{\partial F}{\partial X_i} \quad (15)$$

Le taux de croissance de la production se décompose alors en une somme de termes dépendant chacun du taux de croissance d'un des facteurs :

$$\frac{dY}{Y} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \frac{dX_i}{X_i} + \frac{1}{Y} \frac{\partial F}{\partial t} dt \quad (16)$$

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, soit :

$$\epsilon_i = \frac{p_i X_i}{Y} = S_i \quad (17)$$

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,

---

59. 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 le représenter. 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).

150)<sup>60</sup>. Les dépenses liées à l'énergie représentant en général environ 5 % du PIB, elle implique donc une contribution marginale de l'énergie à la croissance, incompatible avec l'intuition thermodynamique qui guide ces travaux. Sur ce point, Ayres (2001) et Kümmel *et al.* (2002) font notamment référence à Denison (1979b)<sup>61</sup>. A l'inverse, ils ne discutent pas réellement du débat sur la substituabilité entre l'énergie et le capital<sup>62</sup>.

Le peu de référence au débat sur la substituabilité est d'autant plus étrange qu'il mène à occulter les similarités de leur problème avec celui identifié par Frondel et Schmidt (2002). Comme on l'a vu dans la section 1.2, ceux-ci 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 donc que l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale surdétermine le résultat des estimations empiriques. 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 que Ayres et Kümmel eux-mêmes ne s'y attardent pas.

Malgré ces remarques, la manière dont la théorie thermodynamique de la production entend contourner l'obstacle de la rémunération à la productivité marginale mérite d'être examinée car elle constitue l'une de ses principales divergences avec le cadre néoclassique standard. Le principal argument avancé à l'encontre de cette hypothèse de rémunération consiste à introduire des contraintes techniques qui affectent le résultat de l'optimisation réalisée par les producteurs<sup>63</sup>. De ce fait, les élasticités de production vérifie l'équation suivante, où  $s_i$  est un « *shadow price* » qui découle des contraintes :

$$\epsilon_i = \frac{X_i}{Y}(p_i + s_i) \quad (20)$$

Sur le plan formel, il est donc possible qu'un écart existe entre la part du facteur dans

60. 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).

61. Comme on l'a vu dans la section 1.3, Denison utilise effectivement cet argument dans sa brève discussion sur l'énergie. Cependant, il apparaît comme le seul à soutenir aussi clairement cette position.

62. Pourtant, celui-ci donne à voir une situation plus nuancée, dans laquelle un certain nombre de contributions soutiennent l'idée d'une complémentarité entre ces facteurs. Or si l'énergie et le capital sont des facteurs complémentaires, alors 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. La question de la substituabilité permet donc d'envisager le rôle de l'énergie sous un autre angle que celui adopté en se focalisant sur les élasticités de production.

63. Cette approche est suggérée dès le début par Kümmel *et al.* (1985), mais elle est seulement formalisée bien plus tard par Kümmel *et al.* (2010). Au niveau le plus général d'une fonction de production  $Y = F(X_1, \dots, X_n, t)$ , les contraintes sont représentées par des fonctions  $f_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  qui dépendent des variables  $X_1, \dots, X_n$ . Du fait de ces contraintes, les conditions de premier ordre pour obtenir une production optimale intègrent des termes supplémentaires qui sont déduits des fonctions de contrainte. C'est à dire qu'il existe des multiplicateurs de Lagrange  $\mu_1, \dots, \mu_m$  tels que :

$$\forall i = 1, \dots, n, \quad \frac{\partial F}{\partial X_i} - p_i + \sum_{j=1}^m \mu_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i} = 0. \quad (18)$$

On définit alors les *shadow prices* de la manière suivante :

$$s_i = - \sum_{j=1}^m \mu_j \frac{\partial f_j}{\partial X_i} \quad (19)$$

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 (14), deux contraintes sont mises en avant. La première concerne le degré d'utilisation du capital  $\omega(K, L, E)$ , et précise juste qu'il est nécessairement inférieur à 1<sup>64</sup> :

$$\omega(K, L, E) = \omega_0 \left( \frac{L}{K} \right)^\lambda \left( \frac{E}{K} \right)^\nu \leq 1 \quad (21)$$

La seconde contrainte nécessite de définir au préalable le niveau de capital nécessaire pour une automatisation maximale à un niveau de production donné, noté  $K_m(Y)$ . Les auteurs suggèrent 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<sup>65</sup> :

$$\frac{K}{K_m(Y)} \leq \rho_T(t) \quad (22)$$

Un échange de lettres entre Ayres et Robert Solow permet de voir comment cet argument des contraintes techniques est perçu du point de vue néoclassique<sup>66</sup>. 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 que les élasticités de production soient différentes des parts en valeur des facteurs<sup>67</sup>. 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 substitution<sup>68</sup>. Pour le convaincre de la pertinence de

64. Cette première contrainte souligne une différence conceptuelle par rapport aux travaux étudiés dans la section 1. En effet, la mesure du capital prenait alors 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'équipements, et son degré d'utilisation dépend des quantités d'énergie et de travail avec lesquels il est combiné.

65. 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.

66. Mis à part cet échange, il n'existe pas à ma connaissance de réponse à cet argument de la part des économistes néoclassiques.

67. Solow avance un premier argument formel. Il souligne que les contraintes impliquent effectivement que la productivité marginale diffère du prix seulement si l'optimum se situe dans une zone où elles sont actives. Plus précisément, il remarque : « Naturally, if one or more of the constraints are binding, elasticities and conventional cost shares will differ (though not in the interior of the permissible region, if it has an interior). » (Solow, Archives, Box 104, Dossier : 2008 Mar. 11-May 13). Étant donné que les contraintes explicites pour la fonction de production avec énergie sont formulées sous forme d'inégalités, c'est uniquement sur la frontière de l'espace délimité que cette condition est satisfaite.

68. 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

l'idée de contraintes techniques, Ayres tente alors de mimer le raisonnement utilisé dans un manuel de Gregory Mankiw pour justifier la rémunération à la productivité marginale. Reprenant à celui-ci l'exemple d'un processus aussi simple que la production de pain, il insiste sur le fait que la quantité d'énergie nécessaire est déterminée dans des proportions relativement précises. Suivant la rhétorique néoclassique, il propose ensuite d'extrapoler cette contrainte à l'économie dans son ensemble<sup>69</sup>.

D'un point de vue méthodologique, cet échange souligne le fait que le niveau agrégé offre peu de prise conceptuelle. 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. On retrouve donc ici le problème de la représentation au sens de Morgan et Morrison (1999), déjà identifié dans la section 1.2. Dans ce cas précédent, l'unité de la notion de substitution était remise en cause lorsque l'on examinait les mécanismes sur lesquels elle repose au niveau désagrégé. Cela mettait en évidence le peu d'attention portée par la littérature empirique à la signification conceptuelle du modèle. A 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<sup>70</sup>.

Dans l'ensemble, la formulation d'une critique de l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale présente donc certaines difficultés conceptuelles. Ces difficultés sont d'autant plus importantes à analyser que cette critique s'avère un préalable nécessaire pour donner du sens au reste de la démarche entreprise par Ayres et Kümmel, et en particulier à leurs estimations empiriques des élasticités de production. Les difficultés en question ne sont cependant pas tant le fait de leur approche 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 thermodynamique de la production.

---

13)

69. 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 104, 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.

70. 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 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 en effet 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. A l'inverse, ils pensent que leur approche s'insère mieux dans le cadre néoclassique. L'échange avec Solow montre cependant qu'elle n'est pas pour autant convaincante pour les économistes néoclassiques.

## 2.2 Une conception physique de la fonction de production agrégée

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 qui vise à en renforcer la dimension physique. Pour le voir, on peut s'intéresser tout d'abord à la manière dont Kümmel (1982) va chercher dès les débuts une nouvelle forme fonctionnelle jugée plus adaptée aux caractéristiques du processus de production. Cette fonction, dite « linéaire exponentielle » ou « Linex », prend la forme suivante :

$$Y = F(K, L, E) = AE \exp\left(-a \frac{L + E}{K} + ac \frac{L}{E}\right) \quad (23)$$

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<sup>71</sup>. La première stipule que le capital ne peut pas fonctionner sans une dépense minimale d'énergie ou de travail<sup>72</sup>. La seconde 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<sup>73</sup>.

Ces conditions aux limites relèvent donc des mêmes aspects du processus de production que les contraintes techniques de la section 2.1. La première porte sur le niveau d'utilisation des capacités de production. Mais là où la contrainte fixait une borne supérieure, elle s'intéresse plutôt au comportement lorsque le niveau d'utilisation est faible. La seconde condition porte sur le niveau d'automatisation du processus de production. Mais là où la contrainte fixait un plafond indépassable inférieur au stade d'automatisation maximale, cette condition précise les caractéristiques de ce dernier. 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 sujet aux réserves méthodologiques formulées vis-à-vis des contraintes. En particulier, ce type de caractéristiques techniques ne sont bien appréhendées qu'au niveau d'un processus de production spécifique, et leur signification 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

71. Partant d'une fonction de production agrégée  $Y = F(K, L, E)$  quelconque, dont les élasticités de production sont  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , Kümmel traduit tout d'abord les hypothèses fondamentales de la fonction de production, à savoir son caractère doublement différentiable et l'homogénéité de degré 1, sous la forme d'équations aux dérivées partielles sur  $\alpha$  et  $\beta$ . Pour trouver la fonction Linex, il résout ensuite ces équations en imposant les deux conditions aux limites qui suivent.

72. 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 :

$$\frac{L}{K} \rightarrow 0, \frac{E}{K} \rightarrow 0 \Rightarrow \alpha(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (24)$$

73. Le stade d'automatisation maximale est défini par le paramètre  $c$  qui fixe la quantité d'énergie par unité de capital utilisée au stade d'automatisation maximale  $K_m(Y)$ . Pour un niveau de production donné  $Y$ , cette condition se formalise donc par :

$$K \rightarrow K_m(Y), E \rightarrow cK_m(Y) \Rightarrow \beta(K, L, E) \rightarrow 0 \quad (25)$$

la signification des variables elles-mêmes. Pour Kümmel (1982, 190), les notions de « capacité physique et de traitement de l'information fournissent les concepts nécessaires pour agréger et mesurer les facteurs et la production industrielle »<sup>74</sup>. Bien que cette conception physique des variables agrégés 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. Parmi ces dernières, Kümmel (2011, 252-253) mentionne notamment celles de Joan Robinson (1953) et de Franklin M. Fisher (1969)<sup>75</sup>. La pertinence de la réponse apportée par la théorie thermodynamique de la production demande à être examinée sous deux angles. Tout d'abord, sous l'angle empirique, Kümmel entend préserver les données traditionnellement utilisées. La compatibilité de ces données avec le nouveau cadre conceptuel qu'il propose repose sur une hypothèse *ad hoc* concernant la stabilité du rapport entre la valeur monétaire et la mesure physique en termes d'information et d'énergie. Or la validation de cette hypothèse supposerait de pouvoir effectivement mesurer cette dernière, ce que l'hypothèse vise précisément à éviter en lui substituant la mesure monétaire. Cet argument est donc méthodologiquement problématique.

D'un point de vue 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. L'interdisciplinarité entre la physique et l'économie prend cependant ici une forme extrême. Suivant Spash (2012), on pourrait la caractériser comme une forme de « réductionnisme » physique, dans la mesure où 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.

La question de la mesure la plus adéquate des variables, tant sur le plan conceptuel qu'empirique, concerne également l'énergie elle-même. Contrairement à la plupart des travaux empiriques étudiés dans la section 1, cette mesure est dès le départ conçue de manière purement physique. Du point de vue de l'agrégation, la mesure traditionnelle de l'énergie apparaît *a priori* satisfaisante<sup>76</sup>. La mesure la plus traditionnelle est celle de l'énergie thermique d'une ressource énergétique donnée, par exemple en termes de *British thermal unit* (BTU). Elle permet d'agréger naturellement les différentes ressources entre elles.

Si cette agrégation ne soulève pas de problème proprement physique, 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. L'un des aspects les plus importants de la contribution de

---

74. 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.

75. La critique de Robinson se concentre sur la notion de capital agrégé. Elle estime que les différentes conceptions suggérées par les économistes néoclassiques sont incompatibles avec la représentation de la capacité de production associée au capital. Cette critique a déclenché ce qu'il est convenu d'appeler les « controverses cambrigiennes sur la théorie du capital ». Pour une analyse *a posteriori* de cette controverse voir par exemple Harcourt (1972) et Cohen et Harcourt (2003). Fisher quant à lui s'intéresse aux conditions qui permettraient de déduire une fonction de production agrégée de fonctions de production microéconomiques. Il montre que ces conditions sont très restrictives et mettent en doute la pertinence de la fonction de production agrégée.

76. L'origine même du concept d'énergie peut en effet être interprétée comme une tentative de mesurer des phénomènes très différents sur une échelle commune. Cette démarche s'est appuyée sur de multiples expériences menées tout au long du 19<sup>e</sup> siècle pour établir des rapports entre ces différents phénomènes.

Ayres et Warr (2005, 2010) a consisté à modifier la mesure de l'énergie afin de prendre en compte uniquement la part qui contribue effectivement à la production. La première loi de la thermodynamique stipule que l'énergie se conserve. Ce n'est donc pas cette mesure qui permet de cerner ce qui est détruit pour transformer la matière dans le processus économique. Pour cette raison, Ayres et Warr privilégient la notion d'« exergie », qui mesure la capacité d'une ressource énergétique à générer du travail mécanique :

Energy is not 'used up' in physical processes, it is merely degraded from available to less and less available forms. On the other hand, exergy 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 participeront pas réellement à la production. Ayres et Warr proposent donc de mesurer l'exergie « utile »  $U$  qui contribue réellement au processus de production. C'est cette variable qui 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 donné par un indicateur d'efficacité de ce procédé. Elle s'appuie donc directement sur la littérature des ingénieurs pour reconstituer les variations de cette efficacité du fait des améliorations techniques. En ce sens, elle intègre dans la théorie de la production un réel contenu technique<sup>77</sup>.

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 en terme d'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 cette dernière n'est pas la seule dimension de la qualité, et qu'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)<sup>78</sup>.

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 l'agrégation par l'exergie vise le fait qu'elle n'est pas exhaustive du point de vue des propriétés physiques. D'autre part, elle invite à inclure des éléments proprement économiques, tels que la flexibilité des usages. Contrairement au réductionnisme physique de la théorie 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, cette approche 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

---

77. Ayres *et al.* (2003) présentent en détails la méthodologie utilisée pour construire cet mesure de l'exergie utile et les résultats obtenus pour les Etats-Unis.

78. Cleveland *et al.* (2000) justifient cette dernière par l'idée que les prix 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 »(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.

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. Dans ce cadre, elle 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 cadre de la théorie thermodynamique de la production, c'est au contraire l'énergie qui est au centre des discussions concernant la construction des données.

Pour conclure cette section, on peut donc noter que la théorie 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 Linex tout autant que les variables du modèle, notamment le capital et l'énergie, sont fondées sur des caractéristiques et des mesures physiques. L'intégration interdisciplinaire forte ainsi recherchée se traduit de ce fait 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<sup>79</sup> :

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 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 (2010, 177) quant à eux adoptent 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, 2010, 181)

Dans cette dernière citation, le réalisme épistémologique fait donc place à un pragmatisme méthodologique. Ce dernier s'appuie à la fois sur des considérations analytiques et empiriques<sup>80</sup>. Bien qu'ils admettent être davantage convaincus par une approche conceptuelle désagrégée, Ayres et Warr choisissent donc de recourir à la fonction de production

---

79. Cette citation montre bien le lien étroit qui existe entre la conception physique de la fonction de production agrégée et une épistémologie fortement réaliste. Ce lien est certainement d'autant plus étroit qu'il est utilisé par un physicien de formation. Il repose sur l'idée que la physique, et notamment la thermodynamique, est un référent scientifique disposant d'une forte légitimité. Dès lors, ramener les catégories usuelles de la théorie économique, telles que la notion de capital, à des catégories de la physique garantirait une connexion étroite avec la réalité du processus de production.

80. 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

agrégée pour mesurer la contribution de l'énergie à la croissance. A l'opposé d'une épistémologie réaliste, ils adoptent alors une position instrumentaliste inspirée de Friedman (1953) pour justifier cette démarche :

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, 2010, 183)

Il en va là d'un certain retournement méthodologique. Jusque là, la légitimité de leur fonction de production agrégée semblait reposer exclusivement sur sa relation avec l'approche thermodynamique de la production. Dans le cadre des modèles comme médiateurs de Morgan et Morrison (1999), il en allait donc là de la relation entre le modèle et la théorie. Or Ayres et Warr reconnaissent ici les limites de cette démarche, sans pour autant remettre en question la pertinence des modifications apportés au cadre néoclassique standard. Ils introduisent alors la relation entre le modèle et les données comme une autre source de légitimité. En l'occurrence, il s'agit de savoir dans quelle mesure leur fonction de production agrégée est capable de reproduire les données empiriques concernant la croissance de la production. Cette question soulève cependant de nouveaux enjeux méthodologiques qui sont abordés dans la section suivante.

### 2.3 Les estimations économétriques : instruments de mesure et tests empiriques

La théorie thermodynamique de la production de 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 ici en cause. 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. 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 en particulier 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 expliqué 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 de la production donnée par la formule (16). 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

---

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.

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.

A cette conception, Ayres et Kümmel opposent une compréhension du progrès technique qui se concentre sur l'utilisation de l'énergie dans le processus de production. Cette approche se divise cependant en trois aspects distincts. Initialement, il semble que la quantité d'énergie consommée elle-même ait été conçue comme un indicateur du niveau technologique de l'économie. Kümmel (1985, 291) suggère par exemple que l'on a « des raisons quasi 'naturelles' de se demander quelle part du progrès technique peut être attribué à l'énergie, en conjonction avec le capital et le travail ». Par la suite, avec l'introduction de l'exergie utile, le progrès technique est également associé à l'efficacité thermodynamique. Celle-ci 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.

Le troisième aspect du progrès technique est introduit dans la théorie thermodynamique de la croissance par Kümmel *et al.* (2002). Il s'agit selon eux de rendre compte de la diffusion des innovations. Pour cela, ils vont permettre aux paramètres  $a$  et  $c$  de la fonction Linex (23) 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 :

$$a(t) = \frac{a_1 - a_2}{1 + \exp(-a_3(t - a_4))}, a_1 > a_2 \quad (26)$$

$$c(t) = \frac{c_1 - c_2}{1 + \exp(-c_3(t - c_4))}, c_1 < c_2 \quad (27)$$

Dans les deux cas, la finalité de cette nouvelle manière d'appréhender le progrès technique est d'offrir une meilleure explication de la croissance. Cette démarche implique de confronter le modèle théorique examiné ci-dessus avec les données empiriques. Avant d'en venir aux résultats qui en découlent, il apparaît nécessaire de souligner les difficultés statistiques auxquelles fait face une telle estimation directe d'une fonction de production. Alors que ces difficultés sont peu présentes dans les premiers travaux, une discussion plus complète du sujet est fournie par Ayres et Warr (2010, 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 économétriques<sup>81</sup>.

Pour y faire face, il est possible de passer la fonction de production Linex au logarithme 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 temps<sup>82</sup>. Ils identifient en particulier une rupture structurelle com-

81. 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).

82. 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'intéresse 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.

mune 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 similaires, 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 (2010, 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 Linex<sup>83</sup>.

Ces difficultés statistiques sont d'autant plus importantes que l'estimation directe des fonctions de production agrégée est incontournable pour la théorie thermodynamique de la production. C'est grâce à cette méthode qu'elle entend montrer effectivement que le rôle de l'énergie est plus important que ce que laisse entendre sa part en valeur dans la production. L'argument théorique concernant l'existence de contraintes techniques, qui remettent en question l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale, ne fait qu'ouvrir à une telle possibilité, mais 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 dans la production. Cependant, derrière cette conclusion se trouve des résultats assez variables, qui montrent combien ceux-là sont dépendants de la spécification du modèle<sup>84</sup>.

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 ces deux grandeurs. 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 explicative<sup>85</sup>. 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 de Ayres et Warr (2010, 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 (2010, 213) reconnaissent qu'un « statisticien professionnel, voyant [leurs] résultats, pourrait les considérer avec scepticisme ». Ils notent notamment qu'avec « suffisamment de paramètres il est possible de modéliser quasiment n'importe quoi »<sup>86</sup>. Mais selon eux, le nombre de paramètres de leur modèle (huit avec les

---

83. 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. Il est donc fait appel à une méthode d'optimisation non linéaire telle que la méthode de Levenberg–Marquardt (Kümmel, 2011, 267).

84. Pour le voir, on peut comparer les résultats obtenus pour les États-Unis après 1980. D'une part, Ayres et Warr (2010, 212) trouvent des élasticités de production du capital et de l'énergie proches de 0,5. De l'autre, Kümmel (2011, 211) aboutit à une élasticité d'environ 0,7 pour le capital, et 0,3 pour l'énergie. Dans les deux cas, l'élasticité de production du travail est quasi nulle. On pourrait penser que ces résultats s'expliquent par le fait qu'une part plus importante du progrès technique est endogénéisée par la variable d'exergie utile dans le modèle de 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.

85. En termes statistiques, il s'agit de tester l'auto-corrélation des résidus, à l'aide notamment de la statistique de Durbin-Watson.

86. 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 thermodynamique de la production, cette critique est doublement importante, car Georgescu-Roegen est à la fois l'un des fondateurs de l'approche thermodynamique et un statisticien de formation. On peut en particulier douter

fonctions logistiques) est 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 cas<sup>87</sup>. 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, du fait de l'introduction des fonctions logistiques, fragilise la pertinence des résultats empiriques<sup>88</sup>.

On a ainsi présenté l'essentiel du contenu de la théorie thermodynamique de la production. Pour approfondir maintenant les enjeux proprement méthodologiques de cette approche, il apparaît intéressant de se placer à nouveau dans le cadre proposé par Morgan et Morrison (1999), c'est-à-dire celui des modèles comme « médiateurs » entre théorie et données empiriques. De ce point de vue, on peut souligner que le modèle incorpore des éléments propres à chacun de ces deux pôles, et par la même est obligé de s'autonomiser de l'un comme de l'autre, ce qui suscite toute sorte de difficultés. D'un côté, on a vu que la théorie thermodynamique de la production tente de réinterpréter la fonction de production agrégée en insistant sur la dimension physique du processus de production. Cela passe notamment 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.

Cette difficulté traduit en fait une contradiction fondamentale entre les objectifs théoriques et empiriques. En effet, le choix d'une représentation agrégée apparaît motivé ici principalement par les facilités empiriques qu'elle offre<sup>89</sup>. 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 sujet 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 terme d'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 première fonction, au sens de Morgan et Morrison (1999), jouée par le modèle, à savoir celle d'un instrument de mesure. 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

---

de l'affirmation de Ayres et Warr (2010, 142) selon laquelle « après quelques réticences, Georgescu-Roegen aurait été d'accord avec l'approche adoptée ici ».

87. 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, du fait de la rupture structurelle liée à la seconde guerre mondiale.

88. De manière intéressante, Ayres (2001, 827) lui-même voyait un avantage dans le fait que « le modèle de Kümmel *et al.* est extrêmement parcimonieux ; il utilise seulement deux paramètres en plus du facteur de normalisation ».

89. Dans d'autres contextes, le choix d'une représentation agrégée peut également être lié à des considérations analytiques, dans la mesure où elle permet de préserver une certaine simplicité dans le modèle. C'est notamment le cas dans le modèle de croissance de Solow (1956). Cependant, ce type de considérations analytiques est absente de la théorie thermodynamique de la croissance, qui ne propose pas de modèles dynamiques comme ceux de la théorie néoclassique, et se concentre sur la seule dimension empirique.

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 le modèle estimé et les données empiriques est potentiellement le produit d'un artifice mathématique lié à la structure des données et au nombre important de paramètres. Cet aspect affecte donc également la seconde 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 mathématique, on ne peut l'accepter comme une authentique épreuve de falsification de la théorie.

Pour échapper partiellement à ce problème, il semble notamment nécessaire de réduire 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 de Ayres et Warr (2010) 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 résultats<sup>90</sup>.

Plus généralement, ces remarques questionnent l'articulation sous-jacente entre théorie, modèle et données dans la théorie thermodynamique de la production. Si la conception physique de la fonction de production qu'elle propose marque une imprégnation forte du modèle par la théorie, on a vu à la fin de la section 2.2 que cette démarche était limitée par la nature agrégée du modèle. La pertinence de ce dernier était alors en partie renvoyé 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 thermodynamique de la production<sup>91</sup>.

## Conclusion

Au terme de cette exploration de la place de l'énergie dans les travaux empiriques sur la production et la croissance, des années 1970 aux années 2000, on peut souligner une certaine continuité dans les enjeux méthodologiques soulevés par ces travaux. Il semble

---

90. Ayres et Warr (2005) ont bien 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.

91. Précisons que cette discussion méthodologique concerne d'abord et avant tout les travaux de la théorie thermodynamique de la production publiés avant les années 2010. Cette limite temporelle est nécessaire pour circonscrire l'objet d'étude et apparaît pertinente car elle s'achève avec les ouvrages de Ayres et Warr (2010) et 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)<sup>92</sup>. Ces nouvelles contributions apportent à n'en pas douter des modifications substantielles, à la fois sur le plan théorique et en ce qui concerne les méthodes empiriques. Le prolongement des analyses qui précèdent à ces nouveaux travaux nécessiterait donc un examen détaillé. On peut cependant penser que les difficultés méthodologiques identifiées sont suffisamment profondes pour qu'elles perdurent dans ces développements récents.

que cette continuité trouve pour une bonne part 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).

Au niveau théorique, la principale difficulté présentée par la fonction de production agrégée réside dans le peu de prise conceptuelle qu'elle offre pour rendre compte des aspects physiques du processus de production. Dans la controverse sur la substituabilité entre l'énergie et le capital, cette question est principalement soulevée par la contribution de Solow (1987). Celui-ci montre que les modifications dans la composition de la demande finale peuvent donner l'impression au niveau agrégé soit d'une substitution soit d'une complémentarité entre les facteurs de production. De ce fait, il souligne la pluralité des mécanismes qui peuvent être sous-jacents à une substitution au niveau agrégé. A l'inverse Griffin et Gregory (1976), par exemple, la présentait uniquement comme le produit d'une modification du type de biens d'équipement utilisés. Cette ambiguïté entourant la notion de substitution est propre à l'approche agrégée de la production, car au niveau désagrégé il serait tout à fait possible de distinguer les deux mécanismes.

Cet enjeu apparaît de manière encore plus claire dans la théorie thermodynamique de la production de par sa volonté de renforcer la dimension physique de la fonction de production agrégée. Cette volonté se manifeste chez Ayres et Warr (2010) et Kümmel (2011) 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. La mesure empirique du capital est finalement ramenée à la mesure traditionnelle sur la base d'une hypothèse *ad hoc*. Et même l'agrégation en termes d'exergie utile, qui apparaît comme l'application la plus directe des principes de la thermodynamique, est contestée par Cleveland *et al.* (2000) qui lui reproche 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.

Au niveau empirique, les différentes approches soulèvent toutes 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, la fonction du modèle est principalement celle d'un instrument de mesure. Mais dans le cadre d'une fonction de coût Translog, les élasticités prix sont étroitement reliées *a priori* aux parts en valeur des facteurs dans la production, comme l'ont montré Frondel et Schmidt (2002). De ce fait, l'estimation empirique du modèle apparaît secondaire, et le résultat est surdéterminé par l'hypothèse de 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 initialement être une mesure indirecte produite par la combinaison de l'ensemble des données se réduit à une mesure directe. Le problème est que cette mesure directe 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 rémunération à la productivité marginale.

La théorie 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 cependant problématique du fait de la structure des données et du nombre de paramètres employés pour réaliser cette estimation. Le résultat obtenu est possiblement le fruit d'un artifice mathématique plutôt que la traduction d'une relation technique sous-jacente. De ce point de vue, la variable d'exergie utile ne remplit pas toutes les attentes qu'elle laissait espérer, dans la mesure où Ayres et Warr (2010) utilisent également des fonctions logistiques pour représenter le progrès technique résiduel. 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 qui en découle est une mesure fiable de la relation entre l'énergie et la production totale. Mais elle touche également la deuxième fonction attribuée au modèle dans ce cadre, 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 mathématique, 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 les sciences physiques, 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.

## Références

- APOSTOLAKIS, B. E. (1990). Energy-capital substitutability/ complementarity : The dichotomy. *Energy Economics*, 12(1):48–58.
- AYRES, R. et VOUDOURIS, V. (2014). The economic growth enigma : Capital, labour and useful energy? *Energy Policy*, 64:16–28.
- AYRES, R. U. (1978). *Resources, environment, and economics : applications of the materials/energy balance principle*.
- AYRES, R. U. (1989). Industrial metabolism. *Technology and environment*, 1989:23–49.
- AYRES, R. U. (2001). The minimum complexity of endogenous growth models : : the role of physical resource flows. *Energy*, 26(9):817–838.
- AYRES, R. U., AYRES, L. W. et WARR, B. (2003). Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998. *Energy*, 28(3):219–273.
- AYRES, R. U. et KNEESE, A. V. (1969). Production, Consumption, and Externalities. *American Economic Review*, 59(3):282.
- AYRES, R. U. et WARR, B. (2005). Accounting for growth : the role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(2):181–209.
- AYRES, R. U. et WARR, B. (2010). *The Economic Growth Engine : How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- BAUMGÄRTNER, S., BECKER, C., FRANK, K., MÜLLER, B. et QUAAS, M. (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.
- BERNDT, E. R. et CHRISTENSEN, L. R. (1973). The translog function and the substitution of equipment, structures, and labor in US manufacturing 1929–68. *Journal of econometrics*, 1(1):81–113.
- BERNDT, E. R., HALL, B. H., HALL, R. E. et HAUSMAN, J. A. (1974). Estimation and inference in nonlinear structural models. *Annals of Economic and Social Measurement*, 3(4):653–665.
- BERNDT, E. R. et KHALED, M. S. (1979). Parametric Productivity Measurement and Choice Among Flexible Functional Forms. *Journal of Political Economy*, 87(6):1220–1245.
- BERNDT, E. R. et WOOD, D. O. (1975). Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy. *The Review of Economics and Statistics*, 57(3):259–268.
- BERNDT, E. R. et WOOD, D. O. (1979). Engineering and econometric interpretations of energy-capital complementarity. *The American Economic Review*, 69(3):342–354.
- BERNDT, E. R. et WOOD, D. O. (1981). Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity : Reply and Further Results. *The American Economic Review*, 71(5):1105–1110.

- BLACKORBY, C. et RUSSELL, R. R. (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.
- BOIANOVSKY, M. et HOOVER, K. D. (2009). The Neoclassical Growth Model and Twentieth-Century Economics. *History of Political Economy*, 41:1–23.
- CALLEN, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. John Wiley & Sons, New York, 2nd édition.
- CHRISTENSEN, L. R., JORGENSON, D. W. et LAU, L. J. (1973). Transcendental Logarithmic Production Frontiers. *The Review of Economics and Statistics*, 55(1):28–45.
- CLARK, J. B. (1889). The Possibility of a Scientific Law of Wages. *Publications of the American Economic Association*, 4(1):39–69.
- CLEVELAND, C. J., COSTANZA, R., HALL, C. A. S. et KAUFMANN, R. (1984). Energy and the U. S. economy : a biophysical perspective. *Science*, 225:890–897.
- CLEVELAND, C. J., KAUFMANN, R. K. et STERN, D. I. (2000). Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, 32(2):301–317.
- COBB, C. W. et DOUGLAS, P. H. (1928). A Theory of Production. *The American Economic Review*, 18(1):139–165.
- COHEN, A. J. et HARCOURT, G. C. (2003). Retrospectives : Whatever Happened to the Cambridge Capital Theory Controversies? *The Journal of Economic Perspectives*, 17(1):199–214.
- COUX, Q. (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*.
- CRAFTS, N. (2009). Solow and Growth Accounting : A Perspective from Quantitative Economic History. *History of Political Economy*, 41:200–220.
- DENISON, E. F. (1962). *Sources of economic growth in the United States and the alternatives before us*.
- DENISON, E. F. (1979a). *Accounting for slower economic growth : the United States in the 1970's*. Brookings Institution Press.
- DENISON, E. F. (1979b). Explanations of declining productivity growth. *Survey of Current Business*, 59(8):1–24.
- DISSOU, Y., KARNIZOVA, L. et SUN, Q. (2015). Industry-level Econometric Estimates of Energy-Capital-Labor Substitution with a Nested CES Production Function. *Atlantic Economic Journal*, 43(1):107–121.
- FISHER, F. M. (1969). The existence of aggregate production functions. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 553–577.
- FRIEDMAN, M. (1953). The Methodology of Positive Economics. *In Essays in Positive Economics*. University of Chicago Press, Chicago.

- FRONDEL, M. et SCHMIDT, C. M. (2002). The Capital-Energy Controversy : An Artifact of Cost Shares? *The Energy Journal*, 23(3):53–79.
- GEORGESCU-ROEGER, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- GRIFFIN, J. M. (1981). Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity : Comment. *The American Economic Review*, 71(5):1100–1104.
- GRIFFIN, J. M. (1995). Methodological advances in energy modelling : 1970–90. In *Models for Energy Policy*, pages 28–35. Routledge.
- GRIFFIN, J. M. et GREGORY, P. R. (1976). An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses. *The American Economic Review*, 66(5):845–857.
- HARCOURT, G. C. (1972). *Some Cambridge controversies in the theory of capital*. CUP Archive.
- HOURCADE, J. C., SASSI, O., CRASSOUS, R., GITZ, V., WAISMAN, H. et GUIVARCH, C. (2010). IMACLIM-R : a modelling framework to simulate sustainable development pathways. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1/2):5–24.
- HUDSON, E. A. et JORGENSON, D. W. (1974). US energy policy and economic growth, 1975–2000. *Bell Journal of Economics*, 5(2):461–514.
- HUDSON, E. A. et JORGENSON, D. W. (1978). Energy prices and the US economy, 1972–1976. *Nat. Resources J.*, 18:877.
- JORGENSON, D. W. (1984). The Role of Energy in Productivity Growth. *The Energy Journal*, 5(3):11–26.
- JORGENSON, D. W. et GRILICHES, Z. (1967). The explanation of productivity change. *Review of Economic Studies*, 34(3):249–283.
- KEEN, S., AYRES, R. U. et STANDISH, R. (2019). A Note on the Role of Energy in Production. *Ecological Economics*, 157(C):40–46.
- KIM, J. et HEO, E. (2013). Asymmetric substitutability between energy and capital : Evidence from the manufacturing sectors in 10 OECD countries. *Energy Economics*, 40:81–89.
- KLEIN, J. T. (2010). A Taxonomy of Interdisciplinarity. In KLEIN, J. T., MITCHAM, C. et FRODEMAN, R., éditeurs : *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, pages 15–30. Oxford University Press, Oxford.
- KLEIN, L. R. (1978). The Supply Side. *The American Economic Review*, 68(1):1–7.
- KÜMMEL, R. (1982). The impact of energy on industrial growth. *Energy*, 7(2):189–203.
- KÜMMEL, R. (1989). Energy as a factor of production and entropy as a pollution indicator in macroeconomic modelling. *Ecological Economics*, 1(2):161–180.
- KÜMMEL, R. (2011). *The second law of economics : Energy, entropy, and the origins of wealth*. Springer Science & Business Media.

- KÜMMEL, R., AYRES, R. U. et LINDENBERGER, D. (2010). Thermodynamic laws, economic methods and the productive power of energy. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 35(2):145–179.
- KÜMMEL, R., HENN, J. et LINDENBERGER, D. (2002). Capital, labor, energy and creativity : modeling innovation diffusion. *Structural Change and Economic Dynamics*, 13(4):415–433.
- KÜMMEL, R., STRASSL, W., GOSSNER, A. et EICHHORN, W. (1985). Technical Progress and Energy Dependent Production Functions. *Zeitschrift für Nationalökonomie/Journal of Economics*, 45.
- KOETSE, M. J., de GROOT, H. L. F. et FLORAX, R. J. G. M. (2008). Capital-energy substitution and shifts in factor demand : A meta-analysis. *Energy Economics*, 30(5): 2236–2251.
- LINDENBERGER, D., WEISER, F., WINKLER, T. et KÜMMEL, R. (2017). Economic Growth in the USA and Germany 1960–2013 : The Underestimated Role of Energy. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2(3):10.
- MA, H., OXLEY, L., GIBSON, J. et KIM, B. (2008). China’s energy economy : Technical change, factor demand and interfactor/interfuel substitution. *Energy Economics*, 30(5): 2167–2183.
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J. et BEHRENS, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books, New York.
- MISSEMER, A. (2017). *Les Économistes et la fin des énergies fossiles (1865-1931)*. Classiques Garnier, Paris.
- MÄKI, U. (2009a). Economics Imperialism : Concept and Constraints. *Philosophy of the Social Sciences*, 39(3):351–380.
- MÄKI, U. (2009b). Missing the World. Models as Isolations and Credible Surrogate Systems. *Erkenntnis*, 70(1):29–43.
- MORGAN, M. S. (2012). *The World in the Model : How Economists Work and Think*. Cambridge University Press, New York.
- MORGAN, M. S. et MORRISON, M. (1999). Models as Mediating Instruments. In MORGAN, M. S. et MORRISON, M., éditeurs : *Models as Mediators : Perspectives on Natural and Social Science*, volume 52 de *Ideas in Context*, pages 10–37. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MORISHIMA, M. (1967). A few suggestions on the theory of elasticity. *Keizai Hyoron (Economic Review)*, 16:144–150.
- MORRISON, C. J. et BERNDT, E. R. (1981). Short-run labor productivity in a dynamic model. *Journal of Econometrics*, 16(3):339–365.
- PARRA, F. (2004). *Oil politics : A modern history of petroleum*. IB Tauris.
- PERRY, G. L. (1977). Potential Output : Recent Issues and Present Trends. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, (December):1–20.

- RASCHE, R. H. et TATOM, J. A. (1977a). The effects of the new energy regime on economic capacity, production, and prices. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 59(4):2–12.
- RASCHE, R. H. et TATOM, J. A. (1977b). Energy resources and potential GNP. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, (June):10–24.
- ROBINSON, J. (1953). The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*, 21(2):81–106.
- SANTOS, J., DOMINGOS, T., SOUSA, T. et ST. AUBYN, M. (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(C):103–120.
- SOLOW, J. L. (1987). The Capital-Energy Complementarity Debate Revisited. *The American Economic Review*, 77(4):605–614.
- SOLOW, R. M. (1951). Robert M. Solow Papers.
- SOLOW, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1):65–94.
- SOLOW, R. M. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, 39(3):312–320.
- SOLOW, R. M. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*, 41:29–45.
- SPASH, C. L. (2012). New Foundations for Ecological Economics. *Ecological Economics*, 77:36–47.
- STERN, D. I. (1993). Energy and economic growth in the USA : a multivariate approach. *Energy economics*, 15(2):137–150.
- STERN, D. I. (2000). A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy. *Energy Economics*, 22(2):267–283.
- STERN, D. I. (2011). The role of energy in economic growth. In COSTANZA, R., LIMBURG, K. et KUBISZEWSKI, I., éditeurs : *Ecological Economics Reviews*, volume 1219, pages 26–51. Annals of the New York Academy of Sciences.
- STERN, D. I. (2017). Energy-GDP Relationship. In *The New Palgrave Dictionary of Economics*, pages 1–19. Palgrave Macmillan UK, London.
- STIGLITZ, J. E. (1974). Growth with Exhaustible Natural Resources : Efficient and Optimal Growth Paths. *The Review of Economic Studies*, 41:123–137.
- THOMPSON, P. et TAYLOR, T. G. (1995). The Capital-Energy Substitutability Debate : A New Look. *The Review of Economics and Statistics*, 77(3):565–569.
- UZAWA, H. (1962). Production Functions with Constant Elasticities of Substitution. *The Review of Economic Studies*, 29(4):291–299.
- WARR, B. et AYRES, R. U. (2012). Useful work and information as drivers of economic growth. *Ecological Economics*, 73:93–102.
- WICKSTEED, P. H. (1894). *An Essay on the Co-ordination of the Laws of Distribution*. Macmillan, London.