

Comment mesurer la contribution de l'énergie à la croissance économique ?

Alban PELLEGRIS¹

Mondes en développement n°192, 2020/4

La théorie néoclassique considère que l'énergie joue un rôle mineur dans le processus de croissance et pourrait donc aisément être substituée. Ce traitement de l'énergie a été vivement critiqué par le courant de l'économie écologique. Certains de ses auteurs ont tenté d'intégrer les apports de la thermodynamique aux fonctions de production agrégée mais leur démarche n'est pas totalement satisfaisante : elle continue de confondre production physique et valeur économique. Ainsi, nous suggérons de mesurer la contribution de l'énergie au processus de croissance à partir de son rôle dans la formation des coûts.

Mots-clés : énergie, croissance économique, économie écologique, agrégation, substitution, théorie de la valeur

Classification JEL : A12, Q40, O13

How can we measure the contribution of energy to economic growth?

According to neoclassical theory, energy plays a minor role in economic growth and thus could be easily substituted. This way of dealing with energy has been strongly criticized by ecological economists. Some of them have tried to integrate the contribution of thermodynamics into aggregate production functions. This approach is not totally satisfying since physical production and economic value are not clearly separated. We argue that the contribution of energy to economic growth could instead be measured based on its impact on production costs.

Keywords: Energy, economic growth, ecological economics, aggregation, substitution, value theory

¹ Université Rennes 2, Laboratoire interdisciplinaire en Recherche et Innovations Sociétales (LiRIS). alban.pellegris@univ-rennes2.fr

Depuis la contribution fondatrice de Robert Solow (1957), capital, travail et progrès technique constituent les trois principales sources de la croissance. Au début des années soixante-dix, cette représentation est partiellement remise en cause : tout d'abord avec le rapport Meadows en 1972 qui identifie parmi les limites à la croissance future l'épuisement des ressources naturelles, notamment énergétiques (Meadows et *al.*, 1972) ; ensuite, avec les chocs pétroliers qui révèlent la vulnérabilité de la croissance à l'augmentation soudaine des prix du pétrole (Hamilton, 2011 ; Lutz, 2008). La réponse théorique des néoclassiques ne tarde pas : Solow (1974), mais également Stiglitz (1974), affirment que l'épuisement des ressources n'est une menace qu'en l'absence de substitution entre le capital naturel et le capital technologique. À l'inverse, dès lors qu'un certain rythme de progrès technique permet de faire mieux avec moins, la croissance peut se poursuivre et être découplée des ressources. Ces conclusions portées par le courant dit de la soutenabilité faible fondent aujourd'hui les discours en faveur d'une croissance verte.

A priori, la controverse porte sur la possibilité de poursuivre une trajectoire de croissance avec de moins en moins d'énergie mais ne nous dit rien du rôle *actuel* que joue l'énergie dans le processus de croissance. Les deux positions vont pourtant de pair : plus la contribution de l'énergie à la croissance actuelle est faible, plus sa substitution est aisée et plus le découplage absolu devient envisageable. Ainsi, la mesure de la contribution de l'énergie au processus de croissance est fondamentale.

À partir du théorème de l'épuisement du produit (TEP) (*cost share*), les néoclassiques estiment que la contribution des différents *inputs* pourrait être saisie à partir des paiements reçus. Avec des dépenses énergétiques de l'ordre de 6,7% du PIB en 2017 en France (Beck, Ribon et Riedinger, 2019), la contribution de l'énergie au processus de croissance serait donc mineure (Denison, 1979). Ainsi les développements ultérieurs de la théorie de la croissance se sont focalisés sur l'endogénéisation de l'innovation et du progrès technique et n'intègrent pas l'énergie dans leurs variables clefs (Aghion, Howitt et Bursztyjn, 2009). À l'heure où la transition énergétique devient un objectif central de la politique économique, où le pic du pétrole conventionnel reste discuté (Chapman, 2014), cette exclusion de l'énergie de la théorie néoclassique de la croissance mérite d'être réexaminée.

La première partie de l'article revient sur la démarche néoclassique et montre que la méthode retenue pour mesurer la contribution de l'énergie est très fragile. La seconde partie, présente la manière dont une partie de l'économie écologique a tenté d'intégrer l'énergie ainsi que les apports de la thermodynamique à la théorie de la croissance néoclassique. Enfin, la troisième partie, montre que cette intégration est incomplète car elle confond production physique et valeur économique. En définitive, nous défendons l'idée que l'intégration de l'énergie à la théorie de la croissance suppose de préciser son rôle dans la formation des coûts de production.

1. L'EXCLUSION DE L'ÉNERGIE DE LA THÉORIE NÉOCLASSIQUE DE LA CROISSANCE

Le théorème de l'épuisement du produit énonce que dès lors que les facteurs de production sont rémunérés à leur productivité marginale et que les rendements sont constants, l'élasticité de production d'un *input* peut être déduite de la part des revenus reçus. Cette méthode est également connue sous le nom de théorie néoclassique de la répartition, dont les premiers travaux remontent à John Bates Clark (1899). Ce théorème se fonde sur les conclusions de la micro-économie néoclassique dont est déduite la rémunération à la productivité marginale. En effet, lorsque les firmes sont preneuses de prix, elles utilisent les *inputs* jusqu'à ce que le rapport entre leur productivité marginale et leur prix soit égalisé. À l'équilibre, le rapport des prix des *inputs* reflète leur productivité marginale relative pour le processus de production. Les prix seraient donc suffisants pour saisir la contribution productive d'un *input*, la valeur d'échange refléterait la valeur d'usage pour le processus de production.

Le TEP est ainsi une extension de ce raisonnement sur la valeur à un niveau macro-économique. Néanmoins, pour y parvenir, il faut accepter une seconde hypothèse : que l'économie puisse être représentée par une fonction de production agrégée à rendements constants, sans quoi les rémunérations des facteurs n'épuiseraient pas le produit (Guerrien, 2016). La part des revenus serait alors inutilisable pour prédire la variation de la production résultant d'une moindre utilisation d'un *input*. Ces conditions remplies, les paiements reçus par un *input* peuvent être utilisés pour établir les coefficients factoriels des fonctions de production agrégée de type Cobb-Douglas. Les quantités d'*inputs* y sont alors injectées, la production déduite. L'écart à la production observée, le résidu, est interprété comme mesure du progrès technique (Solow 1957). Il y a au moins cinq raisons de douter de la robustesse de cette méthode.

La première a trait à l'absence de contraintes de substituabilité entre *inputs* au niveau micro-économique. Elle est au cœur de la critique de l'économie écologique (cf. partie 2.). *La seconde* est un problème de cohérence interne à la théorie. Au niveau micro-économique, la rémunération à la productivité marginale exige que les firmes aient des rendements d'échelle décroissants, sinon il y a indétermination du niveau de production. En revanche, au niveau macro-économique, pour être valide, le TEP exige des rendements d'échelle constants (Guerrien, 2016). *La troisième* est liée à l'interprétation qui est faite de l'épuisement du produit. Depuis la controverse des deux Cambridge, on sait que ce résultat n'est pas la preuve d'une relation technique. En effet, dans la mesure où la quantité de capital est déduite du profit divisé par un taux d'intérêt et que la production est également mesurée en monnaie, il existe une égalité comptable reliant les *inputs* et l'*output* (Felipe et McCombie 2014 ; Shaikh 1974 ; Sraffa 1963 ; Robinson 1953). *La quatrième* a trait à la mesure de la contribution à partir d'une élasticité marginale de production. Une telle élasticité adopte un raisonnement *toutes choses égales par ailleurs*. Elle mesure la perte de PIB liée à une

réduction de la production du secteur énergétique, comme si les autres branches continuaient de produire. Cela ne pose pas de problème dans le modèle de Solow à un bien mais cela n'est pas transposable à une économie multisectorielle où les *outputs* de certaines branches constituent un *input* pour d'autres (Giraud et Kahraman, 2014 ; Ayres et *al.*, 2013). Enfin, le caractère résiduel de la principale source de la croissance, la productivité globale des facteurs, son exogénéité, est problématique.

Les conclusions de la théorie néoclassique quant à la contribution de l'énergie sont donc très fragiles. Elles se sont par ailleurs heurtées aux travaux de l'économie écologique, champ qui émerge au début des années 80 (Douai et Plumecocq, 2017). Pour ce qui est de la question énergétique, l'une des principales influences est celle de Georgescu-Roegen (1976, [1979]). Mobilisant les apports de la thermodynamique, ce dernier montre que le procès de production consiste à mobiliser de l'énergie extraite de l'environnement pour transformer de la matière. L'exclusion de l'énergie de la théorie de la croissance ne pouvait donc pas être acceptée. Si Georgescu-Roegen refuse le cadre théorique néoclassique (Couix, 2019), une partie de l'économie écologique a tenté d'y intégrer les apports de la thermodynamique.

2. INTÉGRER LES APPORTS DE LA THERMODYNAMIQUE AUX FONCTIONS DE PRODUCTION AGRÉGÉE

Les économistes écologiques considèrent que l'énergie n'est pas traitée de manière réaliste par le corpus néoclassique. Le TEP est vigoureusement critiqué en raison de la substituabilité qui le fonde. Une première série de travaux propose de recourir à de nouvelles formes fonctionnelles ainsi qu'à de nouvelles mesures de l'*input* énergétique (2.1). Novateurs, ces travaux ne sont toutefois pas exempts de critiques : le passage d'un raisonnement micro-économique pour fonder des relations macro-économiques reste problématique, de même que le manque de distinction entre l'énergie et le capital (2.2). Des travaux plus récents traitent ces problèmes et estiment avoir réconcilié la théorie néoclassique de la croissance et les conclusions de la thermodynamique (2.3).

2.1 Une première tentative d'intégration

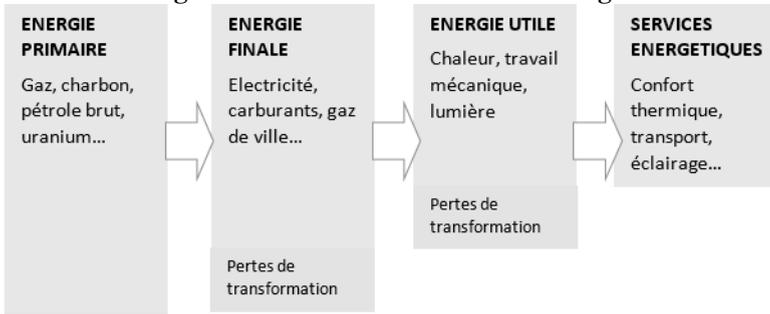
La rémunération à la productivité marginale est nécessaire à la validité du TEP et suppose qu'il n'existe aucune contrainte sur la substitution entre *inputs*. C'est sur ce point que va se focaliser la critique de l'économie écologique (Ayres et *al.*, 2013 ; Kümmel, 2013 ; Ayres et Warr, 2005 ; Kümmel, 1982). Comme pour les néoclassiques, cette critique se situe avant tout à un niveau micro-économique pour ensuite être généralisée à l'économie. Ainsi de Ayres qui, dans une correspondance avec Robert Solow, reprend l'exemple de la boulangerie utilisé

dans le manuel de Gregory Mankiw (1997) lors de la présentation du TEP : « *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* » (cité par Couix, 2019, 27).

Sur la base de cet argument micro-économique, de nouvelles formes fonctionnelles vont être choisies pour représenter l'économie nationale. Kümmel a ainsi proposé la fonction LINEX dont la production dépend linéairement du travail et du capital et exponentiellement de l'énergie. À partir de ces fonctions, les auteurs procèdent à une estimation directe des paramètres de la fonction de production. Mais avant de procéder de la sorte, ces économistes introduisent une nouvelle mesure de l'énergie : *l'exergie utile*.

L'énergie peut être appréhendée à différents stades (figure 1). Schématiquement, on distingue l'énergie primaire extraite de l'environnement, par exemple le pétrole brut, de l'énergie finale qui est l'énergie produite par le secteur énergétique et achetée par les consommateurs finaux. Un troisième stade de mesure de l'énergie peut être ajouté à la typologie : *l'énergie utile*, délivrée par les appareils et qui s'approche le plus de l'idée de services énergétiques, la véritable valeur d'usage recherchée par les utilisateurs finaux.

Figure 1 : Les différents stades de l'énergie.



← Efficacité de la conversion de l'énergie →

Source : Auteur, à partir de Sousa et *al.*, 2017, 12 et Sakai et *al.*, 2018, 2.

À côté de ces différents niveaux, il existe également des différences de qualité entre les énergies. Par exemple, l'énergie sous forme de chaleur n'est pas équivalente à celle sous forme de travail mécanique : « 1 Kwh de travail mécanique peut être converti en 1 Kwh de chaleur à 30°C mais 1 Kwh de chaleur à 30°C peut être converti au maximum en 0,066Kwh de travail mécanique [...] Le travail mécanique est la forme énergétique ayant le plus de valeur car c'est celle qui a la plus haute efficacité de conversion dans les autres formes d'énergie » (Santos et *al.*, 2018, 112). On appellera « exergie » le maximum de travail mécanique qui peut être extrait d'un flux d'énergie. Par exemple, l'exergie de 1 Kwh de travail mécanique est 1Kwh tandis que l'exergie de 1 Kwh de chaleur à 30 degrés sera 0,066 Kwh.

Ainsi l'exergie utile apparaît comme une mesure particulièrement intéressante de l'*input* énergétique : on se situe au niveau de la sortie des appareils et la mesure en termes d'exergie garantit que seule la part *productive* est prise en compte. En utilisant ce nouvel agrégat pour l'*input* énergétique dans une fonction de production agrégée type LINEX, Ayres et Warr (2005) ont ainsi pu montrer que la quasi-totalité du résidu de Solow disparaissait sur la période 1900-2000 aux USA. La productivité globale des facteurs serait donc liée à l'augmentation de l'exergie utile mobilisée, confirmant ainsi le rôle fondamental de l'énergie dans le processus de croissance.

2.2 *Les limites*

Comme chez les néoclassiques, une relation technique au niveau micro-économique (la boulangerie) est utilisée pour déduire une relation entre l'énergie, le travail, le capital et la production au niveau agrégé. Or, la relation entre les *inputs* et l'*output* au niveau agrégé n'est pas seulement technique (Solow 1987). Une relation technique étudie la combinaison d'*inputs* (quantité physique de ces derniers) nécessaire pour réaliser un certain niveau de production *pour un bien donné*. Or, par définition, au niveau macro-économique, la production consiste en une diversité de biens et de services dont la composition même évolue au cours du temps. Autrement dit, la relation entre la production et l'énergie peut changer suite à une *modification de la structure de l'économie*. Par exemple, si une économie réoriente sa place dans la division internationale vers les services, sa combinaison productive sera tendanciellement moins intensive en énergie. Dans ce cas, il serait incorrect de conclure à une substituabilité technique entre le capital technologique et l'énergie. Les contraintes techniques en matière de substituabilité au niveau micro-économique ne peuvent donc pas servir de fondement à des contraintes de substituabilité entre les agrégats au niveau macro-économique. Or, c'est précisément sur cette base que Ayres et Warr retiennent des formes spécifiques de fonction de production (LINEX).

La seconde difficulté est liée à la mesure des *inputs*. La reformulation des *inputs* (travail, capital, exergie utile) peut être critiquée : la contribution de l'exergie utile est assimilée à celle de l'énergie, alors même que l'on pourrait argumenter que les progrès de l'efficacité énergétique sont imputables au capital. L'exergie utile est ici séparée du capital, comme si elle constituait un *input* autonome, une représentation problématique à double titre. D'abord, elle se heurte aux enseignements de la thermodynamique dont les auteurs se revendiquent. Travail et capital convertissent l'exergie finale en exergie utile : l'exergie utile n'existe pas à côté du capital et du travail qui les fournissent. La seconde limite de cette approche est que l'investissement dans du capital supplémentaire n'a aucun effet sur la progression de l'efficacité énergétique, alors même que les auteurs reconnaissent que « la plupart des nouvelles machines, maisons, voitures et d'autres biens sont plus efficaces énergétiquement que les anciens » (Sakai et al., 2018, 4). Il y a là une forme d'incohérence qui a pour effet de rendre

l'efficacité énergétique exogène. Interrogé sur cette question par mail, Tiago Domingos, un des représentants de ce courant et co-auteur de Ayres et Warr, explique dans sa réponse du 22 septembre 2019 que « ramener la physique dans l'économie peut avoir ce résultat intéressant de légitimation (partielle) d'un progrès technique exogène ». En d'autres termes, si le résidu de Solow est bien identifié par les économistes écologiques, il reste inexpliqué.

Ce flou entre énergie et capital renvoie là encore à la question des agrégats utilisés : le capital continue d'être mesuré à partir de la monnaie malgré les mises en garde de l'école de Cambridge quant à l'agrégation d'unités de capital qualitativement différentes (Sraffa, 1963 ; Robinson, 1953). Le cas de l'énergie nous offre une illustration de cette thèse : la mesure du capital en monnaie ne permet pas de saisir correctement les progrès (qualitatifs) du capital dans la conversion de l'énergie. Si c'était le cas, le facteur capital absorberait le résidu et les progrès de l'efficacité énergétique seraient endogénéisés.

2.3 Une incorporation de la thermodynamique finalement réussie ?

Des travaux plus récents répondent à ces objections (Santos et *al.*, 2016, 2018). D'une part ils étudient d'emblée la relation entre *inputs* et *output* au niveau macro-économique, sans détour par l'argument micro-économique. D'autre part, le capital tend à être appréhendé comme une fonction de l'exergie utile. Résumons leur méthode et résultats brièvement. À partir d'une méthodologie économétrique, des fonctions de production agrégée plausibles sont identifiées. Pour ce faire, trois critères doivent être réunis : une relation de cointégration entre capital, travail, exergie utile et *output* doit exister (1) ; les coefficients correspondants à l'élasticité à l'*output* doivent être positifs (2) ; enfin il doit y avoir une causalité à la *Granger* entre les *inputs* et l'*output* (3). Dans un second temps, les différents modèles remplissant ces conditions sont départagés à partir de leur capacité à prédire l'*output*, c'est-à-dire en favorisant ceux présentant les résidus le plus faible. Un modèle statistique se distingue alors dans lequel les *inputs* sont l'exergie utile, le capital et le travail, et où le capital est une fonction de l'énergie et du travail.

Ainsi, ces derniers travaux estiment avoir réconcilié l'économie écologique et la théorie néoclassique de la croissance. Le résidu de Solow serait expliqué par la prise en compte rigoureuse de l'énergie (à partir de l'exergie utile). La qualité du capital utilisé serait également correctement mesurée, répondant ainsi aux objections de Joan Robinson. Enfin, ces résultats peuvent être exprimés par une fonction Cobb-Douglas, usuelle pour les économistes néoclassiques, mais dont les paramètres seraient évalués empiriquement. Peut-on estimer que la thermodynamique a été correctement incorporée et, avec elle, le rôle de l'énergie dans la théorie de la croissance ? Nous ne le pensons pas. La croissance économique désigne l'évolution du produit réel, or celui-ci ne se confond pas avec la production physique.

3. LE RÔLE DE L'ÉNERGIE DANS LA CRÉATION DE VALEUR ÉCONOMIQUE

Par simplicité, la croissance économique est régulièrement présentée comme une augmentation des quantités produites, qui peut légitimement s'expliquer par la combinaison de différents facteurs de production. Telle est la logique derrière les fonctions de production agrégées et la théorie de la croissance néoclassique. Pourtant, l'évolution du PIB réel, dont cette théorie est censée rendre compte, n'est pas une quantité physique de production. Le PIB réel est un montant de valeur économique exprimé en monnaie déflatée (3.1). Or, la production physique et la valeur économique n'ont pas les mêmes sources. Intégrer l'énergie à la théorie de la croissance suppose donc de préciser son rôle dans la création de valeur (3.2).

3.1 *La production réelle n'est pas la production physique*

La notion de production agrégée ne va pas de soi : des biens et des services qualitativement différents sont additionnés entre eux, ce qui suppose de choisir une unité pertinente. Cela pourrait être le poids en kilo ou encore le volume en mètre cube, tout dépend de l'objectif que l'on se donne. Si l'on s'intéresse au stockage, la dimension volume est pertinente, si ce sont les coûts d'expédition, le poids pourrait être préféré (Fix, 2017). À raison, les économistes ont choisi l'unité monétaire : dans une économie marchande, les biens et services ont une valeur économique, versée à ceux qui ont participé à la production, puis consommée ou épargnée. Le choix de cette unité se justifie aisément au regard des considérations de politique économique : stabilisation et répartition. Un cap est toutefois franchi lorsque cet agrégat monétaire (le PIB nominal) est déflaté puis utilisé pour parler de quantités produites. Une brève analyse de cet indicateur montre que c'est un abus de langage. Le PIB réel n'est pas une quantité physique de biens et services mais plutôt une mesure conventionnelle de l'utilité tirée du revenu.

Si le PIB réel était une mesure des quantités produites, il faudrait tout d'abord que tous les biens et services produits soient pris en compte dans l'agrégation. Or, certains biens et services n'ont pas de valeur économique alors même qu'une activité productive est à l'œuvre. Une imputation est alors nécessaire. Cette opération n'est toutefois pas réservée à la production domestique, des pans entiers de l'économie de marché ne sont pas éligibles à l'approche production du PIB. Aux USA, cela représente tout de même 58% du PIB en 2009, une part qui n'a cessé d'augmenter depuis l'après-guerre (Basu and Foley, 2013). 58% du PIB est donc imputé, non sans débats légitimes sur le caractère productif des activités. Par exemple, quel statut donner au loyer reçu par un propriétaire ? Est-ce que la valeur économique reçue est la contrepartie d'une production de service de logement (activité productive) ou bien est-ce un prélèvement sur la valeur créée par d'autres (rente foncière non productive) ?

De nombreuses conventions viennent trancher ces questions. Le traitement des activités financières (Christophers, 2011) de l'activité des retraités (Friot, 2012) ou encore des administrations publiques (Harribey, 2013) a fait, ou fait encore, l'objet de débats. La délimitation de la production physique suppose donc un choix du statisticien sur qui produit et comment compter cette production (quelle valeur monétaire lui attribuer). Un second choix non moins important est attendu de lui : le choix des prix relatifs pertinents pour déflater le PIB nominal.

Traditionnellement, le calcul d'un indice de prix pour déflater le PIB nominal s'obtient en choisissant une année de référence : les prix relatifs de l'année de référence sont utilisés pour agréger la production réelle. Cependant, comme les prix relatifs varient dans le temps, le choix de l'année de référence a un impact sur l'évolution de la production réelle (Fix, Nitzan et Bichler, 2019). Le tableau 1 donne un exemple simple pour illustrer ce point.

Tableau 1 : Prix relatifs de référence et mesure de la production réelle

| | Paquets de chips | | Ordinateurs | | PIB Nominal | |
|-------------|------------------|------|-------------|---------|-------------|------|
| | Nombre | Prix | Nombre | Prix | | |
| 2015 | 10 000 | 2€ | 1 | 10 000€ | 30 000€ | +25% |
| 2020 | 11 000 | 2,5€ | 2 | 5 000€ | 37 500€ | |

| | Prix relatifs de 2015 : 1 ordinateur = 2000 paquets de chips | | Prix relatifs de 2020 : 1 ordinateur = 5000 paquets de chips | |
|-------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| | PIB réel en chips | PIB réel en ordinateurs | PIB réel en chips | PIB réel en ordinateurs |
| 2015 | 15 000 | 3 | 12 000 | 6 |
| 2020 | 21 000 (+40%) | 4,2 (+40%) | 15 000 (+25%) | 7,5 (+25%) |
| | Inflation déduite : -10,8% | | Inflation déduite : 0 % | |

Source : Auteur, à partir d'un exemple de Steindel (1995).

En l'espèce, il n'y a aucun moyen de savoir quel est le bon niveau de prix relatifs (2015 ou 2020) à utiliser pour agréger la production réelle. Fondée sur un raisonnement néoclassique, la méthode de l'indice chaîné est une réponse imparfaite qui consiste à prendre une référence de prix relatifs mouvante dans le temps (Fix, 2017). L'idée sous-jacente étant que les prix relatifs de l'année en cours sont les « bons prix » pour déflater.

Le choix des prix relatifs est encore plus problématique lorsque l'on intègre les questions de qualité. Pour pouvoir compter des quantités d'ordinateurs par exemple, il faut pouvoir raisonner à qualité constante. Le statisticien doit donc être en mesure de quantifier un certain nombre d'attributs en un chiffre, une opération délicate (Stiglitz, Sen et Fitoussi, 2008). Si les différents attributs d'un ordinateur le rendent 50% plus performant, alors le nouveau modèle vaudra 1,5 fois l'ancien. L'ajustement de la qualité est donc une procédure similaire à celle de l'année de référence : le statisticien choisit les bons prix relatifs pour organiser les équivalences entre les biens d'une même catégorie dans le présent (différentes qualités coexistent) et au cours du temps (la qualité ayant tendance à évoluer). Dans le cas des ordinateurs, on constate de très importantes

disparités dans l'ajustement de la qualité entre pays, preuve que les attributs pris en compte ne font pas l'unanimité (Fix, Nitzan et Bichler, 2019). La qualité est donc conventionnelle et hautement conflictuelle puisqu'elle détermine en retour l'inflation mesurée (Jany-Catrice, 2019). L'ajustement de la qualité devrait suffire à nous convaincre que la production réelle n'est pas une mesure de la production physique : l'idée est plutôt d'avoir un raisonnement à pouvoir d'achat constant, à utilité constante de l'unité monétaire dépensée.

Pour toutes ces raisons, le PIB réel ne peut pas être rigoureusement utilisé pour étudier la relation technique qui lie la production physique aux facteurs de production. Un autre agrégat physique est nécessaire. Symétriquement, le rôle de l'énergie dans la création de valeur économique ne peut pas être appréhendé comme une relation technique. Production physique et PIB réel admettent des sources différentes.

3.2 Les sources de la production physique diffèrent de celle de la valeur économique

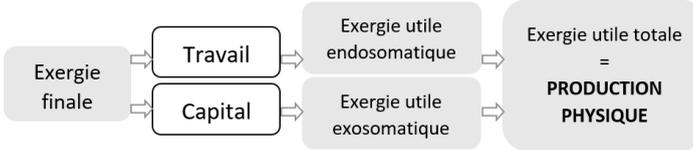
La valeur des biens et services renvoie à deux dimensions : tous les biens admettent une valeur d'usage dans la mesure où ils ont une utilité, mais certains seulement deviennent des marchandises et accèdent au stade de la valeur d'échange. Originellement mises en évidence par Aristote, ces catégories sont mobilisées par les classiques et Marx. Ces derniers insistent sur le fait que valeur d'usage et valeur d'échange admettent des sources différentes. À l'inverse, les difficultés à intégrer convenablement l'énergie à la théorie de la croissance résultent de la confusion de ces deux registres par le courant néoclassique (Harribey, 2013).

En tant que valeur d'usage, les biens et services doivent être produits : ils ont donc une dimension physico-technique. De l'énergie et de la matière sont alors prélevés de l'environnement et subissent une dégradation qualitative (cf. figure 1). Du point de vue de la thermodynamique, « ce qui entre dans le processus économique consiste en ressources naturelles de valeur et ce qui en est rejeté consiste en déchets sans valeur » (Georgescu-Roegen, [1979], 46). Énergie et matière sont donc des valeurs d'usage indispensables à tout processus de production : « le travail sans énergie est un corps, le capital est une sculpture » (Keen et *al.*, 2019, 41). D'un point de vue physique, travail et capital technique convertissent de l'énergie pour transformer la matière. Ce processus économique pourrait paraître absurde (il consiste à dégrader des ressources de valeurs) s'il ne venait pas générer en retour de nouvelles valeurs d'usage : « le véritable produit économique du processus économique n'est pas un flux matériel de déchets mais un flux immatériel : *la joie de vivre* » (Georgescu-Roegen, [1979], 51).

Aucun bien ou service n'échappe à cette dimension physique : un service de transport nécessite que le chauffeur et le moteur soient alimentés en énergie, de même pour les activités réputées immatérielles. À l'entrée il y a toujours une

certaine quantité d'exergie finale et à la sortie une quantité (inférieure) d'exergie utile générée par le travail et le capital. L'exergie utile est la dernière trace physique disponible pour le chercheur, le dernier stade où l'on peut mesurer la production au sens physique (figure 2).

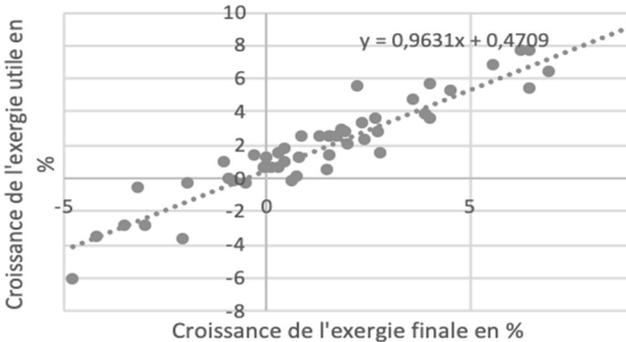
Figure 2 : Le processus de conversion de l'exergie finale en exergie utile



Source : Auteur.

Si l'objectif poursuivi est de comprendre la relation technique qui lie l'énergie finale et la production, l'exergie utile est une unité plus pertinente que la monnaie pour agréger et mesurer l'output. Le ratio entre l'exergie utile et l'exergie finale mesure rigoureusement l'efficacité de la conversion de l'énergie et permet d'appréhender la substitution entre l'énergie et le capital technique. L'étude des données récoltées pour 15 pays européens sur la période 1961-2009 montre par exemple une élasticité entre la production physique et l'énergie finale de l'ordre de 0,96 (figure 3). Ces données très sommaires suggèrent d'une part, que la progression de la production physique est bien arrimée à la consommation d'énergie finale, et, d'autre part, que la substituabilité entre capital et énergie finale au niveau macro-économique serait relativement faible.

Figure 3 : Croissance de la production physique et de l'énergie finale utilisée pour 15 pays européens (1961-2009)



Source : Calculs de l'auteur à partir des données de Serrenho et al. (2014).

Par ailleurs, l'exergie utile est une mesure stable au cours du temps, insensible à une année de référence et prend en compte les différences de qualité dans l'agrégation. Elle évacue l'épineuse question des frontières de la production propre au PIB : quelle que soit la nature de l'activité (marchande, non marchande, domestique), la production physique de l'agent économique est prise en compte. Un retraité qui va chercher ses petits-enfants à l'école produit

une valeur d'usage qui a une empreinte physique, de même d'un repas cuisiné, qu'il le soit à domicile, dans une cantine scolaire ou dans un restaurant privé. La manière dont les biens sont produits et distribués dans la société ne modifie pas la mesure. Enfin, le rôle de la matière est indirectement pris en compte puisque cette dernière a nécessité de l'énergie pour être extraite de l'environnement, puis transformée.

Dès lors que l'on s'intéresse à la production physique, l'exergie utile doit donc être substituée au PIB réel. C'est d'ailleurs la voie défendue désormais par Ayres et ses co-auteurs dans un article récent (Keen, Ayres et Standish, 2019).

Bien que liée, la croissance de la production physique ne saurait être confondue avec la croissance économique : le PIB réel mesure la valeur économique déflatée réalisée au cours de l'année. Or, cette valeur économique ne concerne que les biens et services dont la valeur monétaire a été validée sur le marché (production marchande) ou bien politiquement (production non marchande) (Harribey, 2008). De ce fait, les sources de la valeur économique diffèrent de celle de la production physique : le degré de concurrence sur les marchés et les coûts de production pour la première, la quantité et la qualité des facteurs de production pour la seconde (tableau 2). Le problème de la théorie néoclassique de la croissance est qu'elle ne dit rien du rôle de l'énergie dans la formation des différents coûts de production : que cela soit la force de travail, les biens d'équipement ou les différentes consommations intermédiaires. En confondant production physique et PIB réel, elle ne s'intéresse qu'aux quantités et à la qualité des facteurs de production mobilisés. Le même reproche peut être fait à une partie des travaux de l'économie écologique qui proposent des théories « énergétique » de la valeur économique, alors que leurs démonstrations portent en réalité sur la contribution de l'énergie à la production physique (Burkett, 2006).

Tableau 2 : Deux domaines distincts : la production physique et la valeur économique

| | Production physique | Valeur économique |
|--------------------|---|---|
| Objectifs | Etudier la dépendance de la production physique à la consommation d'énergie | Etudier le bouclage macro-économique, le partage de cette valeur économique |
| Indicateurs | Exergie utile | PIB nominal |
| Sources | Facteurs de production / forces productives | Coûts de production et concurrence / travail socialement nécessaire |

Source : Auteur.

À l'inverse, la théorie marxiste est moins sujette à ce genre d'erreurs puisqu'elle reconnaît d'emblée la différence entre valeur d'usage et valeur d'échange (Marx, [1867]). Dans ce cadre, le concept de *forces productives* désigne les différents facteurs de production impliqués dans la production physique, tandis que le *travail socialement nécessaire* rend compte de la valeur économique dans le capitalisme concurrentiel. En d'autres termes, la relation technique, appelée

aussi *procès de travail*, n'est pas confondue avec les rapports sociaux (Barrillon, 2013).

N'admettant pas les mêmes sources, production physique et valeur économique peuvent diverger à l'échelle d'un territoire. C'est ce que révèle la trajectoire des pays développés depuis 1950, étudiée par Cahen-Fourot et Durand (2016). Alors que de 1950 à 1974, la production physique croît plus rapidement que la valeur économique réalisée, à partir de 1974, la tendance s'inverse : le PIB réel augmente plus rapidement que la production physique (tableau 3). Ce découplage n'est pas lié à un changement technique, mais au fait que la production de valeur économique dans les pays développés tend à prendre de nouvelles formes qui ne reposent plus sur une augmentation de la production physique domestique. L'évolution de la division internationale du travail, résultat de nouvelles chaînes globales de marchandises (Malm, 2016), le processus de financiarisation (Kovacic et al., 2018) ainsi que la tertiarisation expliquent en partie ces tendances.

Tableau 3 : Croissance annuelle moyenne du ratio PIB réel/exergie utile entre 1950 et 2009

| | Fordisme | | Néolibéralisme | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-----------|
| | 1950-1960 | 1960-1974 | 1974-2000 | 2000-2009 |
| Allemagne | | -1,30 | 2,30 | 0,72 |
| France | | 0,17 | 1,18 | 1,02 |
| Japon | -2,7 | 0,14 | 1,10 | |
| Royaume-Uni (Ayres et Warr) | -2,28 | -1,08 | 1,16 | |
| Royaume-Uni (Serrenho et al.) | | 0,79 | 1,61 | 2,71 |
| États-Unis | -0,77 | -1,60 | 1,77 | |
| Moyenne | -1,92 | -0,48 | 1,52 | 1,48 |

Source : Cahen-Fourot et Durand, 2016, 20.

Ce constat ne permet toutefois pas de conclure que le rôle de l'énergie dans la création de valeur économique serait devenu négligeable. Par exemple, la valeur réalisée par un producteur de services français dépend du degré de concurrence mais également de ses coûts de production. Or, l'énergie participe incontestablement à la relative faiblesse de ces coûts. Les chocs énergétiques sont là pour nous le rappeler. En tant que valeur d'usage indispensable, tous les procès de production sont renchéris. De manière directe pour les productions intensives en énergie (agriculture et industrie), de manière indirecte par le prix de la force de travail, pour les secteurs peu intensifs (services).

CONCLUSION

La théorie néoclassique estime que la contribution de l'énergie au processus de croissance est mineure. Ce constat fonde son exclusion de la théorie de la croissance ainsi que le discours sur la possibilité du découplage absolu entre

croissance économique et consommation d'énergie. Au vu des apports de la thermodynamique ainsi que de la fragilité de la méthode employée, ces conclusions peuvent être remises en cause. Reste à savoir comment intégrer l'énergie à la théorie de la croissance. Une partie de l'économie écologique pense que cette intégration dans le cadre néoclassique et des fonctions de production est possible. Nous montrons, au contraire, que cette approche est limitée tant que la distinction entre la production physique et la création de valeur économique n'est pas prise en compte. L'étude de la relation technique entre énergie finale et production physique est importante : elle permet de discuter du degré de substituabilité entre capital technique et énergie ; elle n'est pourtant pas suffisante. Une théorie de la croissance qui intègre l'énergie doit pouvoir préciser le rôle de cette dernière dans la création de valeur économique, c'est-à-dire comment elle intervient dans la formation des différents coûts (la force de travail, les consommations intermédiaires et les biens d'équipement). Ces coûts ne sont pas déterminés de manière domestique mais de plus en plus dans une optique internationale du fait des chaînes globales de marchandises et de l'extraversion de la consommation des ménages. Les travaux sur les chocs de prix de l'énergie mériteraient donc une plus grande attention de la part des théoriciens de la croissance. La hausse soudaine et franche du prix de l'énergie montre qu'elle est au cœur de la dynamique des coûts et de la création de valeur. La faiblesse de la facture énergétique rapportée au PIB ne doit pas nous induire en erreur.

BIBLIOGRAPHIE

- AGHION P., HOWITT P., BURSZTYN L. (2009) *The economics of growth*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 495 p.
- AYRES R. U., VAN DEN BERGH J. C. J. M., LINDENBERGER D., WARR B. (2013) The underestimated contribution of energy to economic growth, *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 27, 79-88.
- AYRES R. U., WARR B. (2005) Accounting for growth: the role of physical work, *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 16, n° 2, 181-209.
- BARRILLON M. (2013) Les marxistes, Marx et la question naturelle, *Écologie politique*, 47, Presses de Sciences Po, 115-143.
- BASU D., FOLEY D. K. (2013) Dynamics of output and employment in the US economy, *Cambridge Journal of Economics*, vol. 37, n° 5, 1077-1106.
- BECK S., RIBON O., RIEDINGER N. (2019) *Chiffres clés de l'énergie. Édition 2019*, Service de la donnée et des études statistiques (SDES), Paris, 80 p.
- BURKETT P. (2006) *Marxism and ecological economics: toward a red and green political economy*, Leiden, Brill, 355 p.
- CAHEN-FOUROT L., DURAND C. (2016) La transformation de la relation sociale à l'énergie du fordisme au capitalisme néolibéral. Une exploration empirique et macro-économique comparée dans les pays riches (1950-2010), *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, n° 20.

- CHAPMAN I. (2014) The end of Peak Oil? Why this topic is still relevant despite recent denials, *Energy Policy*, vol. 64, 93-101.
- CHRISTOPHERS B. (2011) Making finance productive, *Economy and Society*, vol. 40, n° 1, 112-140.
- CLARK J. B. (1899) *The distribution of wealth: a theory of wages, interest and profits*, New York, The Macmillan Company, 445 p.
- COUX Q. (2019) L'énergie et les fonctions de production agrégées : perspectives historique et méthodologique, *Document de travail du Centre d'économie de la Sorbonne*, 45.
- DENISON E. F. (1979) *Accounting for slower economic growth: The United States in the 1970's*, Washington, D.C., The Brookings Institution, 212 p.
- DOUAI A., PLUMECOCQ G. (2017) *L'économie écologique*, Paris, La Découverte, 126 p.
- FELIPE J., MCCOMBIE J. S. L. (2014) The Aggregate Production Function: 'Not Even Wrong', *Review of Political Economy*, vol. 26, n° 1, 60-84.
- FIX B. (2017) The Aggregation Problem: Implications for Ecological and Biophysical Economics, *BioPhysical Economics and Resource Quality*, vol. 4, n° 1, 1-15.
- FIX B., NITZAN J., BICHLER S. (2019) Real GDP: The Flawed Metric at the Heart of Macroeconomics, *Real-world economics review*, n° 88, 51-59.
- FRIOT B. (2012) *L'enjeu du salaire*, Paris, la Dispute, 202 p.
- GEORGESCU-ROEGEN N. ([1979], édition 1995, Paris, in J. Grinevald et I. Rens (dir.) *La décroissance : entropie, écologie, économie*, Paris, Sang de la terre, 254 p.
- GEORGESCU-ROEGEN N. (1976) *Energy and economic myths: institutional and analytical economic essays*, New York, Pergamon Press, 380 p.
- GIRAUD G., KAHRAMAN Z. (2014) How Dependent is Growth from Primary Energy? The Dependency ratio of Energy in 33 Countries (1970-2011), *Documents de travail du Centre d'économie de la Sorbonne*, 28 p.
- GUERRIEN B. (2016) La théorie néoclassique de la répartition : John Bates Clark et les autres, Site internet de l'auteur, http://bernardguerrien.com/wp-content/uploads/2017/07/repartition_clark.pdf, 12 p.
- HAMILTON J. D. (2011) Historical Oil Shocks, *NBER Working Paper*, No. w16790.
- HARRIBEY J.-M. (2013) *La richesse, la valeur et l'inestimable : fondements d'une critique socio-écologique de l'économie capitaliste*, Paris, Éditions les Liens qui libèrent, 542 p.
- HARRIBEY J.-M. (2008) Travail, valeur et monnaie : dépoussiérage des catégories marxistes appliquées à la sphère non marchande, *L'Homme et la société*, n° 170-171, 127-150.
- JANY-CATRICE F. (2019) *L'indice des prix à la consommation*, Paris, La Découverte, 126 p.
- KEEN S., AYRES R. U., STANDISH R. (2019) A Note on the Role of Energy in Production, *Ecological Economics*, vol. 157, 40-46.
- KOVACIC Z., SPANÒ M., PIANO S. L., SORMAN A. H. (2018) Finance, energy and the decoupling: an empirical study, *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 28, 565-590.
- KÜMMEL R. (2013) Why energy's economic weight is much larger than its cost share, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 9, 33-37.
- KÜMMEL R. (1982) The impact of energy on industrial growth, *Energy*, vol. 7, n°2, 189-203.
- LUTZ K. (2008) The Economic Effects of Energy Price Shocks, *Journal of Economic Literature*, vol. 46, n° 4, 871-909.

- MALM A. (2016) *Fossil capital: the rise of steam power and the roots of global warming*, London, Verso, 488 p.
- MANKIW N. G. (1997) *Macroeconomics*, New York, Worth Publications, 531 p.
- MARX K. ([1867] édition 1985, Paris, Roy J. et Althusser L.) *Le capital. Livre I, sections 1 à 4*, Paris, Flammarion, 442 p.
- MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANDERS J., BEHRENS W. W. I. et CLUB DE ROME (1972) *The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*, New York, Universe Books, 205 p.
- ROBINSON J. (1953) The Production Function and the Theory of Capital, *The Review of Economic Studies*, vol. 23, n° 2, 81-106.
- SAKAI M., BROCKWAY P., BARRETT J., TAYLOR P. (2018) Thermodynamic Efficiency Gains and their Role as a Key 'Engine of Economic Growth', *Energies*, vol. 12, n° 1, 110-124.
- SANTOS J., DOMINGOS T., SOUSA T., 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*, vol. 148, 103-120.
- SANTOS J., DOMINGOS T., SOUSA T., ST. AUBYN M. (2016) Does a small cost share reflect a negligible role for energy in economic production?, Marine, Environment and Technology Center, University of Lisbon, *Working paper*, 61 p.
- SERRENHO A. C., SOUSA T., WARR B., AYRES R. U., DOMINGOS T. (2014) Decomposition of useful work intensity: The EU (European Union)-15 countries from 1960 to 2009, *Energy*, vol. 76, 704-715.
- SHAIKH A. (1974) Laws of Production and Laws of Algebra: The Humbug Production Function, *The Review of Economics and Statistics*, vol. 56, n° 1, 115-120.
- SOLOW J. L. (1987) The Capital-Energy Complementarity Debate Revisited, *American Economic Review*, vol. 74, n° 4, 605-614.
- SOLOW R. M. (1974) The Economics of Resources or the Resources of Economics, *The American Economic Review*, vol. 64, n° 2, 1-14.
- SOLOW R. M. (1957) Technical Change and the Aggregate Production Function, *The Review of Economics and Statistics*, vol. 39, n° 3, 312-320.
- SOUSA T., BROCKWAY P. E., CULLEN J. M., HENRIQUES S. T., MILLER J., SERRENHO A. C., DOMINGOS T. (2017) The Need for Robust, Consistent Methods in Societal Exergy Accounting, *Ecological Economics*, vol. 141, 11-21.
- SRAFFA P. (1963) *Production of commodities by means of commodities: prelude to a critique of economic theory*, Cambridge, Cambridge University Press, 98 p.
- STEINDEL C. (1995) Chain-weighting: The New Approach to Measuring GDP, *Current Issues in Economics and Finance*, vol. 1, n° 9, 1-6.
- STIGLITZ J. (1974) Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths, *The Review of Economic Studies*, vol. 41, 123-137.
- STIGLITZ J., SEN A., FITOUSSI J.-P. (2008) *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, Paris, La Documentation française.