



HAL
open science

Le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB : questionnements théoriques et évaluations empiriques du rôle de l'énergie dans le processus de croissance économique

Alban Pellegris

► To cite this version:

Alban Pellegris. Le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB : questionnements théoriques et évaluations empiriques du rôle de l'énergie dans le processus de croissance économique. *Economies et finances*. Université Rennes 2, 2022. Français. NNT : 2022REN20044 . tel-04053301

HAL Id: tel-04053301

<https://theses.hal.science/tel-04053301v1>

Submitted on 31 Mar 2023

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 604

Sociétés, Temps, Territoires

Spécialité : « *Economie et société* »

Par

Alban PELLEGRIS

Le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB :

Questionnements théoriques et évaluations empiriques du rôle de
l'énergie dans le processus de croissance économique

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le vendredi 16 décembre 2022

Unité de recherche : LiRIS – EA7481

Rapporteurs avant soutenance :

Tom BAULER
Cédric DURAND

Professeur à l'Université libre de Bruxelles
Professeur à l'Université de Genève

Composition du Jury :

Examineurs : Florence JANY-CATRICE
Hélène TORDJMAN

Professeure à l'Université de Lille
MCF-HDR à l'Université Sorbonne Paris-Nord

Dir. de thèse : Marc LAUTIER
Franck-Dominique VIVIEN

Professeur à l'Université Rennes 2
Professeur à l'Université Reims Champagne Ardenne

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 604

Sociétés, Temps, Territoires

Spécialité : « *Economie et société* »

Par

Alban PELLEGRIS

Le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB :

Questionnements théoriques et évaluations empiriques du rôle de
l'énergie dans le processus de croissance économique

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le vendredi 16 décembre 2022

Unité de recherche : LiRIS – EA7481

Rapporteurs avant soutenance :

Tom BAULER
Cédric DURAND

Professeur à l'Université libre de Bruxelles
Professeur à l'Université de Genève

Composition du Jury :

Examineurs : Florence JANY-CATRICE
Hélène TORDJMAN

Professeure à l'Université de Lille
MCF-HDR à l'Université Sorbonne Paris-Nord

Dir. de thèse : Marc LAUTIER
Franck-Dominique VIVIEN

Professeur à l'Université Rennes 2
Professeur à l'Université Reims Champagne Ardenne

L'université n'entend ni approuver, ni désapprouver les opinions particulières émises dans cette thèse. Ces opinions sont considérées comme propres à l'auteur.

A ma mère,

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mes deux directeurs de thèse, Marc Lautier et Franck-Dominique Vivien pour m'avoir suivi et aidé tout au long de ces années. Je souhaite également remercier Cédric Durand et Tom Bauler d'avoir accepté de lire et commenter mon travail en tant que rapporteurs. Je suis également très reconnaissant à Florence Jany-Catrice et Hélène Tordjman de prendre part au jury de cette thèse.

Une thèse est avant tout une affaire de temps pour lire, penser et écrire. Cela n'aurait pas été possible sans les conseils précieux de Richard Sobel qui m'a encouragé et fait connaître les décharges accordées aux PRAG. Je remercie l'Université de Rennes 2 d'avoir rendu cela possible, en particulier Johan Oszwald, pour son soutien indéfectible dans cette démarche, le LIRIS, mon laboratoire, pour avoir mis à disposition les ressources nécessaires à la poursuite de mon travail, mais également, tous mes collègues de l'équipe d'économie de Rennes 2, pour avoir accepté ce passage à mi-temps pendant trois ans.

Une thèse c'est aussi prendre conscience que la recherche est une aventure avant tout collective. Je remercie ici mes collègues Léo, Alexandre, Anaïs et Yann pour nos discussions stimulantes, les projets en commun comme le séminaire ESR² et leurs regards sur mon travail, Béatrice pour m'avoir suivi dans le cadre de mon CSI. Je remercie également les collègues des Atterés pour la qualité de nos échanges, plus particulièrement aux coauteurs de la *Dette publique*, Eric, Arthur et Jonathan, ainsi que Dominique avec qui j'ai eu plaisir à travailler.

Enfin, cette thèse n'aurait jamais pu aboutir sans le soutien de ma famille et de mes amis. Merci aux copains de l'IEP, Louis, Julian, Romain et Charly, aux granvillais, à Mathieu et Sarah, pour tous les bons moments. Merci à Floréal pour sa relecture, à Alain et Christiane et toute la famille Nogues de m'avoir accueilli parmi eux avec autant de gentillesse, à Clémentine et Guillaume que je souhaiterais voir plus souvent. Merci à Lucie que j'aimerais avoir plus près de moi, à Yvan d'avoir été là pour moi, à Huguette pour tous les sacrifices qui m'ont permis d'en arriver là. Merci à Annabelle qui m'a soutenu et supporté au long de ce périple qui s'achève.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	15
CHAPITRE 1. APPREHENDER LE DECOUPLAGE : UNE REFLEXION METHODOLOGIQUE	35
CHAPITRE 2. L'ENERGIE ET LES FONCTIONS DE PRODUCTION AGREGEE. EVALUATION DE LA PERTINENCE DU CADRE NEOCLASSIQUE POUR INTÉGRER L'ENERGIE À LA THEORIE DE LA CROISSANCE	117
CHAPITRE 3. L'APPROCHE PAR LE SURPLUS. UNE ANALYSE DES PROPOSITIONS NEOPHYSIOCRATIQUES ET CLASSIQUES QUANT AU ROLE DE L'ENERGIE DANS LE PROCESSUS DE CROISSANCE.	181
CHAPITRE 4 MESURER LA CONTRIBUTION DE L'ENERGIE À L'ACCUMULATION DU CAPITAL : UNE EVALUATION EMPIRIQUE DU CANAL DU TAUX DE PROFIT.	271
CONCLUSION GENERALE.....	329
BIBLIOGRAPHIE GENERALE	337
LISTE DES TABLEAUX	359
LISTE DES FIGURES	363
LISTE DES ACRONYMES	367
TABLE DES MATIERES GENERALE.....	371

INTRODUCTION GENERALE

Lors de sa conférence de presse du 7 septembre 2022, le président de la République française, Emmanuel Macron, a appelé ses concitoyens à « être au rendez-vous de la sobriété »¹ dans le but d'éviter des rationnements en gaz et en électricité, cet hiver. En effet, suite à l'éclatement du conflit ukrainien, début février 2022, et à l'annonce de sanctions économiques européennes à l'égard de la Russie, les approvisionnements européens en gaz russe ont été sévèrement réduits². Bien que sa production électrique soit à 80% nucléaire, permettant une moindre exposition relativement à d'autres partenaires européens comme l'Allemagne, la France reste très dépendante des énergies fossiles³. Aussi, malgré l'importation massive, en urgence, de gaz naturel liquéfié américain l'Union européenne peine encore à trouver d'autres fournisseurs susceptibles de prendre le relais. Cet épisode permet de saisir à quel point l'accès à l'énergie est fondamental pour nos sociétés, de même que pour le processus économique qui y prend place.

Le retour des chocs énergétiques

Outre les quantités d'énergie disponibles, l'accessibilité sociale de l'énergie s'apprécie à partir du prix auquel elle est achetée. Or, le conflit ukrainien est venu amplifier le rationnement de la demande énergétique par rapport à l'offre, né de la reprise post-Covid. Alors que le baril de pétrole brut valait 70\$, début décembre 2021, il s'échange pour 96\$ en septembre 2022, après avoir connu des pics, en février 2022, autour de 125\$. L'évolution des prix de gros du gaz est encore plus marquée : 335 euros par mégawattheure au printemps 2022 contre 46 euros en août 2021⁴. Ces augmentations de prix tirent l'inflation vers des niveaux que les économies n'avaient plus connus depuis au moins trente ans (figure 1).

¹ Il est intéressant de noter que, lors du pic du pétrole américain au début des années 1970, le président des Etats-Unis d'alors, Jimmy Carter, exhortait déjà ses concitoyens à « renoncer au consumérisme et à renouer avec les valeurs chrétiennes de sobriété » (Fressoz, 2013, p.2).

² Par exemple, les exportations de gaz de Gazprom, qui étaient de 12,1 milliards de m3 en juin 2021, n'étaient plus que de 4,7 milliards de m3 en juin 2022, soit une baisse de 61,1%.

³ D'après le Bilan énergétique de la France publié par le SDES, 46,4% du mix énergétique français repose sur des énergies fossiles en 2020.

⁴ 16/08/2022, « Les prix du gaz en Europe pourraient encore augmenter de 60%, avertit Gazprom », *L'Usine Nouvelle*, en ligne : <https://www.usinenouvelle.com/article/les-prix-du-gaz-en-europe-pourraient-encore-augmenter-de-60-avertit-gazprom.N2034452>

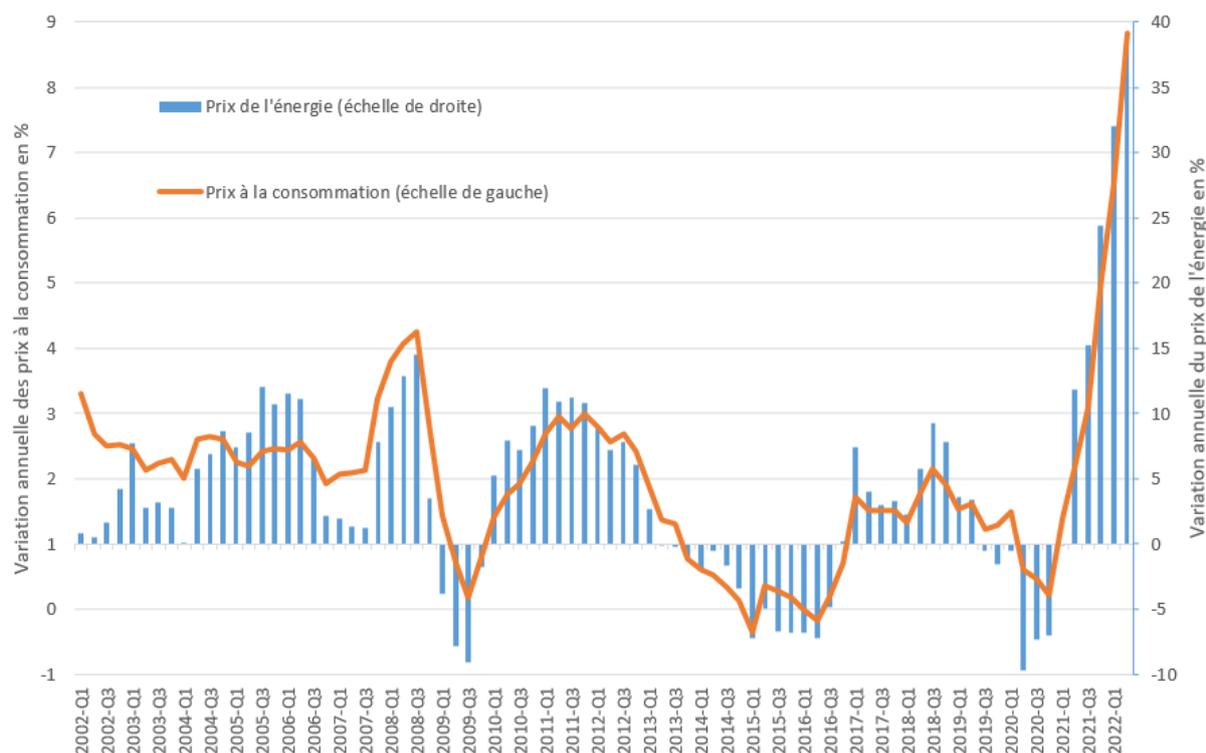


Figure 1. **Taux d'inflation annuel du prix à la consommation et du prix de l'énergie pour les 27 pays européens (2002-2022).**

Source : Auteur. Données : OCDE.

Cette situation nous rappelle que l'énergie peut ainsi être à l'origine d'effets macroéconomiques importants, sur l'inflation, mais également sur l'activité économique. D'après Hamilton (2016), 9 des 10 dernières récessions états-uniennes ont été précédées d'une augmentation des prix du pétrole. La dernière grande crise, celle des *subprimes* (2007), n'échappe pas à la règle : certains commentateurs parlent de « troisième choc pétrolier » pour caractériser l'augmentation des prix de l'énergie au cours des années 2000⁵ (Acurio Vásconez et al., 2015 ; Giraud, 2008 ; Tverberg, 2012). D'après l'OFCE (Heyer et Timbeau, 2022), la croissance française ne devrait être que de 2,4% en 2022, la crise énergétique ayant coûté 1,3 point de croissance (hors mesures de soutien de l'Etat) cette année-là. En 2023, la croissance du PIB ne devrait pas dépasser les 1%.

⁵ Par exemple, pour les 27 pays européens, entre 2000 et 2007, le prix nominal de l'énergie augmente de 35,6%. En réel, c'est-à-dire en le déflatant par l'indice des prix à la consommation, cette évolution reste significative (+16,3%). Le prix de l'énergie augmente plus vite que le prix des autres biens et services.

Les prix élevés de l'énergie affectent, non seulement la consommation des ménages mais également l'offre des entreprises. Le sidérurgiste Arcelor Mittal a, par exemple, annoncé, le 2 septembre 2022, qu'il arrêterait temporairement deux de ses seize hauts fourneaux européens en raison de « prix de l'énergie qui ont grimpé de manière exorbitante » affectant significativement leur compétitivité⁶. Pour d'autres secteurs, où la demande est plus inélastique, la hausse des coûts est répercutée dans les prix à la consommation, alimentant l'augmentation du niveau général des prix. Ainsi en va-t-il du secteur des engrais, très énergivore, où les prix ont augmenté de 151%, non sans conséquences sur ceux des biens alimentaires⁷. Du côté des ménages, l'augmentation des prix de l'énergie vient peser sur le pouvoir d'achat. Au Royaume-Uni, où l'intervention gouvernementale en la matière a été plus timide, les prix de l'énergie acquittés par les ménages ont, en quelques mois, augmenté de près de 80%, de sorte que près de 50% d'entre eux risquent de basculer prochainement dans la précarité énergétique⁸. En France, le « bouclier tarifaire » a limité cette réduction du pouvoir d'achat des ménages : l'INSEE estime que, sans cette intervention des pouvoirs publics, la hausse annuelle des prix de l'énergie aurait été, au deuxième trimestre 2022, de 54%, et non pas 28% (Bourgeois et Lafrogne-Jouissier, 2022).

L'énergie peut donc être un facteur limitant pour l'activité économique. En effet, elle présente la caractéristique d'être indispensable à de nombreuses activités, donc peu substituable, du moins à court terme. A moyen et long termes, le caractère indispensable de l'énergie est plus controversé, bien que la majorité des économistes croient en la capacité des progrès technologiques à diminuer la consommation énergétique sans nuire à l'activité économique. Au-delà de la situation conjoncturelle, la réduction de la consommation d'énergie est également un enjeu au regard de la crise écologique.

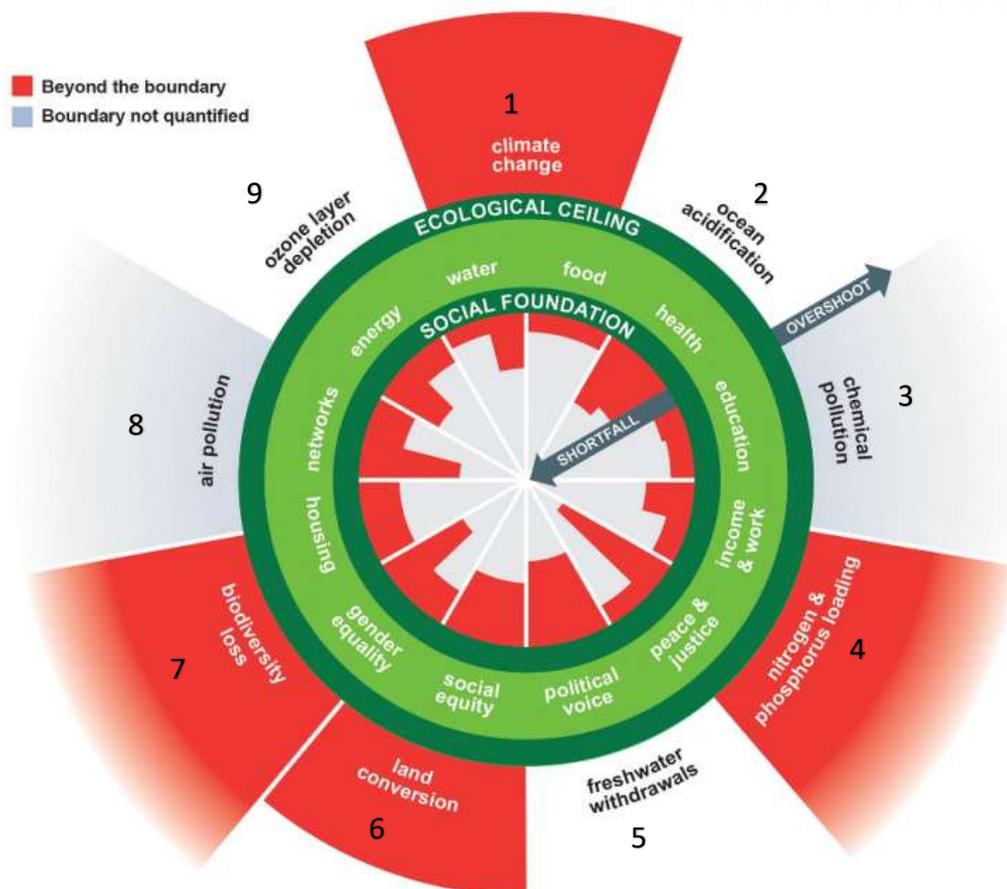
⁶ 4/09/2022, « Prix de l'énergie : ArcelorMittal contraint de réduire sa production en Europe », *La Tribune*, en ligne : <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/industrie-lourde/prix-de-l-energie-arcelormittal-contraint-de-reduire-sa-production-en-europe-929186.html>

⁷ 23/05/2022, « Pourquoi l'augmentation des prix du gaz entraîne une hausse des biens alimentaires ? », Euronews, en ligne : <https://fr.euronews.com/my-europe/2022/05/23/pourquoi-l-augmentation-des-prix-du-gaz-entraîne-une-hausse-des-biens-alimentaires>

⁸ La précarité énergétique désigne une situation où un ménage alloue une part jugée excessive aux dépenses énergétiques. Au Royaume-Uni, le taux d'effort retenu est de 10% du revenu.

La réduction de la consommation d'énergie comme impératif climatique

D'après le Stockholm Resilience Center (Rockström et al., 2009) neuf limites planétaires peuvent être identifiées (figure 2).



1. Le changement climatique, 2. L'acidification des océans, 3. La pollution chimique, 4. La perturbation des cycles de l'azote et du phosphore, 5. L'utilisation de l'eau douce, 6. Les changements de l'occupation des sols, 7. L'appauvrissement de la biodiversité, 8. La pollution de l'air, 9. L'amincissement de la couche d'ozone.

Figure 2. **Les 9 seuils écologiques d'après la théorie du Doughnut.**
Source : site internet de Kate Raworth⁹.

⁹ Kate Raworth (2017) est venue vulgariser ces travaux en forgeant le concept d'économie du beignet (doughnut economics), c'est-à-dire une économie compatible avec les limites planétaires (<https://www.kateraworth.com/doughnut/>)

D'après Persson et al. (2022) six seuils écologiques ont déjà été dépassés. La consommation d'énergie est liée de manière évidente à l'un de ces seuils : le changement climatique¹⁰, c'est-à-dire tout changement de climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. En effet, au niveau mondial, près de 2/3 des émissions de gaz à effet de serre (GES) proviennent de la consommation d'énergie, très majoritairement d'origine fossile (autour de 85%), et dont la combustion émet du CO₂. Ces émissions ne cessent d'augmenter : au niveau mondial, elles ont été multipliées par 17,6 depuis 1900 avec une accélération notable depuis 1945 (voir figure 3). Elles atteignent, en 2020, 34,8 milliards de tonnes et excèdent très largement, de l'ordre de 56%, la capacité de l'environnement (par les forêts, par les océans) à les absorber.

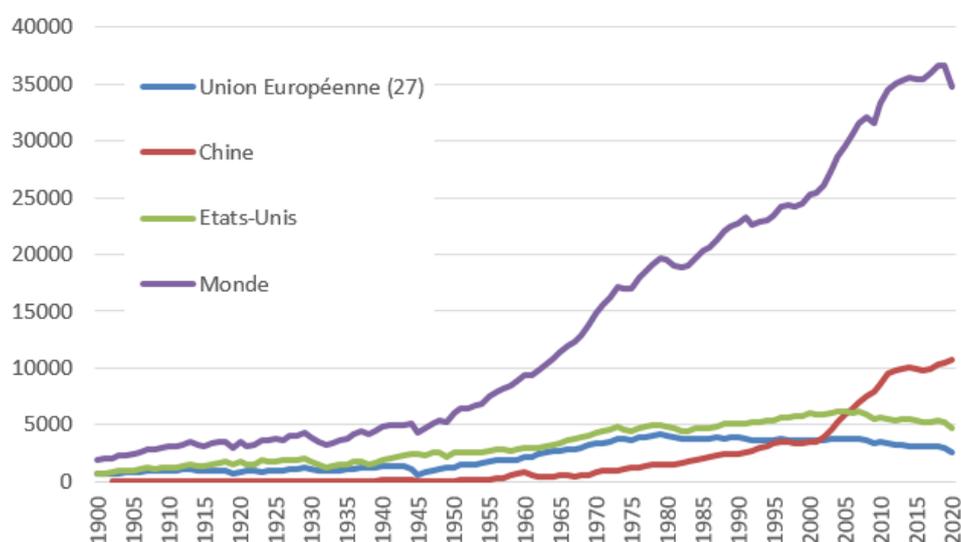


Figure 3. **Emissions annuelles de CO₂ dans le monde, dans l'Union européenne, en Chine et aux Etats-Unis (1900-2020). Unité : millions de tonnes de CO₂.**

Source : auteur. Données : Our World in Data.

D'après le Global Carbon Budget, limiter le réchauffement à deux degrés d'ici à la fin du siècle impose aux pays de ne pas rejeter 1270 milliards de tonnes supplémentaires de CO₂. Au rythme actuel des émissions, ce *budget carbone* sera épuisé dans 36 ans. C'est pourquoi le GIEC préconise une division par deux, par rapport au niveau de 1990, des émissions mondiales de CO₂ d'ici à 2050. Pour l'Union européenne, du fait des émissions actuelles et de sa

¹⁰ Dans la mesure où les changements sont multiples (élévation de la température mais également du niveau des mers, intensification des événements extrêmes comme les sécheresses et précipitations, etc...) certains experts préfèrent utiliser le terme au pluriel.

population, la réduction est plus importante, de l'ordre d'un facteur 4. Par la loi POPE¹¹ du 13 juillet 2005, la France s'est ainsi engagée à atteindre un niveau de 140Mt par an en 2050 (contre 418Mt émises en 2021). Avec la Stratégie Nationale Bas Carbone (2015), l'objectif a même été durci puisqu'il s'agit désormais d'atteindre la neutralité carbone en 2050, ce qui implique une division, non plus par 4, mais par 6 des émissions de GES.

Pour lutter contre le(s) changement(s) climatique(s), outre le développement des puits de carbone permettant de capter le CO₂ émis, les pouvoirs publics considèrent principalement deux leviers : la substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées, d'une part, la réduction de la consommation d'énergie, d'autre part. Ce second levier est fondamental. Il est au cœur de notre étude. En effet, une hausse de la consommation d'énergie rend plus difficile l'entreprise de décarbonation de l'énergie. Plus la consommation d'énergie augmente, plus les investissements pour décarboner l'énergie devront être massifs, alors même que l'effort à consentir est colossal, compte tenu du temps imparti pour réaliser cette transition énergétique. Le terme « transition » est d'ailleurs trompeur. Préféré à celui de « crise énergétique », utilisé dans les années 1970, mais jugé trop anxiogène depuis, la « transition » véhicule l'image d'une transformation progressive, graduelle et réalisable (Fressoz, 2013). Pourtant, la situation est inédite. L'histoire mondiale de l'énergie, depuis 1850, n'est pas celle d'une succession de transitions : biomasse vers le charbon, charbon vers le pétrole puis le gaz et, aujourd'hui, énergies fossiles vers le nucléaire et les renouvelables. Du fait de la croissance exponentielle de la consommation d'énergie, la trajectoire suivie a été celle d'*additions énergétiques* (figure 4) : depuis la révolution industrielle, les nouvelles sources d'énergie sont venues s'ajouter aux sources anciennes pour nourrir la hausse globale de la consommation énergétique (Fressoz, 2013).

¹¹ Pour Programme fixant les objectifs de politique énergétique.

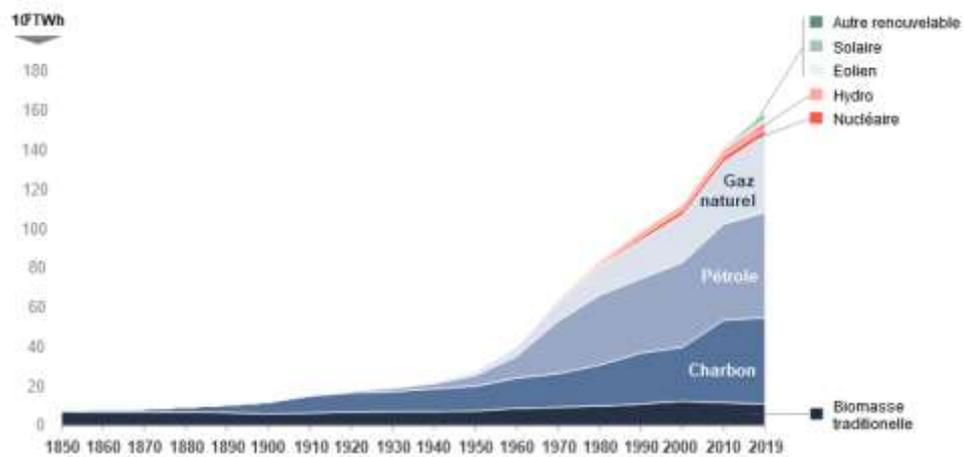


Figure 4. **Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire (1850-2019)**
Source : site internet de Carbon 4¹².

Afin de ne pas reproduire les tendances passées, la réduction de la consommation d'énergie apparaît indispensable. Pour rester sur l'exemple français, le dernier rapport de l'ADEME présente 4 scénarios permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (figure 5.). Tous sans exception exigent une baisse de la consommation d'énergie globale plus ou moins forte. Le plus ambitieux en la matière est le scénario 1 (« génération frugale ») : il mise sur une transformation importante des modes de vie permettant une réduction de la consommation énergétique de 65,6%. A l'autre extrémité du spectre, le scénario 4 (« pari réparateur ») préserve les modes de vie actuels mais table, tout de même, sur une réduction de 28% de la consommation d'énergie.

¹² <https://www.carbone4.com/publication-decouplage>

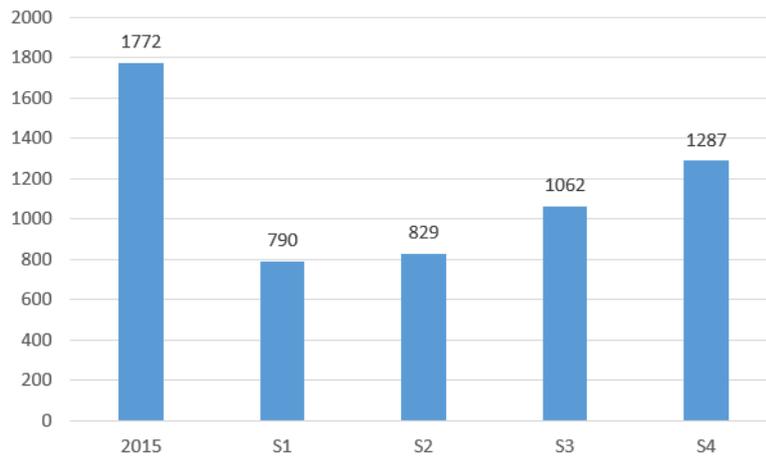


Figure 5. **Consommation finale d'énergie en TWh en 2015 et 2050 selon les 4 scénarios de l'ADEME**

Source : auteur. Données ADEME (2021).

L'un des débats économiques les plus importants, et auquel notre thèse ambitionne de contribuer, est de savoir si une telle réduction de la consommation énergétique est compatible avec une activité économique en expansion. En d'autres termes, si, à court terme, les chocs énergétiques exercent de puissants effets récessifs, la réduction de la consommation d'énergie à moyen terme, en vue d'atteindre les objectifs climatiques, est-elle compatible avec la croissance économique ?

Cette interrogation implique de présenter brièvement le concept de *découplage* qui structure ce débat. Une variable A est dite « couplée » à une variable B, dès lors qu'elle évolue *au même rythme*. Cette définition générale permet de distinguer 3 situations où les variables ne sont pas couplées (voir tableau 1). Dans le premier cas, la consommation d'énergie (E) augmente plus rapidement que le PIB réel (Y), il y a surcouplage. Dans le deuxième cas, la consommation d'énergie augmente moins vite que le PIB réel : il y a découplage. Ce dernier est alors qualifié de relatif car, même si les variables ne sont pas couplées, elles continuent d'évoluer dans le même sens. Simplement l'une augmente *relativement* moins vite que l'autre. Dans le troisième cas, la consommation d'énergie diminue alors que le PIB augmente : ici le découplage est *absolu*.

$\Delta Y < \Delta E$	$\Delta Y = \Delta E$	$\Delta Y > \Delta E$	
		$\Delta E > 0$	$\Delta E < 0$
Surcouplage	Couplage	Découplage relatif	Découplage absolu

Tableau 1. **Couplage, découplage et surcouplage entre le PIB (Y) et la consommation d'énergie (E).**

Source : auteur.

Reformulée à partir de ce concept, notre problématique devient : le découplage absolu entre la consommation d'énergie et le PIB est-il possible ? Et si c'est le cas, l'est-il à un rythme compatible avec les objectifs climatiques ?

Le découplage énergétique : une discussion sur la possibilité de la croissance verte

La réponse à cette question ne fait toujours pas consensus au sein de la communauté des économistes. Schématiquement, ce débat oppose les tenants de la soutenabilité faible, aussi appelés « cornucopiens »¹³, et les « décroissants »¹⁴, défenseurs d'une soutenabilité forte. Pour les cornucopiens (Jonsson, 2014), les progrès technologiques permettent de concilier les deux objectifs : la croissance serait alors possible sur le long terme puisque l'on pourrait augmenter la production, tout en réduisant les prélèvements en ressources (notamment énergétiques). Le découplage doit donc être inscrit au cœur des politiques publiques :

*« As global economic growth bumps into planetary boundaries, decoupling the creation of economic value from natural resource use and environmental impacts becomes more urgent »
(UNEP, United Nations Environment Programme, 2011, p.15).*

¹³ Etymologiquement, le terme « cornucopien », qui était déjà utilisé dans les années 1970, provient de « corne d'abondance ». Pour les auteurs qualifiés ainsi, les contraintes physiques ne viendraient pas limiter le développement économique et l'opulence des sociétés humaines.

¹⁴ Les décroissants sont parfois aussi qualifiés de « malthusiens » par référence à Thomas Malthus ([1830]) pour qui les contraintes naturelles (en son temps, les rendements des terres agricoles) devaient conduire le capitalisme à un état stationnaire.

Cette position peut être considérée comme hégémonique puisqu'elle est actuellement portée par au moins trois institutions internationales majeures : l'OCDE, la Banque mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE ou UNEP, en anglais) (Hickel et Kallis, 2020). D'après Brockway et al. (2021), la majorité des scénarios globaux relatifs à l'énergie envisagent une rupture structurelle dans la relation entre la consommation d'énergie et le PIB, dont de nombreux scénarios avec du découplage absolu.

Cette situation reflète notamment le fait que la plupart des économistes croient en la capacité des progrès technologiques à assurer une croissance verte¹⁵. Que cela soit du côté des travaux des théoriciens de la croissance, pour qui les ressources naturelles sont totalement substituables¹⁶ (Solow, 1974 ; Stiglitz, 1974), ou des tenants de la Courbe environnementale de Kuznets¹⁷ (Grossman et Krueger, 1995), pour qui le découplage absolu est l'horizon d'une nation qui se développe, les exemples ne manquent pas pour illustrer cette position. Intervenant devant le Congrès des Etats-Unis en 1973, Kenneth Boulding, un des fondateurs de l'économie écologique, résumait le consensus au sein de sa profession en ces termes : « Celui qui croit que la croissance peut être infinie dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste »¹⁸. Même si certains économistes se retrouvent aujourd'hui dans la décroissance, ils restent une infime minorité.

A l'inverse des cornucopiens, les décroissants considèrent que la croissance de la production s'accompagne nécessairement d'une augmentation des prélèvements en ressources (dont l'énergie) et des rejets de déchets. De plus, selon eux, les innovations technologiques ne permettraient pas de compenser l'augmentation de l'empreinte environnementale et viendraient, au contraire, encourager la consommation de ressources¹⁹. Conformément à cette conception forte de la soutenabilité (Daly, 1995), la réduction de la consommation d'énergie passerait nécessairement par une réduction du volume de la

¹⁵ "Energy efficiency is firmly embedded as a key a key mitigation strategy within Integrated Assessment Models" expliquent Brockway et al. (2021, p.1).

¹⁶ Voir chapitre 2, section 1

¹⁷ Voir chapitre 1, section 2

¹⁸ Traduction de l'anglais : "Anyone who believes that exponential growth can go on forever in a finite world is either a madman or an economist". U.S. Congress, *Energy Reorganization Act of 1973: Hearings, Ninety-third Congress, First Session, on H.R. 11510* (U.S. Government Printing Office, 1973), p. 248.

¹⁹ On parle alors d'effet rebond, concept forgé par W.S. Jevons (1871). Les progrès de l'efficacité énergétique réduisent, en effet, le prix de l'énergie et peuvent, sous certaines conditions, encourager son utilisation.

production économique²⁰. Une position proche consiste à revendiquer l'*a-croissance* ou la *post-croissance*, c'est-à-dire de ne plus faire de la croissance économique l'horizon des politiques économiques. L'objectif est alors le développement (écologiquement mais aussi socialement) soutenable apprécié à partir d'indicateurs alternatifs au PIB (Gadrey et Jany-Catrice, 2016) mais sans préjuger de l'effet de telles politiques sur le taux de croissance économique²¹.

Minoritaire au sein du champ des économistes, la décroissance semble gagner du terrain. Par exemple, le dernier rapport du GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022) mentionne pour la première fois le terme « décroissance » : d'abord, en tant qu'école qui doute sérieusement du découplage (chapitre 1, p.174-175), et deux autres fois en tant que perspective de développement alternative et comme stratégie permettant d'atteindre la soutenabilité (chapitre 18, p.2718).

Une première manière de départager ces deux thèses consiste à étudier les tendances passées. Pour l'heure, la trajectoire mondiale ne correspond pas à la croissance verte. En effet, au niveau mondial, le découplage entre l'énergie et le PIB n'est que relatif, ce qui est insuffisant²². L'UNEP le reconnaît en ces termes : « recent trends indicate a moderate tendency of relative decoupling over time [but] the central challenge is to decouple growth absolutely from material and energy intensity » (UNEP 2011, p. 15). Au niveau national, toutefois, certains pays réalisent un découplage absolu, laissant ouverte la question de la généralisation de leur trajectoire. La France fait partie de ce groupe de pays avec une réduction de sa consommation d'énergie finale de 15% entre 2005 et 2020, alors que le PIB réel augmentait de 20,5%²³. Ces bons résultats sont toutefois à relativiser dans la mesure où ils ignorent les économies d'énergie obtenues par les effets de spécialisation liés au commerce international²⁴. Le passage à une approche consommation, appelée aussi *empreinte*

²⁰ Notons que le courant de la décroissance ne vise pas seulement – voire pas principalement – la baisse du PIB. La décroissance renvoie à un projet de société plus sophistiqué où la baisse de l'empreinte matérielle est planifiée démocratiquement et prend en compte les problématiques de justice sociale.

²¹ Cette position est qualifiée d'intermédiaire car, si elle ne recherche pas la croissance, elle peut toutefois se retrouver à la favoriser. Voir par exemple sur ce point Gadrey (2011).

²² Sur la période 1995-2011, le PIB mondial a crû 1,41 fois plus vite que la consommation d'énergie (Wood et al., 2018).

²³ Données Eurostat pour la consommation d'énergie finale et INSEE, base 2014, pour le PIB réel.

²⁴ On parle d'approche production quand seule la consommation énergétique réalisée sur le territoire est comptabilisée.

énergétique, où le contenu en énergie de la balance commerciale²⁵ est pris en compte, peut alors être pertinent pour s'assurer que le découplage des uns ne s'effectue pas au prix du couplage des autres (figure 6).

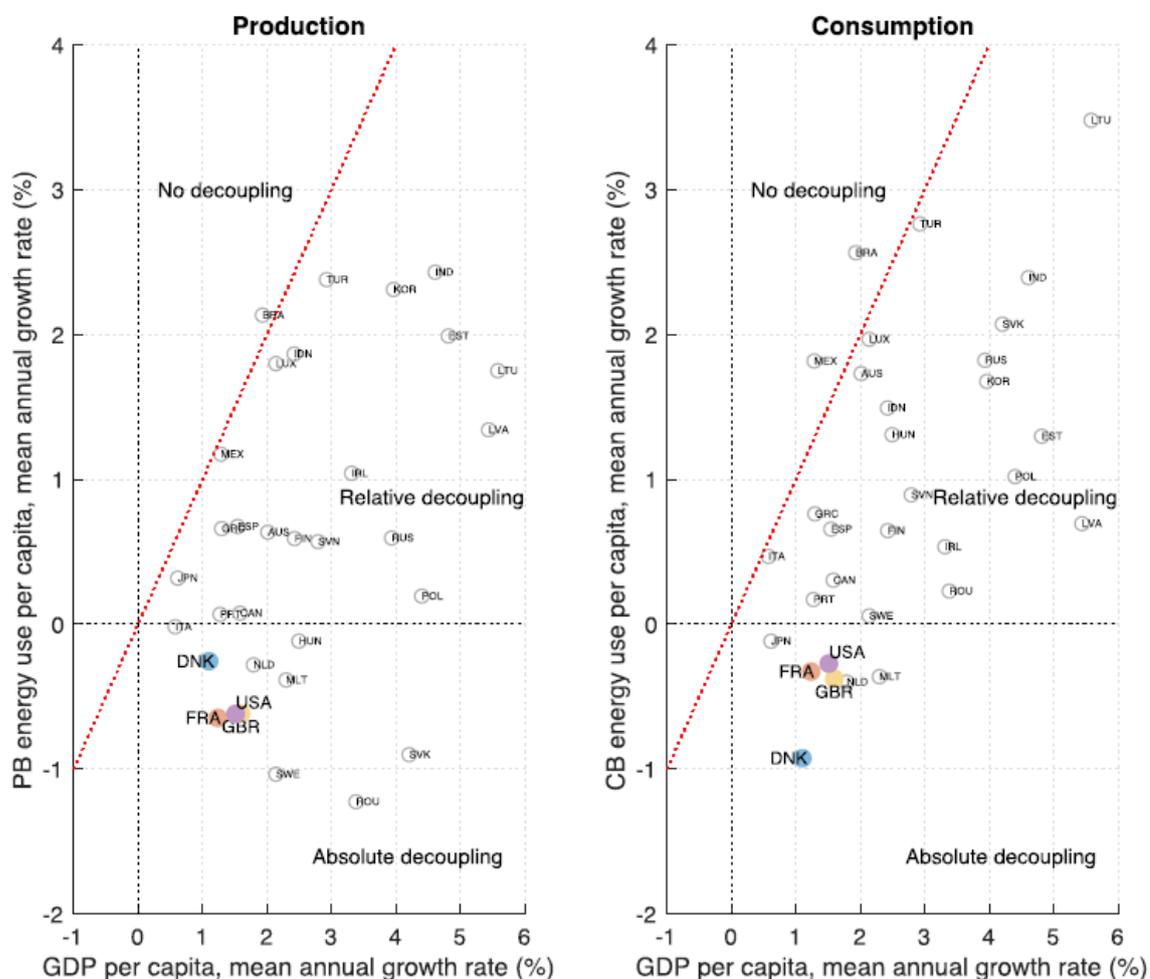


Figure 6. **Comparaisons du découplage énergie par tête - PIB/par tête en approche production et consommation pour la période 1995-2011.**

Source : Kulionis et Wood, (2020, p.2)

Sur la période 1995-2011, pour les 32 pays couverts par la base WIOD 2013, 11 pays réalisent un découplage absolu en approche production, mais ils ne sont plus que 7 lorsque l'on passe en approche consommation (Kulionis et Wood, 2020). De plus, le rythme et l'intensité de ce découplage absolu sont à prendre en compte. Pour le Danemark, par exemple, au cours de la période considérée, la croissance du PIB par tête a été d'environ 1% par an et s'est accompagnée d'une réduction de la consommation d'énergie par tête de 1%

²⁵ Dans cette approche, présentée au chapitre 1, l'énergie incorporée dans les importations est ajoutée tandis que l'énergie incorporée dans les exportations est déduite.

par an. Une simple prolongation des tendances montre que, à ce rythme, il faudrait 75 ans pour atteindre le facteur 4, un horizon beaucoup trop lointain, compte tenu de l'urgence climatique.

En résumé, si le découplage absolu est observé pour un nombre relativement faible de pays, de surcroît en approche consommation, le rythme auquel ce découplage prend place est notoirement insuffisant. « The goal of decoupling rests partly on faith », concluent Vadén et al. (2020), auteurs d'une revue de littérature analysant 179 articles sur le découplage PIB-CO2 parus entre 1990 et 2019. Ces résultats amènent à considérer le volume de la production économique comme une variable importante pour atteindre les objectifs climatiques. Comme l'expliquent Hubacek et al. (2021), auteurs d'une étude portant sur la relation PIB-CO2 dans 116 pays entre 2015 et 2018, « the evidence seems to be mounting that even widespread and rapid absolute decoupling alone might not suffice to achieve these goals without some form of economic degrowth » (p.7).

Penser la place de l'énergie dans le processus de croissance

Malgré ces sérieuses réserves, le découplage absolu continue d'être promu et défendu par de nombreux acteurs et institutions. Comment expliquer ce paradoxe ? Une première réponse consiste à évoquer l'inertie du « business as usual ». Malgré les éléments scientifiques avancés, les acteurs économiques ne peuvent souscrire à une politique qui réduirait les débouchés, imposerait une diminution de la production et, in fine, leur rentabilité. De la même manière que l'industrie du tabac, incriminée quant au caractère cancérigène de ses produits, préféra entretenir le doute et financer des recherches sur les autres causes du cancer pour pouvoir continuer à opérer (Oreskes et Conway, 2016), le récit autour du découplage absolu viserait à promouvoir une solution, le progrès technologique, beaucoup plus compatible avec la protection des intérêts économiques constitués. Pour ne prendre qu'un exemple, les compagnies aériennes préfèrent promettre l'avion zéro carbone, même si scientifiquement les temps de développements risquent d'être insuffisants, que de voir leur activité interdite et leurs actifs dévalorisés²⁶.

²⁶ Un des enjeux d'une transition rapide est précisément cette question des actifs dits « échoués » (Löffler et al., 2019)

Une autre explication possible, qui a guidé notre travail, est que le type de preuve apporté à l'appui de la thèse des décroissants n'est pas tout à fait suffisant pour venir clore le débat. En effet, il sera toujours possible, pour les cornucopiens, d'évoquer une rupture technologique ou un volontarisme politique à venir qui, « pour l'instant », ferait défaut. Dit autrement, ce n'est pas parce que le découplage absolu n'est pas significatif aujourd'hui qu'il ne peut pas l'être demain.

Si l'on prend cette hypothèse au sérieux, il faut se tourner vers d'autres méthodes d'analyse et de mise en débat des dynamiques physico-économiques en cours. La modélisation est l'une d'elles. Elle n'est pas antinomique aux analyses descriptives présentées précédemment. Cependant, cette démarche suppose d'examiner les mécanismes à l'œuvre derrière ces données, en l'occurrence les liens entre énergie et croissance. Aussi la démarche modélisatrice conduit-elle à aborder les théories de la croissance car ces dernières précisent le type de relation existante entre les différentes variables (travail, capital, investissement, énergie...). C'est pourquoi, plus une théorie de la croissance considère l'énergie comme un élément structurant, moins le découplage absolu est susceptible de se manifester à l'avenir. Pour ne prendre qu'un exemple, d'après Jean-Marc Jancovici (2012), vulgarisateur très médiatisé sur les questions d'énergie, la production matérielle, mesurée par le PIB, dépendrait en première approximation du parc de machines installées, donc en dernière instance de la quantité d'énergie consommée²⁷. Dans le cadre de cette théorisation sommaire de la croissance, plus de croissance suppose plus de machines, donc plus d'énergie, le découplage absolu est alors une impossibilité logique. Une théorie de la croissance qui intègre correctement l'énergie est donc un enjeu important pour l'analyse économique, comme pour les décideurs politiques. En effet, la manière de théoriser le processus de croissance, la place qu'occupe l'énergie, orientent, dans une certaine mesure, les représentations collectives et participent à la croyance, ou non, dans la possibilité du découplage absolu.

Toujours, d'après Jean-Marc Jancovici, les économistes n'auraient pas intégré l'énergie de manière satisfaisante à leurs modèles. Ignorant la physique, en particulier sa branche énergétique, la thermodynamique, ils continueraient de se représenter le processus de

²⁷ Par exemple, Jancovici explique que « [l]e lien énergie-économie signifie une croissance nulle pour les cinq ans à venir en France et en Europe. (...) [La baisse de l'approvisionnement en pétrole et en gaz] va se traduire par, au mieux, une stagnation du PIB mais, plus probablement, une évolution négative du PIB européen (et français) dans les cinq ans qui viennent. » (2012, p.90).

croissance comme une combinaison de capital et de travail, sans véritable considération pour les ressources naturelles. Ce constat fait par un intervenant extérieur au champ de l'économie est erroné. Les économistes n'ignorent pas les ressources naturelles. Ricardo (1821) ou encore Jevons (1865) considèrent les ressources naturelles comme un élément structurant de la dynamique macroéconomique. Cependant, à partir des années 1930, les ressources naturelles disparaissent de l'analyse macroéconomique et deviennent un sujet d'étude microéconomique (Missemer, 2017), les travaux de Hotelling (1931) en sont l'exemple le plus connu. Il faut attendre la publication du rapport Meadows (1972) pour que les théoriciens de la croissance se réintéressent aux ressources naturelles et les intègrent à leur cadre d'analyse (Solow, 1974 ; Stiglitz, 1974). Les ressources naturelles sont donc bien présentes depuis 1974. La question est plutôt de savoir si cette intégration s'est faite de manière satisfaisante. Si l'on en croit les travaux scientifiques de la théorie néo-thermodynamique²⁸ (Ayres et Warr, 2009), branche de l'économie écologique intéressée par les questions de croissance, le cadre standard continue d'ignorer les lois de la physique dans ses raisonnements. Par exemple, la substituabilité illimitée entre le capital naturel et le capital technique est irrecevable car elle conduit à introduire, dans les hypothèses, la possibilité d'une production totalement immatérielle.

Dès lors, comment intégrer l'énergie à l'analyse du processus de croissance ? Est-il possible d'importer les conclusions de la thermodynamique à la théorie néoclassique ? Ou bien faut-il se tourner vers d'autres paradigmes économiques ? Telles sont les questions que nous aborderons dans notre thèse.

Plan de la thèse

Pour répondre à cette problématique, nous procéderons en quatre temps.

Notre **premier chapitre** a pour objectif de montrer en quoi les analyses descriptives ne sont pas suffisantes de sorte qu'une étude des théories de la croissance est nécessaire. Plusieurs démarches d'analyse descriptive, abondamment mobilisées dans la littérature sur le découplage, sont ainsi examinées : 1) l'analyse de séries statistiques, ici de consommation

²⁸ Ces travaux font l'objet du chapitre 2, section 2.2.

d'énergie et de PIB réel, 2) l'analyse de l'existence d'une courbe énergétique de Kuznets²⁹ et 3) l'analyse de décomposition d'index, laquelle consiste, dans notre cas, à estimer la contribution de différents facteurs (efficacité énergétique, progression du volume de production...) à la consommation d'énergie. Dans un premier temps, nous effectuons une analyse critique des résultats de ces différentes littératures en insistant sur les difficultés méthodologiques propre à chacune de ces démarches. La construction des séries statistiques, par exemple, suppose de nombreuses conventions qui, pour certaines (celles relatives au PIB réel), sont peu discutées par la littérature sur le découplage. De même les résultats des décompositions d'index sont sensibles au type de décomposition retenu. A partir de ces précautions méthodologiques, un premier regard quant à la possibilité du découplage est posé. Dans un second temps, nous montrons à partir de la littérature sur les effets rebonds macroéconomiques qu'une faiblesse fondamentale de ces démarches est l'absence de prise en compte des mécanismes à l'œuvre derrière les tendances observées. C'est sur cette base que l'étude du rôle de l'énergie dans les théories de la croissance est justifiée. Conformément à ce résultat, les chapitres 2 et 3 sont consacrés à la manière dont les différents paradigmes intègrent l'énergie à leur théorisation du processus de croissance.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la théorie néoclassique. Il a pour objectif d'examiner la capacité de ce cadre à intégrer les ressources énergétiques à l'analyse de la croissance. Plus particulièrement, nous cherchons à évaluer si l'usage de fonctions de production agrégée, augmentées d'un input énergie, est une démarche pertinente pour appréhender le rôle de cette dernière dans la croissance. D'abord exclues du cadre fondateur proposé par Solow (1956), les ressources naturelles y ont progressivement été ajoutées. Néanmoins, aux yeux de l'économie écologique, cette intégration est toujours jugée imparfaite car inconsistante avec les conclusions de la thermodynamique, la physique de l'énergie. Là où une partie des critiques, comme Georgescu-Roegen (1976), rejette le cadre néoclassique pour se tourner vers d'autres paradigmes (la bioéconomie), une autre partie du

²⁹ Cette courbe décrit une relation en U inversée entre la consommation d'énergie (en ordonnées) et le PIB réel (en abscisse). La courbe énergétique est la déclinaison de la plus connue courbe environnementale de Kuznets au cas de l'énergie (cf. 2.1 du chapitre 1).

champ de l'économie écologique, la théorie néo-thermodynamique, s'est engagée dans une critique interne³⁰, estimant qu'une synthèse avec la thermodynamique était possible.

Ainsi, ce chapitre dresse un bilan critique de cette entreprise. Tout d'abord, nous présentons les différents aménagements proposés par ce courant au sein des fonctions de production agrégée. Dans un second temps, nous mobilisons la critique postkeynésienne des fonctions de production. L'originalité du chapitre est en effet de montrer que la tentative d'intégration de l'énergie repose avec acuité des débats plus anciens (la controverse des deux Cambridge) quant à la pertinence des agrégats utilisés au sein des fonctions de production. Ces critiques postkeynésiennes ne servent pas seulement à disqualifier le cadre néoclassique. Elles font apparaître un problème transversal à laquelle toute théorisation de la relation énergie-PIB est confrontée : le besoin de distinguer et, en même temps d'articuler, la dimension physique de la production de sa dimension monétaire. De ce point de vue, l'examen de cette synthèse néo-thermodynamique n'est pas concluant, raison pour laquelle des paradigmes alternatifs sont considérés au chapitre 3.

Fort de ce constat, le **troisième chapitre** examine les propositions néophysocratiques et classiques. Bien que leurs analyses soient différentes, ces deux écoles peuvent être regroupées sous la dénomination d'*approche par le surplus*. En effet, l'une comme l'autre se représentent le système économique comme une organisation devant assurer sa reproduction d'une période à l'autre, l'excès éventuel de production relativement à la consommation productive³¹ étant considéré comme un *surplus économique*. L'objectif de ce chapitre est de voir si ces deux cadres théoriques peuvent servir de fondement à un modèle de croissance qui articule rigoureusement les dimensions physiques et monétaires de la production. Dans ces deux théories, cette articulation est opérée par la théorie de la valeur : les difficultés à produire dans le monde physique (plus de travail, plus d'énergie) ont des répercussions dans le monde monétaire (la valeur des biens et services concernés augmente). Aussi, ce chapitre examine les raisons qui conduisent les néophysocrates et les classiques à faire d'une quantité physique, la source de la valeur : travail incorporé dans le cas des

³⁰ Certaines hypothèses sont remises en cause comme le théorème du cost-share pour mesurer la contribution d'un facteur mais ces auteurs acceptent l'usage des fonctions de production agrégée.

³¹La consommation productive admet plusieurs frontières : à minima on trouve les consommations intermédiaires et la consommation de capital fixe. Chez les classiques, les salaires font partie de cette consommation nécessaire, le surplus s'apparente alors au profit. Chez Piero Sraffa (1960) ce n'est pas le cas : les salariés reçoivent une partie du surplus.

classiques et Marx, énergie incorporée dans le cas des néophysocrates. La robustesse de ces théories est appréciée à partir de plusieurs critères : leur validité empirique, leur capacité à répondre aux critiques du substantialisme et leur consistance avec la thermodynamique. Dans le premier cas, nous menons une évaluation des travaux empiriques qui testent les canaux mis en évidence par ces théories. Cela porte par exemple sur la relation entre le EROI³² et le prix de l'énergie ou encore la relation entre les prix relatifs et le travail incorporé. Dans le second cas, la question théorique posée est de savoir si, en identifiant une source physique de la valeur (le travail ou l'énergie), ces théories conduisent à nier le rôle des échanges marchands dans la formation des prix. Sur ce point, les thèses développées notamment au sein de l'hétérodoxie française par André Orléan (2011) sont confrontées à certaines interprétations de la théorie de la valeur de Marx comme celles de Isaak Roubine (1928). Enfin, les deux modèles de croissance néophysocratiques et marxistes identifiés sont comparés et évalués quant à leur fidélité à intégrer les contraintes naturelles, en particulier celles mises en évidence par la thermodynamique.

Sur la base de ces résultats, **le quatrième chapitre** propose une évaluation empirique des canaux identifiés par le modèle de croissance marxiste. Ce canal, appelé canal du taux de profit, relie le prix relatif de l'énergie au taux d'accumulation. L'hypothèse sous-jacente est que le prix relatif de l'énergie affecte le taux de profit par le biais de la composition organique du capital. Par ce biais, l'énergie est un facteur limitant pour la croissance. Pour tester cette hypothèse, nous menons dans un premier temps un travail économétrique sur un panel de 16 pays de l'OCDE. Différents modèles statistiques sont utilisés pour évaluer si, conformément à l'hypothèse retenue, le prix relatif de l'énergie affecte négativement et de manière significative le taux de profit sur la période 1995-2019. Dans un second temps, les travaux postkeynésiens sont mobilisés pour préciser la relation entre le taux de profit et le taux d'accumulation. En effet, dans ce cadre d'analyse, l'effet du prix de l'énergie sur la croissance dépend de l'impact du taux de profit sur le taux d'accumulation. Cette relation est examinée à l'aune d'un fait stylisé du capitalisme contemporain : la divergence entre profit et investissement.

³² Le EROI (Energy Return On Investment) ou taux de retour énergétique en français désigne la quantité d'énergie incorporée à la production du secteur énergétique. Ce concept est présenté au chapitre 3, section 1.2.

CHAPITRE 1.
APPREHENDER LE DECOUPLAGE : UNE REFLEXION
METHODOLOGIQUE

PLAN DU CHAPITRE 1

INTRODUCTION DU CHAPITRE 1	37
1. MESURER LE DECOUPLAGE ABSOLU : ENJEUX RELATIFS A LA CONSTRUCTION DES SERIES DE CONSOMMATION D'ENERGIE ET DE PIB REEL	38
1.1. L'EXISTENCE DU DECOUPLAGE ABSOLU	38
1.2. LA CONSTRUCTION DES SERIES DE CONSOMMATION D'ENERGIE : LE CHOIX D'UN REGIME DE RESPONSABILITE	41
1.3. LA CONSTRUCTION DES SERIES DE PIB REEL : DEFINITION DES FRONTIERES DE LA PRODUCTION ET CALCUL D'UN DEFLATEUR.....	50
1.3.1.Définir les frontières de la production	51
1.3.2.Passer du PIB nominal au PIB réel : le choix d'un déflateur	63
CONCLUSION DE LA PREMIERE SECTION	69
2. EXPLIQUER LES DETERMINANTS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PASSEE : DE LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS A L'ANALYSE DE DECOMPOSITION D'INDEX. 70	
2.1. LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS : CADRE THEORIQUE ET RESULTATS POUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE	71
2.1.1. Les travaux fondateurs : démarche, résultats et théorisation	71
2.1.2. Applications au cas de la consommation d'énergie : the Energy-Environmental Kuznets Curve (EEKC)	75
2.2. LE REGARD PORTE PAR L'INDEX DECOMPOSITION ANALYSIS SUR LA DYNAMIQUE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE	83
2.2.1. L'analyse de décomposition d'index : démarche et usage pour expliquer le découplage absolu.....	83
2.2.2. La nécessité de décompositions plus fines.....	86
2.2.3. Les limites d'une méthode statique : l'exemple de l'effet rebond	101
CONCLUSION DU CHAPITRE 1 : LA NECESSITE D'ETUDIER LA PLACE DE L'ENERGIE DANS LES THEORIES DE LA CROISSANCE.....	114

Introduction du chapitre 1

Pour les défenseurs de la croissance verte, le découplage absolu est une nécessité : l'augmentation du PIB doit pouvoir s'accompagner d'une diminution des pressions environnementales, notamment de la consommation d'énergie. Cette revendication est-elle réaliste ou bien est-elle un vœu pieux ? Surtout, comment apprécier la possibilité du découplage entre le PIB réel et la consommation d'énergie ?

L'objectif de ce chapitre est de dresser un bilan critique des méthodes les plus utilisées dans la littérature pour apprécier l'existence du découplage absolu. Trois d'entre elles, sur lesquelles nous focaliserons notre propos, sont 1) l'analyse descriptive des séries statistiques de consommation d'énergie et de PIB, 2) l'identification économétrique d'une courbe de Kuznets et 3) l'analyse de décomposition d'index, d'autre part. Ces méthodes peuvent être perçues comme complémentaires. Les deux premières constatent l'existence ou non du découplage, la troisième vise à expliquer ces évolutions, en décomposant l'évolution de la consommation d'énergie en différents facteurs (effet technologique, effet structurel, effet volume). A partir d'une analyse de la littérature, ce chapitre présente les enjeux et difficultés méthodologiques rencontrés et la manière dont ces dernières affectent les conclusions sur le découplage.

La première section du chapitre est consacrée à l'analyse descriptive des séries statistiques de PIB et de consommation d'énergie. Dans cette optique, les enjeux méthodologiques résident dans la construction des séries utilisées. Selon la consommation d'énergie dont le pays est considéré responsable, selon également la mesure du PIB retenu, les résultats peuvent être différents. Nous identifions dans la littérature les différentes conventions susceptibles d'affecter la mesure du découplage pour un pays.

La seconde section porte sur l'analyse des déterminants de la consommation d'énergie. Les théoriciens de la courbe environnementale de Kuznets (CEK par la suite) ont à partir du milieu des années 1990 structuré ce débat dans la mesure où ils ont identifié deux facteurs censés conduire au découplage : l'effet technologique et l'effet structurel. Estimer la contribution de ces deux facteurs est donc important pour identifier si une trajectoire de croissance verte est à l'œuvre. Dans un premier temps de l'analyse, nous présentons la littérature des travaux de la CEK portant spécifiquement sur la consommation d'énergie. Ce

préalable permet de comprendre les raisons pour lesquelles les analyses de décompositions se sont progressivement imposées et à quelle question initiale elles répondent. Dans un second temps, les enjeux méthodologiques des décompositions d'index sont abordés. Ici, nous verrons tout d'abord que les enjeux méthodologiques résident dans le type de décomposition choisi : selon le nombre et la qualité des agrégats retenus, l'interprétation quant à la contribution d'un facteur peut être très différente. Plus fondamentalement et pour finir, le caractère explicatif de cette méthode sera discuté à l'aune de la littérature portant sur l'effet rebond.

1. Mesurer le découplage absolu : enjeux relatifs à la construction des séries de consommation d'énergie et de PIB réel

Apprécier le découplage absolu suppose d'examiner des séries de consommation d'énergie et de PIB réel. Le découplage absolu s'observe avant tout en approche production (énergie consommée sur le territoire) pour certains pays mais pas au niveau mondial (1.1.). L'appréciation du découplage est ainsi sensible au niveau d'analyse retenu (national, mondial) mais également au type d'approches considéré pour construire les séries (approches production, consommation, revenu). Pour présenter ces enjeux méthodologiques, et parce qu'ils diffèrent d'un agrégat à l'autre, nous avons choisi de traiter séparément ceux relatifs aux séries de consommation d'énergie de ceux relatifs aux séries de PIB réel. Ainsi, la section 1.2. traite des séries de consommation d'énergie. Elle montre que toute série en la matière suppose de définir un régime de responsabilité qui attribue plus ou moins d'énergie consommée à un pays. Dans la section 1.3., nous présentons les enjeux relatifs aux séries de PIB réel.

1.1. L'existence du découplage absolu

La première manière de mesurer le découplage absolu consiste à passer par les données de la statistique nationale. L'Etat national est un échelon privilégié dans la production des données facilement accessibles au chercheur. C'est également dans l'espace national qu'une part importante des politiques économiques sont menées. Ainsi, il est fréquent de

comparer les séries de PIB réel national et celles de consommation d'énergie domestique. Cette méthode est d'ailleurs celle retenue par l'ONU en matière d'imputation des émissions de gaz à effet de serre à chacun des pays (Steininger et al., 2016). On parle d'approche production au sens où seule la consommation énergétique des agents économiques résidents est prise en compte.

Si l'on retient cette définition de la consommation d'énergie, une première comparaison dans le temps et l'espace (figure 7) indique que certains pays réalisent un découplage absolu, une trajectoire associée à la croissance verte. Ici, les auteurs (Wu, Zhu et Zhu, 2018) utilisent un index de découplage. Le découplage est absolu lorsque l'index est supérieur à 1, c'est le cas par exemple de certains pays développés comme la France, le Royaume-Uni ou les Etats-Unis entre 2006 et 2015 mais également, pour ces derniers, entre 1976 et 1985 (Wu, Zhu et Zhu, 2018).

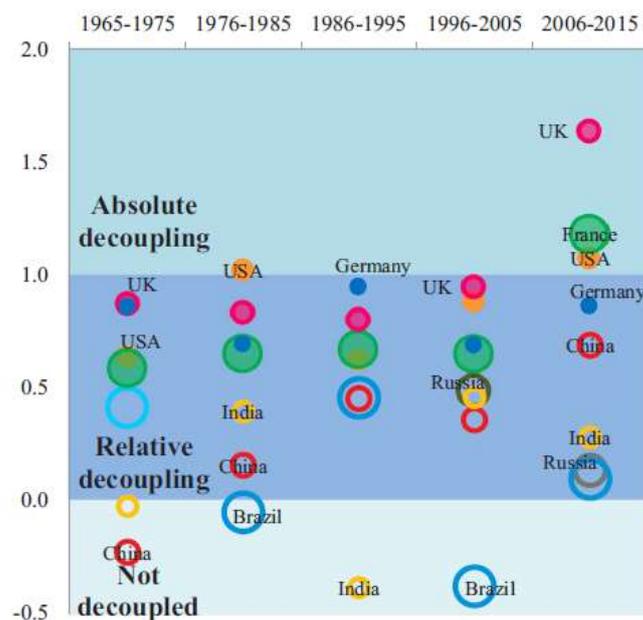


Figure 7. **Index du découplage entre le PIB et la consommation d'énergie domestique (1965-2015)**

Source : (Wu, Zhu, et Zhu, 2018, p.34).

Si l'on passe de l'échelon national à l'échelon mondial, le découplage absolu disparaît. Comme l'expliquent Csereklyei et al. dans leur revue de littérature consacrée aux faits stylisés entre la croissance et l'énergie : « It is true that there does seem to be “decoupling” in some

developed countries, but it has occurred in an insufficient number of countries to change the overall pattern” (Csereklyei, Rubio-Varas, et Stern, 2016, p.249). Les données compilées indiquent en effet que, sur la période 1995-2011, la consommation mondiale d’énergie a progressé plus lentement que la croissance du PIB mondial (+0,87% en moyenne pour 1% de croissance). Le découplage est ici relatif (tableau 2). Le résultat est encore plus défavorable lorsque l’on prend comme série le PIB par habitant. Dans ce cas, on assiste à un phénomène de surcouplage, la consommation d’énergie progressant plus rapidement que le PIB par tête (+1,15% pour la première quand le PIB par tête progresse de 1%).

Au regard de ces éléments, la bonne performance des pays développés peut interroger : est-elle liée à une meilleure technologie et une réorientation de l’appareil productif ou bien masque-t-elle un biais lié à la spécialisation avantageuse au sein de la division internationale du travail ? Dit autrement, les bons résultats des uns auraient-ils pour contrepartie les mauvais résultats des autres ? La réponse à ces questions est cruciale. En effet, l’observation des résultats n’est pas seulement d’un intérêt pour le chercheur mais revêt un enjeu pour les efforts de réduction à fournir par les différents pays. Pour ne citer qu’un exemple, le 6 mars 2009, dans un discours à Washington, Li Gao, l’un des négociateurs chinois de premier plan pour le climat, considéra que les pays importateurs de biens chinois devaient prendre une part de responsabilité des émissions domestiques chinoises : “These products are consumed by other countries [...] This share of emissions should be taken by the consumers but not the producers.”³³ Cette remarque vaut également pour ce qui est de l’énergie. Prendre la consommation d’énergie domestique pour apprécier le découplage ne va donc pas de soi. D’autres approches sont à considérer et sont présentées en section 1.2.

³³ BBC News, 17/03/2009, “China seeks export carbon reliefs”: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7947438.stm>

	Unité	1995 (par tête)	2011 (par tête)	Croissance absolue (%)	Croissance rapportée au PIB/hab (%)	Croissance rapportée au PIB (%)
Emissions de GES	Tonnes de CO2 équivalent	5,5	6,3	1,42	1,16	0,88
Consommation d'énergie	Gigajoules	56	64,4	1,41	1,15	0,87
Consommation de matière	Tonnes	8,3	11,.	1,67	1,36	1,03

Tableau 2. **Croissance absolue, par tête et par PIB, des pressions environnementales (1995-2011).**

Source : Auteur à partir de Wood et al., (2018)

1.2. La construction des séries de consommation d'énergie : le choix d'un régime de responsabilité

L'approche production n'est pas la seule possible. Dans les négociations internationales, d'autres approches ont pu être mises en avant. En effet, selon le régime de *responsabilité environnementale* retenu, il est possible d'imputer à un pays des consommations d'énergie extraterritoriales. On appelle régime de responsabilité un principe de justice qui organise les obligations morales des acteurs envers la collectivité. On quitte alors le terrain proprement scientifique (celui de la neutralité axiologique) pour basculer sur celui des théories de la justice, plus spécifiquement de *la justice distributive*. A la différence de la justice compensatrice, laquelle vise à dédommager un membre qui serait lésé (principe que l'on retrouve à la base du concept d'externalité), la justice distributive vise à ce qu'il y ait une répartition équitable des bénéfices et des efforts. L'enjeu dans les négociations internationales est bien entendu de déterminer les efforts en matière de réduction de la consommation d'énergie et en particulier celle d'origine fossile dans le but de réduire les émissions de CO2.

Selon le régime retenu, la responsabilité et, par conséquent, l'effort à fournir par différent pays peuvent significativement varier. Par exemple, l'approche production favorise les pays

développés. Dans leur insertion dans la division du travail, ils concentrent en effet sur leur territoire les activités les moins intensives en énergie des chaînes de valeur mais importent des biens plus intensifs en énergie produits ailleurs. Du point de vue de la consommation, on peut ainsi considérer qu'ils délocalisent une partie de leur pollution à l'étranger.

En plus de l'approche production actuellement en vigueur, on peut ainsi distinguer trois autres régimes de responsabilité (Steininger et al., 2016) : l'approche consommation, l'approche par le revenu et l'approche par la valeur ajoutée. Pour saisir les nuances entre les différents régimes de responsabilité, la représentation graphique (figure 8 ci-dessous) peut être utile. Le point jaune représente le producteur en approche production. En vert, les flèches remontent vers le consommateur final, tandis qu'en violet les flèches descendent vers le producteur de matières premières.

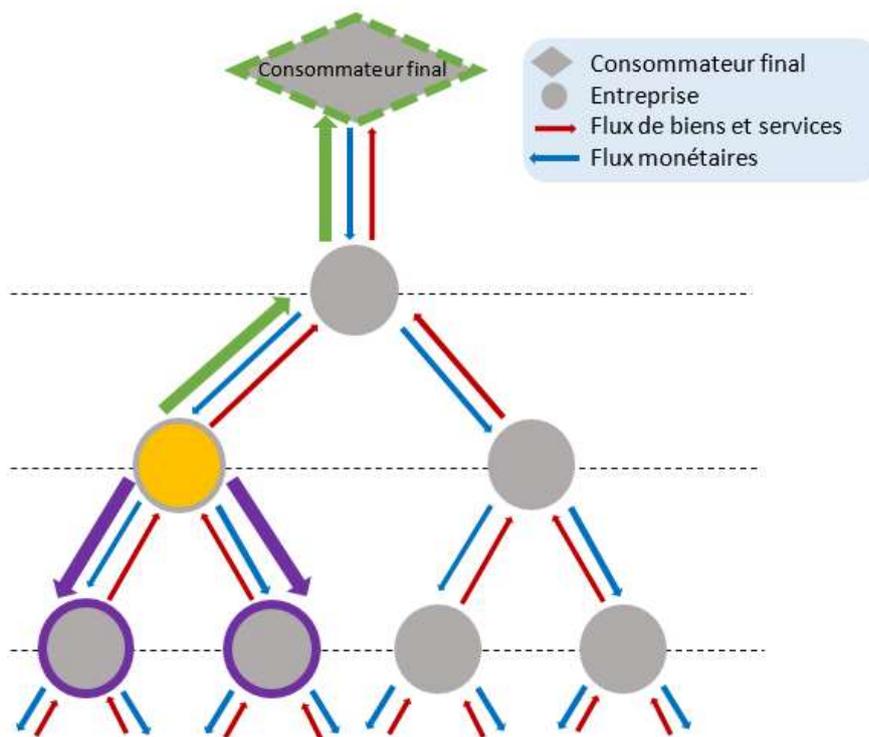


Figure 8. **Les trois régimes de responsabilité : production (jaune), consommation (vert) et revenu (violet).**
Source : auteur.

L'approche consommation

L'approche consommation est l'alternative la plus mobilisée par la littérature. Elle considère que l'énergie consommée doit être attribuée à l'agent économique ayant profité

du bien ou service final. Dans cette perspective, les biens importés viennent augmenter la consommation d'énergie du pays considéré tandis que les biens exportés viennent la réduire. Dit autrement, l'énergie incorporée au commerce est intégrée à l'analyse et attribuée au pays qui achète ces biens et services. On parle également d'empreinte énergétique. La figure 6 (évoquée en introduction) présente les résultats d'une méta-analyse récente qui compile les données en approche consommation et les compare à ceux obtenus en approche production (Kulionis et Wood, 2020).

Tandis que pour certains pays comme l'Italie, la Hongrie, la Slovaquie ou la Suède, le découplage absolu entre PIB par tête et énergie finale disparaît en approche consommation, pour d'autres pays, comme la France, le Royaume-Uni et les Etats-Unis, le découplage absolu, même s'il est atténué, se maintient. Une première interprétation est alors possible : les bons résultats de ce deuxième groupe de pays ne seraient donc pas seulement dus aux gains permis par le commerce international mais bien à de réels efforts de réduction des émissions de GES de ces pays.

Plus surprenant encore, pour le Danemark ou le Japon, le découplage en approche consommation est plus fort que celui observé en approche production. Cela suggère que ces pays tendent à avoir un solde en énergie incorporée de leur balance commerciale excédentaire, un fait assez rare pour un pays développé. Pour ces pays, là encore, a priori, le découplage proviendrait bien d'efforts nationaux pour réduire la consommation d'énergie et non d'une modification de leur insertion dans le commerce international. En définitive, sur la période 1995-2011, 11 pays sur 32 réalisent un découplage absolu en approche production, mais ils ne sont plus que 7 lorsque l'on passe en approche consommation.

L'analyse du découplage CO2 PIB conduit à des résultats similaires. Compilant la trajectoire de 116 pays entre 2015 et 2018, Hubacek et al. (2021) notent que 32 pays réalisent un découplage absolu en approche production, 23 en approche consommation, et 14 en approche production et consommation. Les auteurs notent également que le découplage peut être temporaire, certains pays connaissant à certaines périodes un regain de leurs émissions.

L'approche par le revenu

L'approche consommation attribue l'ensemble de la consommation d'énergie à l'utilisateur final du bien ou service. A ce titre on peut parler de responsabilité de l'aval (*upstream responsibility*) (Piñero et al., 2008). Symétriquement, il est possible d'envisager une responsabilité de l'amont (*downstream responsibility*) où l'agent économique responsable est celui qui a permis cette consommation d'énergie en la mettant à disposition de l'économie (flèches violettes du figure 8). Cet agent, producteur d'énergie, mobilise des facteurs de production et perçoit un revenu de cette activité. Parce qu'il est le premier de la chaîne à profiter de la consommation d'énergie, il peut être tenu responsable de sa mise en circulation. Les efforts de réduction doivent donc aussi concerner ces acteurs qui s'enrichissent.

Sans surprise, ce sont les pays producteurs d'énergie finale qui sont désavantagés par cette méthode. Les pays de l'OPEP, dont une part importante du PIB provient de la vente d'hydrocarbures, auront une consommation d'énergie imputée qui sera bien supérieure à l'approche production. En Europe, la Norvège, producteur pétrolier, est responsable d'une quantité émise de CO₂ bien plus importante si l'on adopte l'approche revenu : plus du triple du volume en approche consommation (figure 9 ci-dessous). Dans une moindre mesure, l'Australie, important producteur de charbon, voit ses émissions imputées augmenter d'environ 13% selon cette approche. Compte tenu du lien fort entre émissions et énergie fossile, il est très probable que les résultats en matière de consommation d'énergie donnent des résultats similaires.

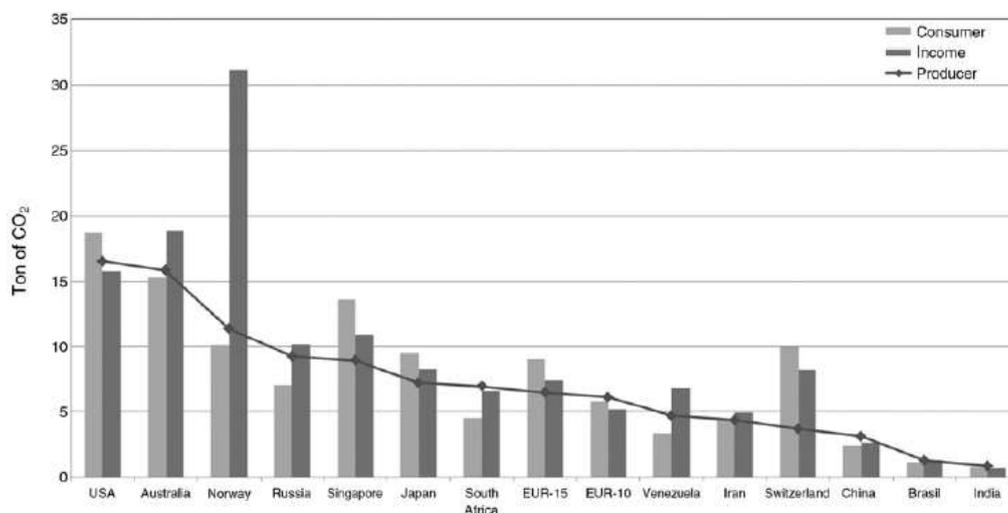


Figure 9. **Responsabilité des émissions CO₂ par tête en approches production, consommation et revenu (tonnes de CO₂ en 2014).**

Source : Marques et al. (2012, p.63)

Ces régimes de responsabilité ont pu être critiqués pour différentes insuffisances (Piñero et al., 2019). La première est la tendance à imputer l'intégralité de la responsabilité à un acteur économique, on parle d'ailleurs de *full responsibility approach* par opposition à d'autres approches plus équilibrées (*shared responsibility approach*). Il y aurait quelque chose de trop massif, de pas assez nuancé dans ces approches avec pour corollaire un défaut dans la gouvernance des ressources ou des pollutions que l'on tente de gérer. Par exemple, parce qu'elle considère comme unique responsable l'acheteur final, l'approche consommation n'incite pas les pays exportateurs net en énergie à faire des efforts pour produire de manière moins intensive.

La seconde tient à la nature des responsables désignés par ces différents régimes et des signifiants politiques qu'ils charrient. D'après Andreas Malm (2016), l'approche consommation conduit à se débarrasser du moment de la production pour se focaliser sur l'acte de consommation. La conclusion politique simple est que ceux qui consomment doivent assumer la responsabilité de cette énergie consommée ailleurs. Ainsi pour le géographe suédois, l'approche consommation véhicule « l'image d'un consommateur occidental souverain qui enverrait des paquets de CO₂ dans d'autres parties du monde, probablement lorsque celui-ci fait ses courses et choisit les produits chinois moins chers plutôt que les

produits domestiques plus chers ». Corolairement, cette approche présente le défaut de traiter « les propriétaires des moyens de production [comme] neutres, passifs, hors champ » (Malm, 2016, p.333). Elle invisibilise le rôle des firmes dans la localisation des activités productives alors que « les travailleurs américains ou européens n’ont jamais pris la décision de délocaliser l’industrie. En fait s’il y a bien quelqu’un à avoir résisté à de tels mouvements, c’est eux » (Ibid., p.333). Pour Malm, fervent défenseur du concept de capitalocène (2021), le chercheur doit prendre acte de ces différences de pouvoir et remettre au cœur l’action des propriétaires des moyens de production pour analyser les problèmes écologiques.

Ces deux remarques conduisent à se pencher vers d’autres régimes de responsabilité à même de prendre en charge ces critiques.

L’approche par la valeur ajoutée

L’approche par la valeur ajoutée commence à être développée par certains chercheurs (Meng et al., 2018 ; Xu, Mu et Wang, 2017). Elle prend acte du fait que les activités productives sont de plus en plus insérées au sein de chaînes globales de valeurs où se développent des rapports de pouvoir asymétriques (donneurs d’ordre, sous-traitants...). Tous les acteurs ne sont donc pas également responsables dans la mesure où tous ne tirent pas le même bénéfice de la chaîne. Pour calculer la responsabilité de chacun, il faut repartir du résultat d’une approche consommation (empreinte environnementale) mais, au lieu de l’imputer aux consommateurs finaux, cette responsabilité est répartie au prorata de la valeur ajoutée captée par chacun des acteurs de la chaîne. Non seulement la production est remise au cœur de l’analyse, ce qui répond à la critique émise par Malm, mais également les rapports de pouvoir puisque l’imputation à hauteur de la valeur ajoutée générée tient compte de l’inégale répartition du pouvoir au sein des chaînes de valeur (Lenzen, 2007).

A notre connaissance, il n’existe pas d’estimations relatives à la consommation d’énergie selon cette approche, raison pour laquelle nous baserons notre démonstration sur des estimations portant sur le CO₂ émis. Si l’on fait l’hypothèse raisonnable³⁴ que la consommation d’énergie et les émissions de CO₂ suivent les mêmes tendances, alors il est

³⁴ Pour rappel, la consommation d’énergie est responsable des deux tiers des émissions de CO₂

possible de conclure qu'une approche de responsabilité partagée (selon la valeur ajoutée réalisée) tend à augmenter la consommation d'énergie attribuée aux pays comme la France. D'après les données compilées par Xu (2021) et reprises dans le tableau 3, en approche production, l'UE est responsable de 10,36% des émissions mondiales (6,11% si on prend les émissions par tête) mais 11,5% en régime de responsabilité partagée (6,75% par tête). Notons que ce résultat est légèrement inférieur à ce que nous donnent les approches consommation (respectivement 12,63% et 7,38%), ce qui confirme le caractère plus équilibré mentionné précédemment. Le changement de régime a-t-il un effet significatif sur la mesure du découplage ? Si l'on prend, par exemple, les émissions mondiales de CO₂ en 2019 (37Gt), la responsabilité de l'UE est de 3,8Gt en approche production, 4,2Gt en approche par la valeur ajoutée, une augmentation de 10,5%.

	Approche production				Approche consommation				Approche par la VA			
	Rang	Total (%)	Rang	Par tête (%)	Rang	Total (%)	Rang	Par tête (%)	Rang	Total (%)	Rang	Par tête (%)
RDM	2	17,67	-	-	2	19,47	-	-	2	18,57	-	-
Chine	1	30,28	7	6,45	1	26,13	8	5,51	1	28,20	8	5,98
UE	4	10,36	8	6,11	4	12,63	7	7,38	4	11,50	7	6,75
Etats-Unis	3	15,48	2	14,41	3	16,64	2	15,34	3	16,06	2	14,88
Russie	6	5,20	5	10,74	7	3,82	6	7,81	6	4,51	6	9,26
Japon	7	3,80	6	8,89	6		5	10,05	7	4,07	5	9,47
Inde	5	7,30	12	1,67	5		13	1,52	5	7,00	13	1,60
Corée du Sud	8	2,06	4	12,12	8		4	11,31	8	2,00	4	11,71

Tableau 3. Emissions de CO₂ selon les différents principes de responsabilité en 2014 : production, consommation et par la valeur ajoutée.

Source : (Xu, 2021). RDM : reste du monde

De la responsabilité réelle à la responsabilité financière

Pour finir, une dernière méthode est envisageable. Celle-ci se distingue toutefois de celles précédemment citées car elle propose une autre perspective analytique. Alors que jusqu'ici la responsabilité s'appréciait à partir de flux réels, c'est-à-dire à partir des transactions portant sur les marchandises échangées, il est possible de considérer la responsabilité financière des acteurs.

La responsabilité financière peut trouver des fondements dans l'analyse circuitiste et post-keynésienne. En effet, pour ces deux écoles, la monnaie et le système bancaire ne sont pas neutres (Graziani, 1989 ; Lavoie, 2020). Au niveau macro-économique, chaque cycle de production suppose au préalable une création monétaire par le système bancaire. Ce n'est qu'en fin de cycle, lorsque la valeur a pu être réalisée par les ventes, que la monnaie fait son retour et peut être détruite. Ainsi, de la même manière que les producteurs d'hydrocarbures rendaient possible la production d'énergie en la mettant à disposition, le système financier porte une responsabilité environnementale car il rend possible le financement de l'activité productive (*initial finance*) et les nuisances qui vont avec.

Également, dans une perspective plus évolutionniste, les structures financières participent de l'évolution des systèmes productifs car les agents financiers ont cette capacité à donner une direction aux innovations, en choisissant lesquelles, selon eux, sont dignes d'intérêt et lesquelles ne le sont pas (Mazzucato et Semieniuk, 2018). Les agents financiers portent donc une responsabilité dans la trajectoire socio-technique et l'empreinte écologique qui en découle.

Dans le champ militant, cette approche a connu un certain succès avec des campagnes dénonçant les banques finançant les énergies fossiles. A titre d'illustration, l'association altermondialiste Attac de même que l'association écologiste Extinction Rebellion ont mené plusieurs campagnes et actions de désobéissance civile ciblant les banques pour leur financement des énergies fossiles. Au sein du champ académique, toute une littérature empirique s'intéresse au verdissement des portefeuilles financiers (Boermans et Galema, 2019 ; Petherick, 2012)

Notons que cette approche reste compatible avec les quatre prémentionnées dans la mesure où elle suppose nécessairement d'être articulée à un régime de responsabilité réelle.

Par exemple, si une compagnie comme Carrefour est intégralement financée par BNP Paribas (à la fois par crédit et détention de titres), alors BNP sera responsable des émissions de CO₂ de Carrefour. Seulement, déterminer les émissions de Carrefour suppose au préalable de choisir une approche production/consommation/revenu/valeur ajoutée. En définitive, la responsabilité financière ne fait que réallouer la responsabilité des agents de l'économie réelle vers les agents financiers.

A notre connaissance, de tels travaux relatifs à l'énergie n'existent pas. On peut toutefois supposer que la responsabilité serait réallouée massivement vers les pays où les plus grandes banques résident. Au niveau mondial, parmi les 10 plus grosses banques en termes de capitalisation boursière, les quatre premières sont chinoises puis japonaises (Mitsubishi), britannique (HSBC), françaises (Crédit agricole et BNP) et américaines (Bank of American et JP Morgan). Compte tenu du poids de la France dans les financements mondiaux, l'utilisation d'un tel critère de responsabilité risque de faire apparaître une consommation d'énergie supérieure à celle observée en approche consommation.

Pour résumer, nous avons montré que l'appréciation du découplage suppose des choix moraux³⁵ importants lors de la construction des séries de consommation d'énergie. Plusieurs régimes de responsabilité coexistent et ont chacun leur logique et légitimité. Le tableau 4 résume les effets à attendre de ces régimes sur la consommation d'énergie, donc sur la mesure du découplage.

³⁵ Tout régime de responsabilité formule des critères sur la base desquels un Etat est jugé responsable d'une consommation de ressources. Ces critères appartiennent au domaine moral, celui de la théorie de la justice.

Régimes de responsabilité	Capacité à découpler
Production	Réduite pour les pays qui concentrent des activités intensives en énergie
Consommation	Réduite pour les pays spécialisés qui sont importateurs de biens intensifs en énergie
Revenu	Réduite pour les pays producteurs de ressources énergétiques
Valeur ajoutée	Réduite pour les pays qui dominent les chaînes de valeur
Financière	Réduite pour les pays détenant une créance nette sur l'extérieur

Tableau 4. **Effets des différents régimes de responsabilité sur le découplage PIB-énergie**
Source : auteur.

L'approche par la valeur ajoutée se démarque des autres car elle fait des entreprises (plutôt que les consommateurs) les acteurs majeurs du monde économique, le tout en prenant en compte l'inégale répartition du pouvoir entre elles au sein des chaînes de valeur. Ce régime réel de responsabilité pourrait être couplé au régime de responsabilité financière, dès lors que l'on considère que la finance n'est pas neutre. Un travail empirique ultérieur sera mené pour comparer la mesure du découplage énergie-PIB à partir de ces régimes d'attribution.

Le choix des séries de consommation d'énergie n'est pas le seul enjeu analytique. Bien que moins discutées par la littérature sur le découplage, les séries de PIB réel supposent elles aussi des choix qui méritent d'être examinés. C'est l'objet de notre section 1.3.

1.3. La construction des séries de PIB réel : définition des frontières de la production et calcul d'un déflateur

Les débats sur le découplage se focalisent sur les séries d'énergie utilisées. Même si la consommation d'énergie reste la variable principale (elle doit baisser pour qu'il y ait découplage absolu), les choix opérés dans la construction des séries de PIB réel sont eux aussi importants. Par exemple, si du fait d'une convention différente le PIB réel diminue au lieu d'augmenter, alors un pays qui connaît une baisse de sa consommation d'énergie n'est plus en situation de découplage absolu mais de découplage relatif.

Les séries de PIB réel reposent sur des présupposés théoriques et traduisent différentes manières de percevoir le monde social. En la matière, deux discussions doivent être distinguées : celle relative aux frontières du PIB nominal sera abordée dans la section 1.3.1. et celle relative au choix d'un déflateur dans la section 1.3.2. Dans le cas des frontières, les débats portent sur quelles activités doivent être considérées comme productives et par quelle convention statistique intégrer ces activités au calcul du PIB. Dans le cas du déflateur, l'enjeu est de définir une variation « pure » du niveau des prix afin de réaliser le passage de la production nominale à la production réelle.

1.3.1. Définir les frontières de la production

Le PIB nominal suppose d'agréger à partir d'une unité unique, la monnaie, les différentes activités économiques. Ce raisonnement suppose que les activités aient une valeur économique qui soit observable, mesurable, ce qui en pratique n'est pas toujours le cas : la valeur économique de certaines activités ne se laisse pas facilement appréhender. Pour commencer, rappelons qu'en comptabilité nationale, la valeur économique des activités de l'économie nationale peut se calculer selon 3 méthodes.

La première est l'approche par la production. Elle mobilise le chiffre d'affaires et les consommations intermédiaires. Le second terme est soustrait au premier pour obtenir la valeur ajoutée. Le PIB est la somme des différentes valeurs ajoutées. Ainsi, le PIB mesure la valeur des biens finaux disponibles pour la période étudiée. A ce stade, toutefois, la production est mesurée aux prix de base qui excluent les impôts et les subventions sur les produits. Or, les comptes nationaux souhaitant obtenir le prix payé par l'acheteur (ce prix de marché refléterait la valeur que l'acquéreur donne au produit), il faut donc ajouter les subventions (S) sur les produits et soustraire les impôts (T). On a donc :

$$Y = \Sigma VA + S - T$$

La deuxième est l'approche par la dépense. Dans cette perspective, le PIB correspond à l'ensemble des flux de dépenses finales de la période. En effet, les biens finaux produits par l'économie ont été achetés pendant la période. Soit ils ont été consommés par les ménages ou, collectivement, par le biais des administrations publiques, soit ils ont fait l'objet d'un achat en tant que biens durables (logements, biens d'équipements des entreprises). Dans ce dernier

cas, ils apparaissent au titre de la FBCF. D'autres encore ont bien été produits mais n'ont pas été achetés : ils restent dans les entreprises sous forme d'inventaires et augmentent les stocks. Ces biens et services ne sont pas seulement achetés par des agents résidents mais également par des étrangers (exportations). Enfin, les agents résidents achètent des biens finaux étrangers (importations), ce qui constitue une dépense à soustraire à l'économie nationale. On ajoute ainsi l'investissement (I), la consommation finale (C) ainsi que les dépenses publiques (finales, notées G), les achats à l'étranger (X) moins les importations (M) :

$$Y = C + I + G + X - M$$

La troisième est l'approche par les revenus. En effet, le PIB correspond aussi aux revenus qu'il a fallu verser aux agents économiques ayant participé à la production. Le PIB correspond alors à la somme des salaires bruts (W) et des profits bruts (P) auxquels on ajoute également les impôts (T) sur la production en retirant les subventions (S) :

$$Y = W + P + (T - S)$$

Par construction, ces trois approches donnent un résultat similaire. De manière conventionnelle, l'approche production est privilégiée pour mesurer la valeur créée par une industrie et une branche. Elle permet de voir, au niveau de l'entité productive, la valeur effectivement réalisée. Cependant, dans de nombreux cas, cela n'est pas possible car il n'existe pas d'output bien défini. Il est alors nécessaire de passer par l'approche par les revenus qui permet d'imputer une valeur ajoutée. Dans le cas de la France, 30% du PIB est concerné. Nous allons maintenant voir les différentes activités concernées et montrer en quoi cette convention renvoie à des discussions théoriques importantes sur le caractère productif ou non des activités considérées. Dans la mesure où ces conventions affectent les séries de PIB réel, elles peuvent modifier notre appréciation du découplage.

Les services non marchands

En premier lieu, l'approche production du PIB ne peut pas être appliquée aux activités non marchandes, c'est-à-dire celles pour lesquelles le chiffre d'affaires ne couvre pas les coûts de production. Ces productions répondent à un mode d'allocation des biens et services alternatif à celui du marché : leur distribution ne repose pas sur une logique lucrative. De ce

fait, la notion de consentement à payer qui fonde le raisonnement sur la valeur du bien et service n'est pas applicable. Que l'on pense aux repas distribués par des associations, comme les Restos du cœur, ou encore le service public d'enseignement, le prix de ces services non marchands répond à d'autres objectifs. Ces prix (parfois nuls) ne disent rien sur la désirabilité du service mais témoignent plutôt d'une volonté de rendre ce service accessible.

Jusqu'aux années 1970, ces services n'étaient pas intégrés au calcul du PIB. Depuis, une convention comptable les prend en compte au titre du PIB non marchand à partir des coûts de production du service (masse des rémunérations [salaires et cotisations sociales], consommations intermédiaires ; impôts et taxes liés à la consommation de capital fixe). D'après cette convention, l'INSEE considère que les services majoritairement non marchands (Administration publique, Enseignement, Santé humaine et action sociale) ont généré une valeur ajoutée de 467,5 milliards en 2018. Rapporté à la valeur ajoutée totale des différentes branches de 2090,9 milliards, le PIB non marchand pèse pour 22,3% de la production nationale française.

Théoriquement, certains auteurs considèrent qu'il s'agit d'une pure convention et que ces services non marchands ne correspondent pas à une création de valeur nouvelle (Darmangeat, 2016 ; Husson, 2016). D'autres, comme Harribey (2019), soutiennent à l'inverse qu'il existe bien un régime de valorisation alternatif à celui du marché. Dans le second cas, la production non marchande est perçue comme une création de services nouveaux et d'une valeur nouvelle dont la validation est collective et politique. Ces controverses ne sont pas nouvelles. Elles renvoient au débat sur le caractère productif des services qui existe depuis les classiques et Marx.

Ce débat revient à se demander si le flux monétaire perçu par l'activité en question a pour contrepartie une production nouvelle ou s'il s'agit d'un transfert monétaire, c'est-à-dire d'une activité qui existe par le prélèvement d'une valeur créée par d'autres. Ce traitement est important car, selon les choix effectués, le PIB sera plus important ou plus faible. Selon les conventions retenues, les séries de PIB seront différentes. Pour illustrer ce point, nous allons présenter différentes activités au cœur de ces débats : l'activité des retraités, la prise en compte des loyers et l'intermédiation bancaire.

Les retraites

Le traitement par la comptabilité nationale des revenus des retraités permet d'illustrer notre propos. Dans la même veine que Jean-Marie Harribey, le sociologue Bernard Friot estime que les fonctionnaires créent la valeur qu'ils touchent (Friot, 2012). Cependant, Friot propose d'étendre le raisonnement aux inactifs retraités au motif qu'ils continuent de produire du non-marchand : ils s'occupent des petits-enfants, ils font tourner de nombreuses associations, en bref, pour le dire de manière prosaïque, « les vieux travaillent », mais sont libérés du salariat. Dans cette perspective, les retraites ne devraient plus être traitées comme des revenus de transfert, prélevés sur les actifs créateurs de valeur, mais comme une valeur économique (non marchande) supplémentaire créée par les producteurs retraités. Si on accepte ce raisonnement, le PIB serait augmenté du montant des retraites versées, 332 milliards en 2020 en France, soit 14,6 points de plus. La mise en place d'une telle convention aurait donc pour effet d'augmenter sensiblement la vitesse du découplage français.

Ce raisonnement nous paraît contestable dans la mesure où, même si les retraités peuvent produire des valeurs d'usage utiles à la société, cette production est laissée à leur totale discrétion. Dit autrement, il n'existe aucun mécanisme d'orientation collective de ce qui est produit, contrairement au cas de la fonction publique. De plus, il est clair qu'en pratique les retraités perçoivent un revenu de transfert *sans contrepartie* ni obligation de production de bien ou service. Le versement de leur retraite ne vaut donc pas validation d'une production actuelle mais reconnaissance d'une contribution passée à la production nationale. Cet exemple reste néanmoins intéressant pour notre propos et montre à quel point la question des frontières du PIB n'est pas technique. Alors qu'il est possible de considérer que certaines productions sont ignorées et devraient être imputées, il existe à l'inverse d'autres exemples de production, actuellement comptée, mais que l'on peut considérer comme imputée à tort.

Imputation de loyers aux propriétaires

En matière de logement, il faut distinguer les ménages locataires et propriétaires. Les ménages locataires acquittent un loyer qui est un revenu pour un propriétaire. Les loyers que reçoit ce bailleur sont enregistrés dans son compte de production (P.1) au titre de production de services de location. Pour un propriétaire occupant, il n'y a pas de loyer versé, par

conséquent, le service de location produit a lieu, mais vis-à-vis de lui-même, il n'est donc pas observable. Afin que le taux de propriétaires occupants n'affecte pas le montant du PIB et fausse ainsi les comparaisons internationales, le système de comptabilité nationale impute aux propriétaires des loyers fictifs qu'ils se versent à eux-mêmes. On a ici une activité de production pour emploi final propre.

Ce traitement des loyers peut être discuté à plusieurs niveaux. Tout d'abord, si on en revient à l'économie politique classique, le service de logement n'est pas une nouvelle production de la période en cours. Le bien « logement » ayant déjà été produit par le passé, cette création de valeur a déjà été enregistrée lors de sa construction. De ce point de vue, les loyers perçus par les propriétaires s'apparentent à une pure rente sur la production réelle. En mettant à disposition leurs logements, ils acquièrent un droit de tirage sur la production de la période. Dans le cas des loyers imputés, cela est encore plus flagrant. Le service de logement est autoconsommé. Il faut ici imaginer ce qu'aurait été un flux financier qui, en pratique, n'a pas eu lieu.

Il est ainsi possible de traiter ces revenus différemment : non pas comme la contrepartie d'une production mais un revenu de transfert (une rente) perçu du fait de la rareté du sol et des immeubles (notamment en ville) et prélevé sur les activités productives. Il n'est pas évident de cerner ce qui distingue le retraité du propriétaire immobilier. Le retraité produit potentiellement des valeurs d'usage et pourtant son revenu est considéré comme un transfert. Le propriétaire immobilier « produit » un service de logement mais le montant du loyer ne reflète pas uniquement la valeur de ce service (coût réel de production correspondant aux frais d'entretien) mais également un phénomène de rente différentielle. Dans cet esprit, on peut faire l'hypothèse que l'augmentation importante des loyers dans la période récente participe artificiellement au gonflement du PIB. Si on regarde les loyers réels et imputés en France, depuis 1990, et qu'on les compare avec le PIB en valeur, on voit que le poids des loyers tend à augmenter dans le PIB (tableau 5).

	1990	2000	2010	2018
Loyers	87,5	143,6	221,9	262,8
Dont réels	23,2	38,7	59,2	70,6
PIB nominal en Mds d'€	1058,6	1485,3	1998,5	2304,8
Loyer en %	8,25	9,67	11,10	11,40
ΔPIB depuis 1990		+40,3%	+88,7%	+117,7%
ΔPIB corrigé des loyers		+38,1%	+82,9%	+110,2%

Tableau 5. **Les loyers imputés et réels dans le PIB nominal en France (1990-2018).**

Source : auteur. Données : INSEE, comptes nationaux.

Suivant le raisonnement des économistes classiques, les loyers sont une rente, un prélèvement sur les activités productives. En 2018, il aurait ainsi fallu réduire de 11,4% le PIB. Notons que si la part des loyers avait été la même en 1990, 2000 et 2010, cela n'aurait pas affecté la mesure du découplage : notre série de PIB corrigée des loyers aurait connu la même évolution que le PIB. Cependant, comme le montant des loyers progresse plus vite que le PIB, la série corrigée augmente moins vite. Entre 1990 et 2018, la croissance nominale est de 117,7% contre 110,2%, une fois les loyers déduits.

Les débats autour de la productivité de la finance

Le secteur financier offre un autre cas heuristique dans la mesure où, d'abord considéré comme non productif, ce secteur est aujourd'hui considéré comme créateur de valeur. Lloyd Blankfein, PDG de Goldman Sachs, déclarait en 2009, peu après la plus grave crise financière depuis les années 1930, que « the people of Goldman Sachs are among the most productive in the world »³⁶. Nous présentons ici des travaux plus sociologiques (Christophers, 2011) qui se sont intéressés à ce basculement : à l'évolution des

³⁶18/10/2010, « Goldman Sachs CEO Lloyd Blankfein: Our Employees Are Among The Most Productive In The World », *Huffpost*, en ligne : https://www.huffpost.com/entry/goldman-sachs-ceo-lloyd-b_n_353504

représentations et aux conséquences sur le traitement que fait la comptabilité nationale des différentes activités financières.

En premier lieu, il faut distinguer trois activités dont les banques ont la charge. La première est la fourniture de services pour lesquels il y a un paiement explicite (fusion-acquisition, gestion de portefeuille, transfert de fonds). Parce qu'il y a paiement explicite pour une prestation, l'enregistrement ne pose pas de difficulté particulière : le montant apparaît dans le compte de production. La deuxième est l'achat et la revente de titres financiers. Cette activité ne pose pas non plus de difficulté puisqu'il n'y a pas de création de valeur nouvelle. Il s'agit d'un gain en capital : aucun service n'a été fourni, ni vendu. Ces activités ne viennent pas augmenter la valeur ajoutée créée par les banques. Enfin, la troisième activité est celle d'intermédiation bancaire qui peut être définie comme un rôle de facilitateur de la transaction entre un acheteur et un vendeur d'actif financier. Par exemple, les dépôts bancaires des uns permettent de financer les prêts ainsi que le besoin de liquidités des autres. Mais l'intermédiation peut aussi avoir lieu sur les marchés financiers lorsqu'une banque achète un actif à un acteur et, dans le même temps, se finance par l'émission d'un passif financiarisé. Cette intermédiation de marché s'est particulièrement développée dans la période contemporaine, phénomène que l'on constate en analysant le bilan des banques : alors qu'en 1980, les crédits représentaient 89% de leur actif, ils n'en représentent plus que 34,6% en 2010. La part des titres financiers détenue est, elle, passée de 5 à 34,5%. Qu'il s'agisse d'une intermédiation classique ou de marché, les banques se rémunèrent en pratiquant une *marge d'intérêt* (classique) ou *d'achat* (marché).

C'est cette dernière activité qui est au cœur de ce que la littérature appelle le « banking problem ». En effet, ce service ne donne pas lieu à un paiement explicite, ce qui rend le calcul d'une valeur ajoutée impossible, du moins selon l'approche production que l'on applique aux autres industries. De plus, dans les autres industries, les intérêts reçus ne sont pas comptés comme outputs de cette industrie, mais comme un flux prélevé sur la VA d'autres secteurs. C'est pour ces raisons que Richard Stine, statisticien britannique, expliquait dans un mémorandum pour le premier System of National Account (SNA) :

« If we treated banks (and other financial intermediaries) like ordinary businesses [...] we would show as their sales proceeds simply their charges to customers', and, since the quantum of these specific proceeds was very

often lower than banks' total costs, a sector deficit rather than a surplus would appear »
(United Nations, 1947, p. 40, cité par Christophers, 2011, p.124).

Selon cette convention, la valeur ajoutée bancaire pourrait être nulle voire négative, une conclusion potentiellement problématique pour deux séries d'acteurs. Pour l'industrie financière d'abord, qui se retrouve à faire du profit et à percevoir des revenus sans être considérée comme créatrice de valeur économique nouvelle. La comptabilité nationale pouvant ainsi montrer que cette activité est parasitaire. La représentation d'une industrie au sein de la comptabilité nationale n'est donc pas seulement un enjeu purement scientifique, elle véhicule des représentations, raison pour laquelle les acteurs économiques s'intéressent aux conventions qui les saisissent.

Les économistes néoclassiques forment le second groupe d'acteurs à dénoncer de telles conventions. Chez les classiques comme Adam Smith, ce phénomène n'avait rien de surprenant³⁷. De même chez Marx, la valeur provient du procès de production et de la dépense en travail salarié. A l'inverse, l'activité d'intermédiation est constitutive du procès d'échange. Si elle a indéniablement une utilité sociale (sans elle, la circulation des valeurs d'usage produites et le lancement d'un cycle de production seraient impossibles), elle ne crée pas de valeur économique nouvelle. Pour les classiques, il est ainsi possible de recevoir un revenu sans avoir contribué à la production.

A l'inverse, pour les économistes néoclassiques, la valeur provient de l'utilité, laquelle est révélée par le marché. Si une activité marchande génère un revenu, c'est qu'elle a créé de la valeur, donc de l'utilité. De ce point de vue, il y a effectivement un paradoxe à voir une « industrie prospère qui affiche une contribution positive négligeable voire négative au produit national » (OEEC, 1952, p.52), de sorte qu'une nouvelle convention nécessite de corriger ce résultat. C'est sur cette base qu'un nouveau consensus est apparu au sein des

³⁷ En effet, dans *La richesse des nations*, Smith explique que : "selling bank money at five per cent agio, and buying it in at four _ allowed the bank to earn a good deal more than what is necessary for paying the salaries of officers, and defraying the expense of management and thus to generate a profit. Yet this was not because there was anything inherently productive about what the bank was doing. On the contrary: 'Public utility, however, and not revenue, was the original object of this institution . . . The revenue which has arisen from it was unforeseen, and may be considered as accidental' (Smith, 1776, p. 374)

économistes de la comptabilité nationale à la fin des années 1990. Désormais, il apparaissait raisonnable que « la valeur de la production des institutions financières inclue les intérêts nets perçus » (Fixler et Zieschang, 1999, p.547). Même si cette évolution s'est faite à une vitesse variable, selon les pays, trois moments se dessinent. Jusqu'en 1970 environ, les services d'intermédiation sont considérés comme non productifs. Cette exclusion des frontières de la production peut se faire *de jure* comme en France (par principe) ou bien *de facto* comme en Australie ou en Grande-Bretagne. Dans ce dernier cas, en effet, les intérêts nets reçus sont considérés comme un input du secteur bancaire, ce qui conduit à réduire la valeur ajoutée du secteur. Par la suite, la plupart des pays adopteront les recommandations du SNA 1968 dans lequel le secteur financier apparaît comme productif grâce à une nouvelle convention. Désormais, les intérêts nets versés sont traités comme un input (consommation intermédiaire) pour un secteur industriel fictif qui n'a pas de valeur ajoutée. La contribution de ce secteur est donc négative tandis que celle des banques peut désormais être positive. Un nouveau basculement s'opère à partir du SNA 1993 puisque, désormais, la catégorie des SIFIM (services d'intermédiation financière indirectement mesurés) est créée. Une méthode pour évaluer ces services est alors proposée. Le caractère productif des banques est associé à leur capacité à assumer un risque, d'où une mesure qui compare le taux pratiqué à un taux de base sans risque (par exemple, celui de la banque centrale). Plus généralement, la part du PIB réalisée par le secteur financier n'a cessé de croître depuis soixante ans (Bruno, Chiappini et Gros Lambert, 2020) : elle atteint 5% en France et en Allemagne et 8% en Grande-Bretagne. Entre 2003 et 2015, en France les SIFIM représentent 37% de la production bancaire. En 2020, la valeur ajoutée par ces SIFIM est estimée en France à 45,5 milliards d'euros en France, en 2020, soit 1,97% du PIB (INSEE).

Si l'on considère que ces productions sont imputées à tort, alors la série de PIB réel recalculé augmente moins vite que la série produite dans les comptes nationaux. Comme pour les loyers, l'effet à attendre est une augmentation du découplage observé. Compte tenu du nombre d'imputations à l'œuvre, certains auteurs (Basu et Foley, 2013) ont entrepris de systématiser cette démarche et d'utiliser des mesures de l'output plus restrictives comme la *measurable value added* (en français, valeur ajoutée mesurable).

La measurable value added (MVA) : renoncer à l'imputation ?

Proches de la tradition marxiste, Basu et Foley (2013) proposent de retirer les activités faisant l'objet d'une imputation au motif que ces imputations sont problématiques. D'après eux, le caractère fictif des imputations se traduirait notamment par le fait que le PIB réel est de moins en moins capable de prédire l'emploi, contrairement aux périodes antérieures. Les deux auteurs proposent ainsi un nouvel agrégat : le MVA pour *measurable value added* (en français, valeur ajoutée mesurable) qui ne retiendrait que les activités qui ont un output tangible, c'est-à-dire vendu contre un prix explicite. Le résultat est l'exclusion de nombreuses activités comme celles du secteur « FIRE » (pour Finance, Insurance, Real Estate³⁸). Pour donner un ordre de grandeur, en 2009, la MVA calculée par les auteurs ne représente que 42% du PIB américain.

« The classification of industries into goods-producing and services-producing sectors does not distinguish between value-adding (or productive) sectors and value-realising (or unproductive) sectors. Hence we have constructed a category of industries that produces an independently measurable value added, which we call measurable value added (MVA). This 'value-adding sector' is composed of sectors in which a tangible output (good or service) is sold in the market for a price and hence the value-added figure is measurable without imputations. The MVA category is composed of the following industries from the Annual Industry Accounts: agriculture; mining; utilities; construction; manufacturing; wholesale trade; retail trade; transportation and warehousing; information services; administrative and waste management; art, entertainment, accommodation and food services »
(Basu et Foley, 2013, p.1081).

Ces auteurs montrent une divergence progressive entre la MVA et le PIB réel au cours du temps. Sur la période 1948-2008, la MVA a crû à un rythme correspondant à 78% de celui du PIB réel. Les auteurs notent également une tendance, depuis 1973, à ce que cet écart soit plus marqué : le taux de croissance sur la période 1948-1973 de la MVA correspond à 0,82 fois celui du PIB réel contre 0,72 fois sur la période 1973-2008. La part des activités comptées par imputation a donc fortement crû depuis 1973. En particulier le secteur « FIRE » est passé de 10% du PIB en 1950 à près de 25% en 2010. L'utilisation de la MVA peut ainsi être mobilisée

³⁸ C'est-à-dire le secteur financier, des assurances et de l'immobilier.

pour discuter du découplage. Si le PIB réel avait suivi la même tendance que cet indicateur, il aurait été, en 2008, 22% plus faible en 2008 que la valeur officielle. Apprécié à partir de cet agrégat, le découplage états-uniens est ainsi plus timide que celui observé.

Les exclusions réalisées lors du calcul de la MVA peuvent paraître arbitraires au sens où des activités potentiellement créatrices de valeur (mais délicates à mesurer pour le chercheur et les comptables nationaux) sont exclues, d'autant que les deux auteurs passent rapidement sur les justifications théoriques. D'après eux, la validité de leur démarche s'apprécierait à l'aune de la bonne prédiction du niveau d'emploi que permet cet indicateur plus restreint :

*« If the goal is to understand the severity of business cycles as fluctuations in aggregate demand and the impact of aggregate demand on employment, MVA is a better choice than NI³⁹ as an index. The superiority of MVA as a business cycle and employment indicator is understandable because MVA is much more closely related to aggregate demand than the imputed value added in service industries like FIRE (Finance, Insurance, Real Estate) which, as we have seen, have a growing weight in NI and GDP »
(Basu et Foley, 2013, p.1084).*

En résumé, nous avons présenté une première difficulté relative à la construction des séries de PIB réel utilisées pour apprécier le découplage : la définition des frontières du PIB nominal. Les débats autour des frontières peuvent se résumer en croisant deux critères (voir tableau 6) : est-ce que l'activité génère un revenu ? Est-ce que l'activité est considérée comme productive ?

Le premier critère renvoie au type de production. Certaines productions sont marchandes, d'autres sont non marchandes mais impliquent du travail salarié, d'autres encore ne donnent droit à aucun revenu. Il est légitime que le PIB ne considère que les activités qui génèrent un revenu. Non pas que les autres en question ne produisent rien, mais l'un des intérêts principaux du PIB est de saisir la relation entre la demande en monnaie, la production et l'emploi. Une imputation fictive, par exemple valoriser les heures de travail féminin au taux du SMIC horaire, peut présenter un intérêt (mettre en évidence que les femmes, surreprésentées dans cette sphère, produisent) mais peut être source d'erreurs (ces

³⁹ L'abréviation NI signifie ici National Income soit, en français, le revenu national.

acteurs économiques n'ont pas perçu de revenu qui ne vont pas circuler dans le circuit économique).

L'activité est-elle productive ?	Est-ce que l'activité reçoit des revenus ?		
	Oui. L'approche production est disponible	Oui mais l'approche production pas disponible	Non
Oui. Nouvelles valeurs d'usage produites	« Core GDP » ou Valeur ajoutée matérielle (MVA) <i>Production automobile</i>	Imputation par les revenus <i>Enseignement public, intermédiation financière actuellement</i>	Imputation possible en utilisant des prix de marchés ou des salaires fictifs. <i>Production domestique</i>
Non. Consommation de valeurs d'usage	X	Pas d'imputation car « improductif » = revenus de transfert <i>Pensions de retraites Loyers chez les classiques</i>	Temps libre <i>Marcher en forêt</i>

Tableau 6. Les frontières de la production.

Source : auteur.

Le second critère renvoie au caractère productif à proprement parler. En effet, le fait de recevoir un revenu n'est pas toujours suffisant pour qu'une activité soit dans le même temps productive. L'exemple typique est celui de la rente : des revenus sont reçus mais il s'agit d'un prélèvement de la valeur créée par d'autres. Les revenus de transfert en sont un autre : un droit de tirage est donné à des acteurs qui n'ont pas participé à la production de la période (retraités, chômeurs).

Comme nous l'avons montré au cours de cette partie, la tendance est à l'extension des frontières de la production. Des activités autrefois considérées comme improductives (administrations publiques, intermédiation financière) le sont désormais tandis que des productions n'ayant pas de valeur économique imputable tendent à être imputées (loyers

fictifs par exemple). Ce double mouvement peut conduire à une croissance du PIB plus rapide que ce qu'il aurait été autrement, un phénomène que la comparaison à l'agrégat MVA a permis d'étayer. Ainsi, les séries de PIB nominal sont à prendre avec précaution car leur construction peut peser sur l'appréciation du découplage.

A côté de ces enjeux statistiques, des problèmes pratiques, que nous ne développons pas ici, peuvent également influencer sur les séries de PIB. On pense ici aux activités informelles, au travail dissimulé, autant d'activités qui sont productives mais sont invisibles aux yeux des comptables nationaux. Or, à mesure que l'économie marchande et légale gagne du terrain, des activités qui existaient mais n'étaient pas comptées viennent désormais gonfler le PIB. Ces différences peuvent contribuer à un biais dans l'appréciation du découplage entre pays développés et en développement. En effet, en 2007, les activités informelles dans les pays de l'OCDE représenteraient 13% du PIB contre 33,7% dans les pays en transition⁴⁰ (Schneider, 2012). En France, d'après le dernier rapport du Conseil d'orientation pour l'emploi, elles représenteraient en 2019 12,6% du PIB. Plus ces activités sont importantes, plus le PIB sera réduit et plus le découplage observé aura de chance d'être timide.

Nous allons maintenant voir qu'un second élément important intervient dans la construction des séries de PIB réel : le choix du déflateur utilisé pour passer des variables nominales aux variables réelles.

1.3.2. Passer du PIB nominal au PIB réel : le choix d'un déflateur

Une fois les frontières de la production arrêtées, le passage à un volume de production suppose de choisir un déflateur. En effet, jusqu'ici nous avons agrégé la quantité de biens et services à partir de l'unité de compte, la monnaie. Cette opération n'est toutefois pas suffisante pour apprécier l'augmentation du volume de production. En effet, l'unité de compte en question doit être stable au cours du temps pour que la mesure soit pertinente, ce qui n'est pas le cas de la monnaie. On pense ici spontanément au phénomène d'inflation mais en réalité l'inflation n'est pas problématique en soi. Le véritable souci tient au fait que cette inflation est *différente* selon les biens et services concernés. Dit autrement, le problème est

⁴⁰ Les neuf pays étudiés sont l'Arménie, la Bulgarie, la Croatie, le Géorgie, le Kazakhstan, le Kirghizistan, la Roumanie, la fédération de Russie et la Slovaquie.

que les prix relatifs se modifient au cours du temps. Nous allons prendre un exemple pour illustrer notre propos.

De l'année de référence à l'indice chaîné

Traditionnellement, le calcul d'un indice de prix pour déflater le PIB nominal s'obtient en choisissant une année de référence. Cette opération revient à prendre les prix relatifs d'une année et à calculer la production réelle pour chaque année sur cette base. Le déflateur (ou inflation pour simplifier) implicite s'en déduit aisément en divisant la variation nominale par sa variation réelle.

Prenons l'exemple d'une économie où deux biens sont produits (voir tableau 7) : des paquets de chips et des ordinateurs. Initialement, 10 000 paquets de chips sont produits et 1 ordinateur. Les chips valent 2€ l'unité tandis que l'ordinateur 10 000€, le prix relatif est donc 1 ordinateur = 5000 paquets. Imaginons que le prix des chips augmente tandis que celui des ordinateurs baisse. Les chips coûtent désormais 2,5€ le paquet, les ordinateurs 5000€. Le nouveau prix relatif est 1 ordinateur = 2000 paquets. Dans le même temps, les quantités de production des deux biens augmentent.

	Paquets de chips		Ordinateurs		PIB Nominal	
	Quantité	Prix	Quantité	Prix	Valeur	Variation
2015	10 000	2€	1	10 000€	30 000€	
2020	11 000	2,5€	2	5 000€	37 500€	+25%

Tableau 7. **Prix relatifs et croissance dans une économie fictive à deux biens**

Source : auteur.

Pour mesurer l'augmentation des volumes produits, il est possible de prendre deux années de référence différentes : l'année 2015 ou l'année 2020. Force est de constater qu'en fonction de l'année de référence retenue, on sélectionne des prix relatifs différents. Or, ce sont bien ces prix relatifs qui permettent d'agrèger les différents biens entre eux (tableau 8).

	<i>Prix relatifs de 2020 :</i> <i>1 ordinateur = 5000 paquets de chips</i>		<i>Prix relatifs de 2015:</i> <i>1 ordinateur = 2000 chips</i>	
	Production réelle en chips	Production réelle en ordinateur	Production réelle en chips	Production réelle en ordinateurs
2015	12 000	6	15 000	3
2020	15 000 (+25%)	7,5 (+25%)	21 000 (+40%)	4,2 (+40%)
	Inflation 2015-2020 : 0 %		Inflation 2015-2020 : -10,8%	

Tableau 8. **Prix relatifs de référence et mesure de la production réelle.**

Source : auteur

En année de référence 2015, la production en volume croît de 40% ; en année de référence 2000, cette croissance n'est plus que de 25%. Dans les deux cas, le déflateur du PIB (l'inflation) est donc différent : -10,8% en année de référence 2015, 0% en année de référence 2020. Les prix relatifs retenus influencent donc notre mesure de l'évolution des volumes. En théorie, il existe un cas où le choix de l'année de référence devient neutre : lorsque les prix relatifs restent stables. Cette situation très hypothétique est compatible avec de l'inflation mais une inflation bien particulière, où les prix des biens augmentent tous au même rythme. Dès lors que l'on s'écarte de cette situation, le choix de l'année de référence impacte notre mesure des volumes, comme dans notre exemple. Or, l'analyse des prix relatifs montre qu'en pratique ces derniers ne cessent de se modifier puisque l'inflation observée est différentielle (figure 10). Pour ne prendre qu'un exemple, en France, d'après l'INSEE, le prix des biens alimentaires a augmenté de 43,5% entre 2000 et 2022, celui de l'énergie de 106,8% tandis que ceux des biens manufacturés baissaient de 1,5%.

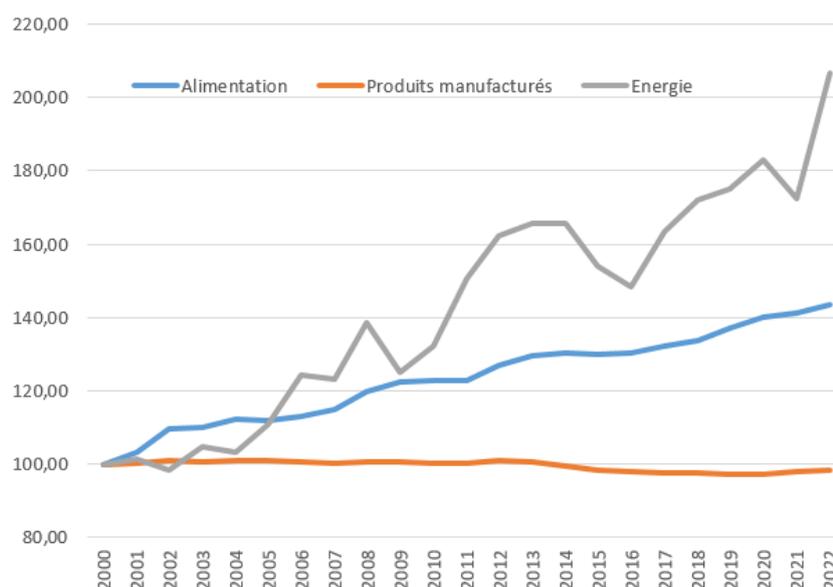


Figure 10. **Indice des prix de l'alimentation, des produits manufacturés et de l'énergie en France (2000-2022). Base 100=janvier 2000.**

Source : Auteur. Données : INSEE.

Si les prix relatifs varient d'année en année, se pose nécessairement une question au statisticien chargé de la mesure des volumes : quelle année de référence faut-il retenir ? Quels sont les « bons » prix relatifs à utiliser pour déflater ? Selon l'année de référence sélectionnée, la série de PIB réel obtenue sera différente. Dans le cas des Etats-Unis, Fix et al. (2019) ont procédé à une estimation des écarts entre les différentes séries. Pour y parvenir, ils ont reconstruit 71 séries de PIB réel pour la période 1947-2018. Chacune d'elle correspond à une année prise comme année de référence. L'écart maximal obtenu est de 30%. Dit autrement, en prenant l'année de référence la moins favorable à la croissance, le PIB est, en 2018, 30% inférieur à l'année de référence la plus favorable à la croissance.

Ces écarts sur les séries de PIB réel sont rarement discutés dans les mesures du découplage. A notre connaissance, seul Hardt (2018) évoque le fait que « déflateur imparfait »⁴¹ (p.126) est susceptible de venir surévaluer la baisse de l'intensité énergétique du PIB. La difficulté provient du fait qu'il n'existe pas de procédure objective permettant de sélectionner une année plus qu'une autre. Conscients du problème, les statisticiens ont proposé d'utiliser un indice des prix chaîné qui évite des soubresauts lors du changement d'année de base. Cette méthode consiste à ne plus prendre les prix relatifs d'une année mais

⁴¹ Nous traduisons : « imperfect deflation »

une référence mouvante au cours du temps. Dans notre exemple, l'indice chaîné correspondrait à la moyenne entre l'indice base 2020 (125) et l'indice base 2015 (140), ici 132,5. Avec une augmentation de la production en volume de 32,5%, le déflateur implicite est de 94,3 (contre 100 en base 2020 et 89,2 en base 2015) c'est-à-dire une baisse des prix de 5,7%. En définitive, la procédure de l'indice chaîné revient à considérer que les « bons prix relatifs » sont ceux de l'année en cours. En tant que prix de marché, ils reflètent l'utilité relative des consommateurs. En ce sens, cette solution trouve ses fondements dans l'approche néoclassique.

Cette conclusion interroge sur ce que l'on entend par volume. Parle-t-on toujours d'une quantité de biens et services ou bien d'une quantité d'utilité ? Cette interrogation devient d'autant plus saillante quand on considère la question de la qualité des biens.

L'effet qualité

Jusqu'ici, nous avons raisonné comme si les différents biens produits par l'économie restaient identiques au cours du temps. Or, en pratique, de nouveaux biens apparaissent qui n'existaient pas par le passé tandis que d'autres disparaissent. D'autres encore connaissent une évolution dans leur qualité. Les statisticiens font donc face à une seconde difficulté : identifier des catégories homogènes de biens à partir desquelles une évolution de prix peut être étudiée. L'effet qualité pose des problèmes proches de ceux discutés pour l'année de référence. En effet, là encore, il s'agit de trouver une procédure adéquate pour agréger des biens qualitativement différents entre eux. A nouveau, cette agrégation suppose de déterminer les prix relatifs pertinents.

Prenons l'exemple des ordinateurs. Pour pouvoir constater l'évolution des quantités d'ordinateurs, il faut pouvoir raisonner à qualité constante. Si la qualité s'améliore, le statisticien doit être en mesure de la résumer en un seul chiffre, une opération délicate (Stiglitz, Sen et Fitoussi, 2008). Par exemple, si l'ensemble des attributs d'un ordinateur le rendent 50% plus performant, alors on considérera que le nouveau modèle vaut 1,5 fois l'ancien. Un prix relatif implicite est donc utilisé. De ce fait, l'ajustement de la qualité est une procédure similaire à celle de l'année de référence : le statisticien doit choisir 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 évolue). Ce choix est loin d'être évident puisque cela suppose un jugement sur le « mieux ». Pour preuve, dans le cas des ordinateurs, on constate de très importantes disparités dans l'ajustement de la qualité entre les pays, illustration que les attributs pris en compte ne font pas l'unanimité (Fix, Nitzan et Bichler, 2019). Pour ne prendre que deux cas extrêmes, en Italie l'amélioration de la qualité des ordinateurs a progressé d'environ 4% par an entre 1995 et 2001 contre 25% par an aux USA (Fix, Nitzan et Bichler, 2019). En cumulé, l'impact de cette convention de qualité n'est pas anodin. Dans le cas d'une économie qui ne produirait que des ordinateurs, la croissance des volumes, uniquement déterminée par la qualité ici, est, au bout de 30 ans, multiplié par 3,24 dans le premier cas contre 807,8 dans le second.

La mesure de la qualité est donc hautement conventionnelle mais aussi conflictuelle (Henneguelle et Jatteau, 2021 ; Jany-Catrice, 2018, 2019). En effet, elle détermine l'inflation mesurée, laquelle sert de base aux revendications de revalorisation et d'indexation des revenus. De manière récurrente, des polémiques surgissent dans le débat public sur l'appréciation de la qualité : surestimée pour certains (Philippe Herin (2018) ou encore Emmanuel Todd (2021) en France) ou sous-estimée (rapport de la commission Boskin (Boskin et al., 1996)) aux Etats-Unis. Si demain les comptes nationaux redéfinissaient radicalement ce qu'est la qualité, on pourrait avoir une croissance ou décroissance du PIB réel⁴².

L'idée même d'ajustement de la qualité pour obtenir une quantité de production réelle révèle que cette dernière n'est pas une mesure de la production physique : l'idée est plutôt d'avoir un raisonnement à pouvoir d'achat constant ou encore à utilité constante de la consommation.

Les conventions que nous venons de présenter, qu'il s'agisse du choix de l'année de référence ou de la mesure de la qualité, affectent les séries de PIB réel obtenu. Par conséquent, la mesure du découplage peut elle-même être biaisée. En effet, selon l'année de

⁴² Cet effet conduit, par exemple, l'économiste Jean Gadrey à ne pas revendiquer la position décroissante et à privilégier la progression de la qualité de la production dont on ne peut préjuger des effets sur l'évolution future du PIB réel. Voir par exemple son billet de blog du 13/11/2013 « Alain Lipietz et le « découplage » entre croissance du PIB et réduction de l'empreinte écologique » : <https://blogs.alternatives-economiques.fr/gadrey/2013/11/13/alain-lipietz-et-le-decouplage-entre-croissance-du-pib-et-reduction-de-l-empreinte-ecologique>

référence retenue, les écarts peuvent aller jusqu'à 30% pour les Etats-Unis. De même des effets qualité qui, en cumulé, peuvent produire des écarts significatifs.

Conclusion de la première section

Notre première section a montré que l'appréciation du découplage était sensible aux séries statistiques utilisées, que ce soient celles de PIB réel ou bien de consommation d'énergie. Toute estimation en la matière repose sur des choix de la part du chercheur pour construire ces séries. Dans le cas des consommations d'énergie, ces choix portent sur la responsabilité à attribuer à un Etat pour des consommations qui sont réalisées domestiquement mais également à l'étranger. L'approche consommation réduit le nombre de pays où le découplage est observé par rapport à l'approche production. Et, pour ceux qui y parviennent même sous ce régime, le rythme reste très insuffisant au regard des objectifs climatiques.

L'un des apports de cette section a été de mobiliser la littérature relative aux conventions de PIB, absente des discussions sur le découplage. Au niveau des frontières retenues pour le PIB, l'imputation d'un nombre croissant d'activité au PIB modifie la mesure du découplage. En effet, si l'on considère que ces activités devraient être traitées comme des revenus de transfert, alors le PIB corrigé augmentera moins vite et le découplage sera plus modeste. Les conventions sur le déflateur peuvent avoir des effets similaires sur les séries de PIB réel. En choisissant certaines années de référence et des conventions plus « sévères » quant aux gains de qualité réalisés, la mesure de l'inflation peut être plus élevée. En définitive, la série de PIB réel alternative augmentera plus lentement que la série produite par les comptes nationaux de sorte que, là encore, le découplage observé sera plus faible.

Dans la seconde section, nous présentons une méthode complémentaire à l'analyse des séries statistiques : l'analyse de décomposition d'index.

2. Expliquer les déterminants de la consommation d'énergie passée : de la courbe environnementale de Kuznets à l'analyse de décomposition d'index

Les débats sur le découplage prennent de l'ampleur au cours des années 1990, date à laquelle de nombreux sommets (Sommet de la Terre à Rio en 1992) et engagements internationaux (protocole de Kyoto en 1997) voient le jour. L'une des contributions scientifiques les plus discutées est la courbe environnementale de Kuznets (CEK par la suite) qui théorise le découplage absolu comme horizon du développement économique (Grossman et Krueger, 1995) en insistant sur deux effets : les progrès technologiques et le changement structurel. La **première sous-section** présente brièvement la démarche des travaux fondateurs avant de se concentrer sur la littérature portant sur la consommation d'énergie (2.1.). Une manière de prolonger les réflexions à *la Kuznets* consiste à utiliser l'analyse de décomposition d'index. En effet, cette dernière décompose l'évolution d'une variable, en l'occurrence la consommation d'énergie, en une série de facteurs. Il est ainsi possible d'estimer empiriquement la contribution des facteurs identifiés par la CEK à l'évolution de la consommation d'énergie. Notre **deuxième sous-section** présente ainsi une série de travaux utilisant la décomposition d'index appliquée à la consommation d'énergie (2.2.).

Plusieurs objectifs sont poursuivis ici. Le premier est d'observer si les résultats révèlent une contribution significative des facteurs mis en évidence par les promoteurs de la CEK. Par exemple, compte tenu de l'importance de l'efficacité énergétique pour les promoteurs de la croissance verte, il est important d'examiner si cette dernière est le premier facteur de réduction de la consommation d'énergie pour les pays qui parviennent à découpler. Selon la réponse à cette question, le découplage peut apparaître comme un horizon atteignable. Le second est de discuter de la robustesse des résultats. D'abord, en examinant la manière dont le type de décomposition retenue (le nombre de variables par exemple) influence les résultats. Ensuite, et plus fondamentalement, en interrogeant la capacité explicative de cette méthode.

2.1. La courbe environnementale de Kuznets : cadre théorique et résultats pour la consommation d'énergie

Lorsque l'on s'intéresse aux analyses qui fondent la perspective d'un découplage absolu, on est nécessairement amené à discuter de la courbe environnementale de Kuznets (Grossman et Krueger, 1995). Dans cette sous-section nous procédons en deux temps. Après avoir présenté les travaux fondateurs et la théorisation qui en résulte (2.1.1.), nous examinons la littérature sur les travaux relatifs à la consommation d'énergie (2.1.2.)

2.1.1. Les travaux fondateurs : démarche, résultats et théorisation

Originellement, la courbe de Kuznets fait référence aux travaux de l'économiste américain Simon Kuznets (1955) et résume la relation entre l'évolution du PIB (en abscisse) et l'évolution des inégalités de revenu (en ordonnées) sur une longue période. Kuznets pense observer une courbe en U inversé, c'est-à-dire que la croissance s'accompagne tout d'abord d'un accroissement des inégalités économiques mais que, passé un certain stade, sa poursuite s'accompagne d'une réduction du niveau d'inégalités. Cette théorisation est effectuée dans les années 1950, période de réduction des inégalités économiques propice à rendre crédible la relation. La trajectoire suivie depuis les années 1980 vient toutefois remettre en cause ces prédictions (Piketty, 2013). La courbe environnementale de Kuznets (CEK) étudie pour sa part la relation entre le PIB et les pressions environnementales au sens large : consommation de ressources naturelles diverses (renouvelables ou non) ou encore rejets polluants. Le parallèle avec Kuznets tient à la tendance que les auteurs pensent pouvoir observer : une courbe en U inversé. Dans un premier temps, les pressions environnementales augmenteraient avec la croissance puis, arrivé à un certain niveau, ces pressions tendraient à diminuer (voir figure 11) :

*« There is clear evidence that, although economic growth usually leads to environmental deterioration in the early stages of the process, in the end the best - and probably the only-way to attain a decent environment in most countries is to become rich. »
(Beckerman, 1992, p.482))*

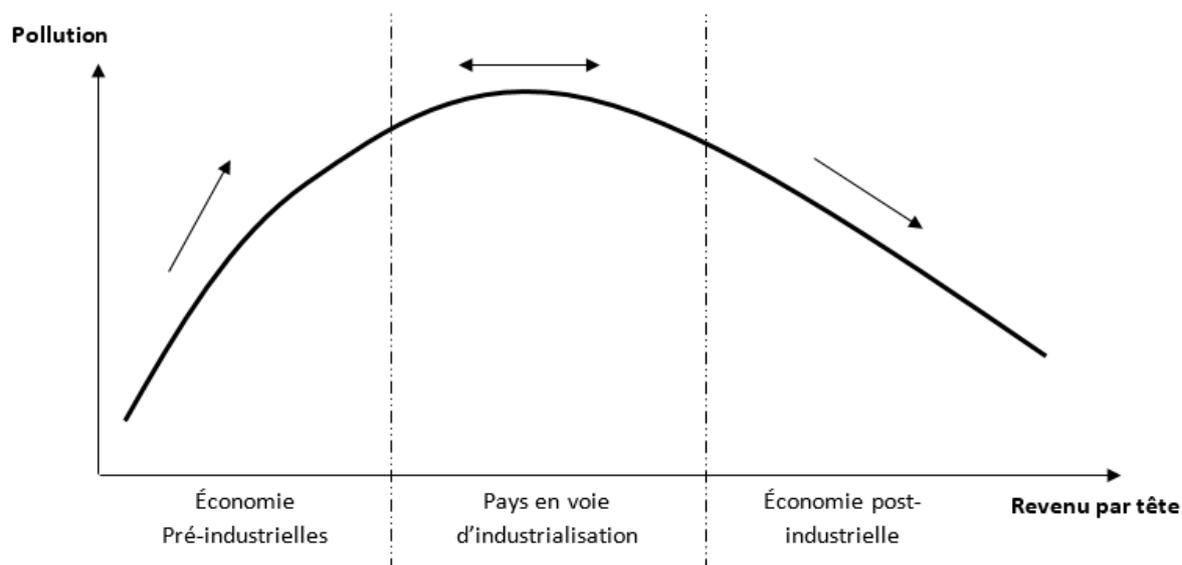


Figure 11. **La courbe environnementale de Kuznets.**
 Source : auteur

En 1992 les travaux de Beckerman sont spéculatifs, il faut attendre 1995 et les travaux de Grossman et Krueger pour avoir les premiers travaux empiriques confirmant cette relation. Dans leur article fondateur, les deux auteurs utilisent des données de panel établies par le Global Environmental Monitoring System (GEMS) pour :

- La pollution de l'air entre 1977-1988 (concentration en poussières pour 19 pays, concentration en SO₂ pour 42 pays).
- La pollution de l'eau entre 1979 et 1990 pour 58 pays (régime d'oxygène, présence de pathogènes et métaux lourds pour les rivières principalement).

La plupart du temps, ces travaux utilisent un modèle statistique reposant sur la méthode des moindres carrés où la dégradation environnementale (D) est liée au PIB (y) par l'équation (1) (Özokcu et Özdemir, 2017) :

$$D_{it} = \alpha + y_{it}\beta_1 + y_{it}^2\beta_2 + y_{it}^3\beta_3 + X_{it}\beta_4 + \epsilon_{it} \quad (1)$$

Avec α , une constante, X une variable contrôle, ϵ le terme d'erreur, t la date et i le pays en question. Le PIB (y) est également exprimé en forme quadratique (y^2) et cubique (y^3) afin de pouvoir envisager différentes formes de courbes. Là où le terme quadratique permet

d'envisager un retournement (U ou U inversé), le terme cubique permet d'envisager la forme N et N inversée (tableau 9). Dans le cas d'une relation linéaire (cas 1 et 2), les dommages augmentent (ou diminuent) à mesure que le PIB augmente. Dans le cas d'une forme en U, les dommages diminuent à mesure que le PIB augmente jusqu'à un point de retournement où les dommages se mettent à augmenter. A l'inverse, la courbe en U inversée correspond au scénario de la CEK : les pressions augmentent puis, à un moment donné, celles-ci diminuent. Enfin, la courbes en N (et N inversé) permet de considérer des situations où les pressions augmentent (diminuent) dans un premier temps, puis diminuent (augmentent) temporairement, puis finissent par réaugmenter (rediminuer).

Relation observée entre les dommages (D) et le PIB (y)	β_1	β_2	β_3
1- Linéaire croissante	>0	0	0
2- Linéaire décroissante	<0	0	0
3- U inversé : croissante puis décroissante (CEK)	>0	<0	0
4- U : décroissante puis croissante	<0	>0	0
5- N : croissante, décroissante puis re-croissante	>0	<0	>0
6- N inversé : décroissante, croissante puis re-décroissante	<0	>0	<0

Tableau 9. **Relation observée entre les dommages et le PIB selon la valeur des coefficients de régression.**

Source : auteur.

En matière de qualité de l'air, les auteurs montrent une relation linéaire décroissante pour les particules lourdes et une courbe en U inversé pour le SO₂ et les particules fines. Notons que, pour ces deux pollutions, le point de retournement se situe à 4000 \$ US et 6000 \$ US. Pour le SO₂, une légère ré-augmentation est toutefois observée autour de 16000 \$, suggérant une courbe en N. En matière de qualité de l'eau, la relation est de type en U inversé mais avec un basculement autour de 8000 \$ US.

De telles relations sont également observées par d'autres auteurs. Parmi une batterie d'indicateurs environnementaux, Shafik and Bandyopadhyay (1992) montrent que cela est le cas pour la déforestation et les oxydes de soufre ainsi que les matières en suspension dans l'eau. De même, Selden et Song (1994) trouvent des points de basculement à 8700\$ pour le SO_2 , 11200\$ pour les oxydes d'azote (NO_x) et 5600\$ pour le monoxyde de carbone (CO).

Interprétation de ces résultats

D'après ces auteurs, cette forme en U inversé s'expliquerait par la combinaison de différents effets. Tout d'abord, il y aurait un *effet d'échelle*. Les auteurs reconnaissent volontiers que l'augmentation du PIB se traduit, toutes choses égales par ailleurs, par une augmentation des pressions environnementales. Cependant, cet effet est plus ou moins contrebalancé par plusieurs effets contraires.

D'abord, *l'effet de composition*, selon lequel une société qui s'enrichit change progressivement la structure de ce qui y est produit. On aurait progressivement un déplacement des productions agricoles vers les productions industrielles puis vers les services. Cet effet de composition serait ainsi favorable à la réduction des dégradations environnementales. De même de *l'effet technologique*. A mesure qu'une société se développe, elle peut consacrer des ressources croissantes à la recherche et à l'innovation technologique permettant d'abaisser les pressions environnementales par unité de produit.

Ces effets propres aux conditions de production seraient accompagnés de modifications dans les comportements des citoyens-consommateurs. Du côté des consommateurs, d'abord, l'environnement ferait petit à petit irruption dans leurs fonctions d'utilité. La préservation de l'environnement pourrait ainsi être vue comme un bien supérieur au même titre que la santé, c'est-à-dire que sa consommation augmenterait plus proportionnellement que le revenu. Du côté des citoyens, ensuite, ces préférences se traduiraient politiquement sous forme d'un vote accru ou de pressions en faveur de gouvernements prenant en compte l'environnement. Les politiques environnementales seraient alors favorisées à mesure que le pays s'enrichit. Pour Grossman et Krueger, cette dimension politique joue un rôle crucial :

*« There is no reason to believe that the process has been an automatic one. In principle, environmental quality might improve automatically when countries develop if they substitute cleaner technologies for dirtier ones, or if there is a very pronounced effect on pollution of the typical patterns of structural transformation. [...] a review of the available evidence on instances of pollution abatement suggests that **the strongest link between income and pollution in fact is via an induced policy response**. As nations or regions experience greater prosperity, their citizens demand that more attention be paid to the noneconomic aspects of their living conditions »*
(Grossman et Krueger, 1995, p.371).

A terme, la combinaison des différents effets permettrait de contrarier l'effet volume de la production. Les pressions environnementales pourraient alors être réduites et ainsi découplées de manière absolue du PIB réel.

2.1.2. Applications au cas de la consommation d'énergie : the Energy-Environmental Kuznets Curve (EEKC)

Les travaux fondateurs ne s'intéressent pas directement à la question de l'énergie. Seuls Shafik et Bandyopadhyay (1992) analysent, début 1990, la trajectoire du CO₂ permettant de faire un lien à la question des ressources énergétiques. A partir d'un panel de 149 pays entre 1960 et 1989, ils montrent que la relation entre le CO₂ et le revenu par tête suit une relation linéaire croissante. Il faut attendre 1998 pour la première étude consacrée à l'énergie (Suri et Chapman, 1998). Les auteurs justifient leur intérêt pour la consommation d'énergie au motif qu'elle est liée de manière évidente à certaines pollutions (comme les émissions de CO₂). De plus, étant consubstantielle à toute activité humaine, l'énergie est une bonne mesure de l'emprise des humains sur leur milieu. Elle permettrait d'adresser certaines critiques arguant que les résultats de la CEK généralement conduite à partir d'un seul polluant, négligent la substitution entre pressions environnementales (Caviglia-Harris, Chambers et Kahn, 2009 ; Stern, 2004). L'utilisation de séries de consommation d'énergie résoudrait ce problème puisqu'elle indique la capacité à transformer et à modifier les écosystèmes. D'autres travaux intègrent l'énergie comme variable de contrôle (variable X de l'équation 1), par exemple, lorsque le CO₂ est la variable dépendante sélectionnée. Dans cette sous-section, nous nous focalisons sur les travaux qui utilisent l'énergie comme variable dépendante.

Suri et Chapman produisent différents modèles économétriques pour rendre compte de l'évolution de la consommation d'énergie primaire de 33 pays sur 20 ans (1971-1991). Dans le cas du premier modèle économétrique de base utilisé par Grossman et Krueger, les auteurs mettent en évidence une croissance non linéaire aboutissant tendanciellement à un maximum, appelé point de retournement, à 55 535 \$ US. C'est effectivement le montant théorique de PIB par tête à partir duquel la consommation d'énergie pourrait baisser. Cependant, les auteurs ne sont pas satisfaits par ce 2^e terme (le PIB au carré) qu'ils qualifient de « catch all term, GDPSQ⁴³ ». En effet, ce terme est censé rendre compte du changement structurel mais sans véritable distinction entre un progrès technologique, un changement dans les goûts des consommateurs ou une nouvelle spécialisation productive au sein de la division internationale du travail. C'est la raison pour laquelle ils testent également d'autres modèles économétriques plus fins où l'effet du commerce international est spécifié. Pour ce faire, ils ajoutent à l'équation deux nouveaux termes : la part des biens industriels importés et la part des biens industriels exportés. L'inclusion de ces deux variables à l'équation de base donne un point de retournement très élevé à 143 806\$ de PIB par tête, très au-delà des niveaux de PIB de l'échantillon. En définitive, le commerce international joue un rôle important à côté du changement structurel dans l'aplatissement de la courbe énergétique de Kuznets. Pour les pays industrialisés, une hausse de 10% dans le ratio biens manufacturés importés/biens manufacturés produits domestiquement se traduit par une baisse de 1,3 à 1,7% de la consommation d'énergie.

Dix ans plus tard, Luzzati et Orsini (2009) déplorent le manque de travaux portant sur l'énergie⁴⁴. Leur étude présente l'originalité de croiser différents niveaux d'analyse : le monde traité comme une unité économique, les pays pris individuellement et les pays pris collectivement. A partir d'un panel de 113 pays (soit 95% de la population mondiale) sur la période 1971-2004, ils parviennent aux conclusions suivantes :

- Si l'on prend le PIB mondial et la consommation d'énergie mondiale, la relation est croissante et linéaire avec une rupture structurelle en 1990 où le coefficient directeur (l'élasticité donc) est réduit.

⁴³ Abréviation anglaise de Gross Domestic Product Square c'est-à-dire PIB à la forme quadratique.

⁴⁴ "Energy has been scarcely explored in the Environmental Kuznets curve (EKC) debate" (p.291).

- Au niveau des pays pris individuellement, même constat, il n’y a pas d’évidence d’une CEK : aucun pays n’a une structure en forme de U inversé telle que suggérée par Grossman et Krueger.
- Les données de panel produisent des conclusions similaires. Une fois les données aberrantes retirées (*outliers*), l’effet du temps apprécié, les auteurs concluent que « les potentiels bénéfiques de la croissance économique sur l’environnement ne se sont pas manifestés » (p.298).

Les travaux portant sur l’énergie restent peu nombreux relativement à ceux portant sur le CO2 par exemple. Néanmoins, les quelques travaux contemporains, résumé de manière synthétique dans le tableau 10, ont plutôt tendance à conforter ces premiers résultats. En effet, les seuls éléments allant dans le sens de l’existence d’une CEK sont apportés par Aruga (2019), pour le groupe de pays riches d’Asie Pacifique, par Shahbaz et al. (2021) pour 20 des 30 provinces chinoises étudiées, et par Nordin et Sek (2021) pour l’ensemble de leur panel.

Le résultat de ces trois études, leur divergence avec les autres quant à l’existence de la CEK, peut s’expliquer par plusieurs facteurs : le choix de l’indicateur pour mesurer la consommation énergétique, l’horizon temporel et les pays retenus, mais également les variables de contrôle considérées dans l’équation.

Auteurs et année	Variables retenues	Régions et période	Méthode utilisée	Résultats
Suri et Chapman (1998)	Consommation d'énergie, PIB, part des biens industriels importés et exportés	33 pays (1971-1991)	Données de panel, régression paramétrique (quadratique et cubique)	Relation linéaire
Luzzati et Orsini (2009)	PIB par tête, consommation d'énergie	113 pays (1971-2004)	Données de panel, Estimations paramétriques et semi-paramétriques	« Lack of evidence for an energy-EKC both at the world level and at the single country level”
Pablo-Romero et De Jesús (2016)	PIB, consommation d'énergie	22 pays d'Amérique Latine (1990-2011)	Données de panel, régression paramétrique (cubique et quadratique)	CEK rejetée, surcouplage
Aruga (2019)	PIB par tête et consommation d'énergie par tête	19 pays d'Asie-Pacifique (1984-2014)	Données de panel, régression et co-intégration	Seulement pour le groupe de pays à hauts revenus. ECK rejetée pour les groupes à revenus intermédiaires et à faibles revenus
Shahbaz, Shafiullah, Khalid et Song (2020)	PIB par tête, consommation d'énergie par tête	30 provinces chinoises (1980-2018)	Données de panel, régressions non paramétrique, co-intégration	Diversité des trajectoires selon les provinces : linéaire, U, U inverse (EKC) mais aussi formes intriquées de type S, M, W
Nordin et Sek (2021)	PIB, intensité énergétique	Panel de pays importateurs et exportateurs de pétrole (2000-2014)	Modèles MG, CCEMG and AMG	CEK valide pour les deux groupes de pays
Mahmood et al. (2021)	PIB, consommation d'énergie	Egypte (1965-2019)	Technique de coéintégration ARDL	Courbe en N

Tableau 10. **Résultats de la littérature quant à l'existence d'une CEK en matière d'énergie.**

Source : auteur.

Pour ce qui est de l'indicateur, les deux premières études utilisent, non pas la consommation d'énergie totale, mais *la consommation par tête*, tandis que le troisième utilise *l'intensité énergétique du PIB*. Ces choix sont discutables dans la mesure où, d'un point de vue environnemental, c'est la consommation en *valeur absolue* qui est déterminante. En retenant l'énergie par tête, la pression environnementale sur les écosystèmes est en quelque sorte « diluée » par la population. Même si le PIB est lui-même rapporté à la population, ce biais ne disparaît pas totalement, comme l'illustre le tableau 11. Par exemple, dans le cas 1, lorsque la croissance de la population est inférieure à celle du PIB mais supérieure à la consommation d'énergie, un découplage absolu est observé. Si la croissance de la population avait été plus faible que celle de la consommation d'énergie, le découplage n'aurait été que relatif. A l'inverse, on peut remarquer qu'avec les mêmes données fictives, le choix de Luzzati et Orsini de prendre le PIB/habitant et la consommation d'énergie en valeur absolue conduit à observer un surcouplage.

Variable	Cas 1	Cas 2
PIB	+3%	+3%
Consommation d'énergie	+2%	+2%
Population	+2,5%	+1%
PIB/habitant	+0,48%	+1,98%
Consommation d'énergie/habitant	-0,48%	+0,99%

Relation entre $\frac{\text{PIB}}{\text{habitant}}$ et $\frac{\text{consommation d'énergie}}{\text{habitant}}$ (<i>Shahbaz et al., (2020), Aruga, (2019)</i>)	Découplage absolu (CEK)	Découplage relatif
Relation entre PIB et consommation d'énergie (<i>Suri et Chapman (1998) ; Pablo-Romero et De Jesús (2016) ; Mahmmod et al. (2021)</i>)	Découplage relatif	Découplage relatif
Relation entre $\frac{\text{PIB}}{\text{habitant}}$ et consommation d'énergie (<i>Luzzati et Orsini, 2009</i>)	Surcouplage	Surcouplage

Tableau 11. **Comparaison du découplage selon les agrégats de PIB et de consommation d'énergie retenus.**

Source : auteur.

Le choix de l'intensité énergétique pour apprécier la CEK est plus problématique. En effet, apprécier le découplage suppose une *baisse absolue* de la consommation d'énergie. Or une baisse de l'intensité énergétique peut correspondre à une situation de découplage relatif. Un découplage absolu suppose une baisse de l'intensité énergétique à un rythme supérieur à celui où le PIB croît. Par exemple, si le PIB croît de 2% par an et que l'intensité énergétique du PIB (E/PIB) diminue de 1% par an, alors la consommation d'énergie augmente de 1%. Ce n'est qu'avec une baisse de l'intensité supérieure à 2% par an que la consommation d'énergie est

réduite. Par conséquent, le travail de Nordin et Sek (2021), ne peut pas être retenu pour évaluer la possibilité d'un découplage.

Au niveau des pays retenus, on peut remarquer que l'étude de Aruga conclut à l'existence de la CEK pour les pays riches du panel sur la période 2000-2014. Chez Shahbaz et al. (2020), l'analyse détaillée du type de provinces chinoises ayant une trajectoire de type CEK, leurs caractéristiques économiques, notamment leur spécialisation économique, mériteraient d'être précisés.

Une autre source de divergence peut s'observer dans le choix des *variables de contrôle* ajoutée au PIB quadratique et cubique (cf. équation 1). Suri et Chapman, par exemple, ajoutent comme variable de contrôle la part des biens industriels dans les exportations et importations, considérant que le commerce international est susceptible d'intervenir dans la physionomie de la courbe d'un pays. En effet, la structure d'une économie, qui est l'un des effets identifiés par Grossman et Krueger pour expliquer la courbe en U inversé, résulte en partie de l'insertion dans le commerce international. En l'espèce, si Grossman et Krueger (1995) reconnaissent le rôle que peut jouer le commerce international sur les résultats obtenus⁴⁵, ils estiment que cet effet est plutôt faible et, en conséquence, ne contrôle pas cette variable.

Un premier niveau de débat consiste donc à voir si les variables de contrôle retenues sont pertinentes. Contrôler les biens industriels importés semble pertinent au regard de l'objectif de cerner le changement structurel dans sa « pureté ». A l'inverse, la littérature CEK relative aux émissions de CO2 offre un bon exemple d'une variable dont l'ajout est plus discutable. De nombreux articles intègrent la consommation d'énergie comme variable de contrôle (par exemple Ahmed et Long, 2012 ; Bölük et Mert, 2014 ; Ozturk et Al-Mulali, 2015 ; Shahbaz, Mutascu, et Azim, 2013). Pourtant, en la matière, chercher une CEK, en raisonnant à consommation d'énergie égale, n'a pas grand sens. La consommation d'énergie étant responsable de 2/3 des émissions, cela revient à explorer l'effet du PIB sur le tiers restant.

Cela nous conduit à un deuxième niveau de débat : l'ajout de variables de contrôles censées, elles aussi, expliquer le dommage environnemental étudié est-il pertinent ? Si l'on

⁴⁵ « à mesure que les pays se développent, ils cessent de produire certains biens intensifs en pollution et commencent à importer ces biens d'autres pays qui ont des protections environnementales plus faibles » (p.372).

on croit Luzzati et Orsini, l'évaluation de la CEK nécessite de se cantonner aux différentes formes du PIB (simple, quadratique et cubique) :

*« The reason for using per capita income as the only regressor and not controlling for any other regressor arises from the wish to adhere closely to the EKC story. We do not claim that no other explanatory variables should be used. This, however, would fall with in a different line of research—the line aimed at understanding the determinants of environmental pressures »
(Luzzati et Orsini, 2009, p.292)*

Et les deux auteurs de préciser :

*« The EKC story is explicitly acknowledged as a black box relationship between income per capita and environmental state/pressures, that is, as a reduced form that arises from a complicated web of determinants and relationships. »
(Ibid, p.291)*

On trouve ici une des limites fondamentales du recours à la méthode originelle de Grossman et Krueger. Même si la courbe en U inversé est observée dans certains cas, comme pour certaines provinces chinoises, il n'est pas possible de savoir quels effets sont à l'œuvre, et plus précisément, si les effets énoncés par Grossman et Krueger – effet technologique et effet de structure – sont bien ceux à l'origine du découplage.

En résumé, pour les théoriciens de la courbe environnementale de Kuznets, une croissance verte est possible dans la mesure où, à terme, la technologie et le changement de structure de l'économie sont censés compenser les effets négatifs sur l'environnement d'une croissance des volumes produits. Les travaux issus de ce champ de recherche se sont ainsi focalisés sur l'existence d'une courbe en U inversé en tant que manifestation de cette trajectoire. En matière d'énergie, la majorité des travaux récents concluent à l'absence d'une telle trajectoire tandis que ceux concluant à son existence présente des spécificités susceptibles de biaiser le résultat (intensité énergétique, variables rapportées à la population). Plus fondamentalement, cette démarche de recherche est limitée. Même si, à l'avenir, la CEK apparaissait empiriquement, il serait toujours impossible de juger si les facteurs à l'œuvre sont ceux énoncés par Grossman et Krueger. C'est pourquoi d'autres méthodes revendiquant un caractère plus explicatif ont été progressivement adoptées. L'une des plus utilisées par la

littérature sur le découplage est l'analyse de décomposition d'index (Index Decomposition Analysis ou IDA, en anglais) que nous allons maintenant présenter.

2.2. Le regard porté par l'Index Decomposition Analysis sur la dynamique de la consommation d'énergie

Pour mesurer les différents effets à l'œuvre, il est commun dans la littérature en économie de l'environnement d'utiliser des décompositions d'index (Ang, Xu et Su, 2015 ; Ang et Zhang, 2000). Dans cette section, nous présentons la démarche et les résultats des décompositions classiques (2.2.1.) avant d'aborder des décompositions plus fines (2.2.2). Pour finir, nous discutons la capacité explicative de cette méthode à partir de la littérature consacrée aux effets rebonds (2.2.3.)

2.2.1. L'analyse de décomposition d'index : démarche et usage pour expliquer le découplage absolu

Popularisée par le GIEC, l'équation de Kaya⁴⁶ permet d'illustrer la démarche de la décomposition d'index. Il s'agit de décomposer sous la forme d'une identité comptable, une variable, ici le CO₂, en plusieurs facteurs dont la contribution est, par construction, égale à la variation du phénomène étudié. Ainsi l'équation de Kaya décompose le CO₂ de la sorte :

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} * \frac{E}{PIB} * \frac{PIB}{population} * population$$

Avec CO₂ les quantités de CO₂ émises et E la quantité d'énergie consommée. Ces équations présentent l'évolution des émissions de CO₂ comme le produit de 4 facteurs :

- Une intensité carbone de l'énergie utilisée ($\frac{CO_2}{E}$),

⁴⁶ Proposée par Kaya et Yokobori (1998), cette équation rejoint une autre plus ancienne, développée dans les années 1970, l'équation IPAT (Ehrlich et Holdren, 1971) où l'impact (I) est analysé comme la résultante du niveau de vie (A pour affluence), de la population (P) et du niveau donné de la technologie (T).

- Une intensité en énergie du PIB, généralement assimilée à l'efficacité énergétique ($\frac{E}{PIB}$),
- Un niveau de vie par habitant et une population, ces deux derniers facteurs pouvant être associés à l'effet « volume de l'économie ». On voit spontanément que toute décomposition est en quelque sorte arbitraire puisqu'il est possible de décomposer un agrégat en autant de facteurs que l'on veut, à condition que l'identité comptable soit respectée. Il faut donc être en mesure de justifier théoriquement l'intérêt de la décomposition retenue.

Dans le cas de l'énergie, la décomposition classique prend la forme suivante :

$$E = PIB * \frac{E}{PIB} * \sum \frac{PIBi}{PIB}$$

Avec PIB, l'effet volume lié à la croissance du PIB, E/PIB l'intensité énergétique du PIB et $PIBi/PIB$, l'effet de composition ($PIBi$ désignant ici la production du secteur i).

Parfois, l'effet volume est divisé, comme dans l'équation de Kaya, en deux sous-effets : le PIB par tête et la population. Cette décomposition se justifie au motif qu'elle permettrait de saisir la contribution du progrès technologique, du changement structurel dans ce qui est produit et consommé ($\frac{PIBi}{PIB}$) et du volume produit (population et niveau de vie par tête). Cette décomposition permet en quelque sorte de venir mesurer les effets censés jouer d'après la CEK.

Le principe d'une décomposition est simple. Comme il s'agit d'une identité comptable, par définition toujours vraie, la croissance de la variable que l'on cherche à expliquer peut être décomposée en contribution des différents agrégats. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour décomposer. Elles sont diverses et nous n'entrerons pas dans le détail. Simplement, on peut dire qu'initialement la méthode de Laspeyres était la plus utilisée et qu'elle a été peu à peu remplacée par la méthode LMDI qui s'est désormais imposée, notamment par sa capacité à éliminer le résidu (Ang, 2004).

Avec cette méthode, il est donc possible d'évaluer la contribution des facteurs identifiés par la CEK. Un usage possible consiste à analyser les déterminants de la consommation d'énergie des pays qui découplent de manière absolue pour voir si ce sont ces

facteurs qui sont à l'œuvre. Par exemple, le Royaume-Uni sur la période 1997-2013 a réduit sa consommation d'énergie domestique de 11% (Hardt et al., 2018), de même de la Suisse qui l'a réduite de 4% par an entre 2001 et 2011 (Moreau et Vuille, 2018). Symétriquement, l'exercice présente un intérêt pour les pays qui connaissent une forte hausse de leur consommation d'énergie pour saisir les facteurs responsables de cette forte croissance. C'est le cas par exemple de la Chine (Ang, Xu et Su, 2015 ; Zhang et Lahr, 2014) qui, entre 2002 et 2009, a vu sa consommation doubler (Kahrl, Roland-Holst et Zilberman, 2013) ou encore de l'Inde avec qui elle représente deux tiers de l'augmentation de la consommation d'énergie mondiale entre 2000 et 2012 (Wang et Li, 2016).

Dans cette section, nous nous concentrons sur les pays assurant un découplage absolu. Nous présentons les résultats obtenus à partir des décompositions classiques⁴⁷ avant de montrer l'intérêt de décompositions plus fines (2.2.2).

Le cas des pays européens entre 2001 et 2008

Entre 2001 et 2008, l'Union européenne à vingt-sept pays n'a pas réalisé de découplage absolu, la consommation d'énergie ayant progressé de 2,24% sur la période. En effet, d'après Fernandez Gonzalez et al. (2014), la croissance du niveau d'activité est venue tirer la consommation d'énergie (+14,8%) sans que cela soit totalement compensé par les progrès de l'efficacité énergétique (-12,8%). A l'inverse des prédictions de la CEK, l'effet structurel a, sur cette période, contribué positivement à la consommation d'énergie (+2,03%).

Cependant, pris individuellement, six pays ont connu un découplage absolu : la Belgique, la France, les Pays-Bas, la Slovaquie, la Suède et le Royaume-Uni. Les résultats de la décomposition classique à trois facteurs (niveau d'activité, structure, et intensité énergétique) sont donnés dans le tableau 12 (Fernández González, Landajo et Presno, 2014). Pour ces six pays, l'effet technologique permet de découpler mais seuls trois de ces pays ont une trajectoire de type CEK (l'effet technologique et l'effet de structure contribuent tous les deux à la réduction de la consommation d'énergie).

⁴⁷ On entend par classique une décomposition ternaire avec effet activité, structure et intensité, éventuellement complétée par un effet population.

	Activité	Structure	Intensité	Total
Belgique	1,00453	0,99952	0,99447	0,95448
France	1,01871	0,99175	0,98886	0,99302
Pays-Bas	1,00611	0,99745	0,99637	0,99685
Slovaquie	1,00127	1,00299	0,99556	0,97865
Suède	1,00398	1,00050	0,99420	0,95467
Grande-Bretagne	1,01816	1,00513	0,97161	0,95768
UE27	1,14872	1,02037	0,87231	1,02245

Tableau 12. **Décomposition multiplicative⁴⁸ de la consommation d'énergie pour six pays européens assurant un découplage absolu.**

Source : Auteur. Données : Fernandez Gonzalez et al. 2014, p.581

Nous allons maintenant voir la sensibilité de ces résultats au type de décomposition retenue. Les cas britannique et suisse permettent d'illustrer le propos.

2.2.2. La nécessité de décompositions plus fines

Le cas de la Grande-Bretagne (1997-2013)

Hardt et al. (2018) étudient les déterminants de la consommation d'énergie sur la période 1997-2013. La consommation d'énergie de ce pays a en effet baissé de 11% sur la période soit une baisse de 10 000ktoe. Pour étudier les déterminants de la consommation d'énergie, les auteurs se focalisent sur les secteurs productifs⁴⁹ et proposent deux types de décomposition : une classique qui décompose en quatre effets (technologique, structure, volume par tête et volume) et une décomposition plus fine à six facteurs.

⁴⁸ Dans la décomposition multiplicative, la contribution d'un facteur est à multiplier par celle des autres pour obtenir la contribution totale, là où, dans une décomposition additive, la contribution des différents facteurs sont ajoutées les unes aux autres pour obtenir l'effet total.

⁴⁹ Cela comprend les secteurs industriels et non industriels mais exclut les ménages ainsi que les transports. Les secteurs retenus sont responsables de 31% de la consommation d'énergie domestique mais, surtout, de deux tiers des économies d'énergie sur la période étudiée. Une étude restreinte à ces seuls secteurs reste donc pertinente pour apprécier les dynamiques à l'œuvre.

D'après la première décomposition (figure 12), les progrès de l'efficacité énergétique apparaissent comme le principal moteur (environ -20000ktoe) de la réduction d'énergie devant l'effet de composition (environ 7000ktoe).

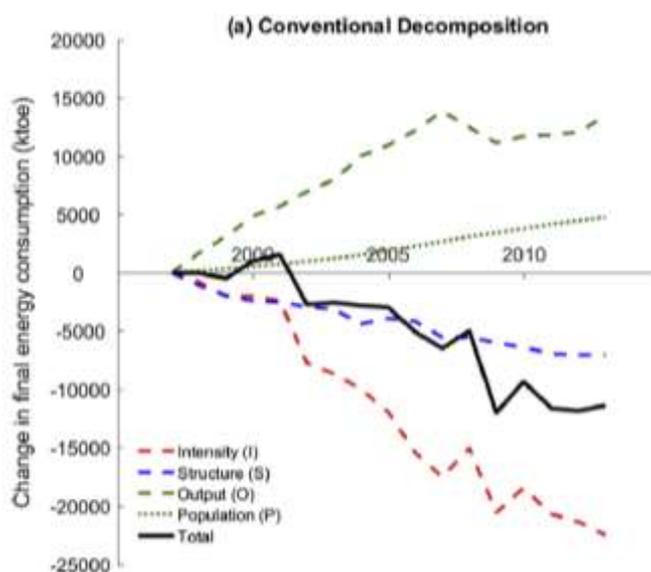


Figure 12. **Décomposition conventionnelle de la consommation d'énergie des secteurs productifs anglais (1997-2013)**

Source : Hardt et al. (2018, p.129)

Si l'on s'en tient à cette décomposition, le découplage absolu apparaît comme une perspective atteignable : les effets mentionnés par la CEK sont à l'œuvre. Cette conclusion est toutefois hâtive. En effet, en la matière, il est nécessaire de questionner la pertinence de la décomposition, voir si les variables retenues peuvent rigoureusement être interprétées. Prenons l'intensité énergétique du PIB. Celle-ci est fréquemment utilisée comme proxy de l'efficacité énergétique, d'un progrès technique permettant de sauvegarder de l'énergie. Pourtant d'autres facteurs sont susceptibles de modifier ce ratio. Par exemple, un pouvoir de marché plus fort dans les chaînes de valeur peut conduire à augmenter la valeur ajoutée générée à consommation d'énergie donnée. De même, le terme changement structurel est relativement vague car il ne permet pas de distinguer entre un changement résultant d'une modification de la demande domestique de celui provenant d'une modification dans la spécialisation productive de l'économie⁵⁰. De plus l'ampleur de cet effet sera sensible au degré

⁵⁰ Dans ce cas, l'économie nationale se restructure pour répondre aux changements dans les goûts des consommateurs domestiques. Dans l'autre, l'économie nationale se restructure mais les consommateurs domestiques maintiennent leurs habitudes de consommation. Ce sont les importations qui permettent alors de

de désagrégation sectoriel retenu⁵¹. Conscients de ces difficultés, Hardt et al. proposent une décomposition étendue, plus fine du phénomène.

Là où la décomposition conventionnelle s'écrit :

$$E = \sum \frac{Ei}{Xi} * \frac{Xi}{X} * \frac{X}{P} * P$$

Avec E la consommation d'énergie finale, X la production et P la population, i le secteur, on a

$\frac{Ei}{Xi}$ l'effet technologique (noté I pour *intensité*), $\frac{Xi}{X}$ l'effet de structure (S), et $\frac{X}{P}$ le produit par tête (noté O pour Output) qui combiné à P donne « l'effet volume »

La nouvelle décomposition s'écrit :

$$E = \sum \frac{Ei}{UEi} * \frac{UEi}{Xi} * \frac{Xi}{Gi} * \frac{XGi}{Y} * \frac{Y}{P} * P$$

Avec E l'énergie finale, UE l'énergie utile, Xi la production du secteur i, XGi la production du secteur i incorporée à la demande finale, Y le PIB et P la population.

Ces nouveaux agrégats retenus supposent quelques explications. L'idée des auteurs est, tout d'abord, d'identifier rigoureusement ce que l'on appelle l'efficacité énergétique (voir encadré 1). Conformément aux enseignements de la thermodynamique, l'efficacité énergétique est définie comme l'efficacité avec laquelle l'énergie finale (comme le carburant, l'électricité) est convertie en énergie utile (c'est-à-dire un usage énergétique, en sortie d'appareil). Par exemple, si 1kWh d'électricité donne 0,7kWh de lumière à la sortie de l'ampoule, alors le ratio d'efficacité est de 0,7. Si plus de lumière parvient à être générée avec la même quantité d'énergie, alors le ratio augmente 0,8. 80% de l'électricité a été utilisé de manière productive en lumière contre 70% auparavant : il y a véritablement eu progrès dans l'efficacité énergétique, mesurée à partir d'une mesure physique. Notons que dans l'équation retenue, afin de préserver l'identité comptable, les auteurs utilisent l'inverse de l'efficacité énergétique ($\frac{Ei}{UEi}$).

continuer à satisfaire la demande domestique. Dans les raisonnements de la CEK, le premier effet est censé être le plus déterminant.

⁵¹ Plus le découpage entre secteurs est fin, plus la contribution des effets structurels aura tendance à être forte.

Encadré 1. La mesure de l'efficacité énergétique d'après le Exergy Economics Network

L'efficacité énergétique admet plusieurs définitions. De manière simple, on peut considérer qu'il s'agit de faire mieux avec une quantité équivalente d'énergie ou bien faire la même chose avec moins d'énergie. Pour être un peu plus rigoureux dans la définition, il est nécessaire de se pencher sur les lois de la thermodynamique et plus particulièrement sur le concept d'entropie.

D'après la thermodynamique, l'énergie n'est ni créée ni détruite, elle est transformée (1^{re} loi)⁵². Par exemple, un morceau de charbon brûlé prend la forme de chaleur progressivement dispersée. Toutefois, dans le même temps, cette transformation entraîne un processus de dégradation qualitatif bien illustré avec le cas du charbon : la chaleur générée est progressivement dispersée et inutilisable. Ce second mouvement est appelée entropie et constitue la 2^{nde} loi de la thermodynamique. De ce point de vue, l'efficacité énergétique désigne à quel point un appareil est efficace dans la conversion de l'énergie. Par exemple, un moteur plus performant limite la partie de l'énergie dissipée sous forme de chaleur inutile et maximise la part utile qui devient de l'énergie mécanique.

Schématiquement, il existe trois stades de l'énergie. 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. Une troisième mesure de l'énergie peut être ajoutée à cette typologie, en s'intéressant à l'énergie délivrée par les appareils que les consommateurs finaux utilisent (l'énergie utile, appelée aussi « travail utile »), laquelle s'approche le plus de l'idée de services énergétiques (Figure 13).

⁵² Pour plus de détail voir la section 2.1 du chapitre 2 où les principes de la thermodynamique sont présentés.

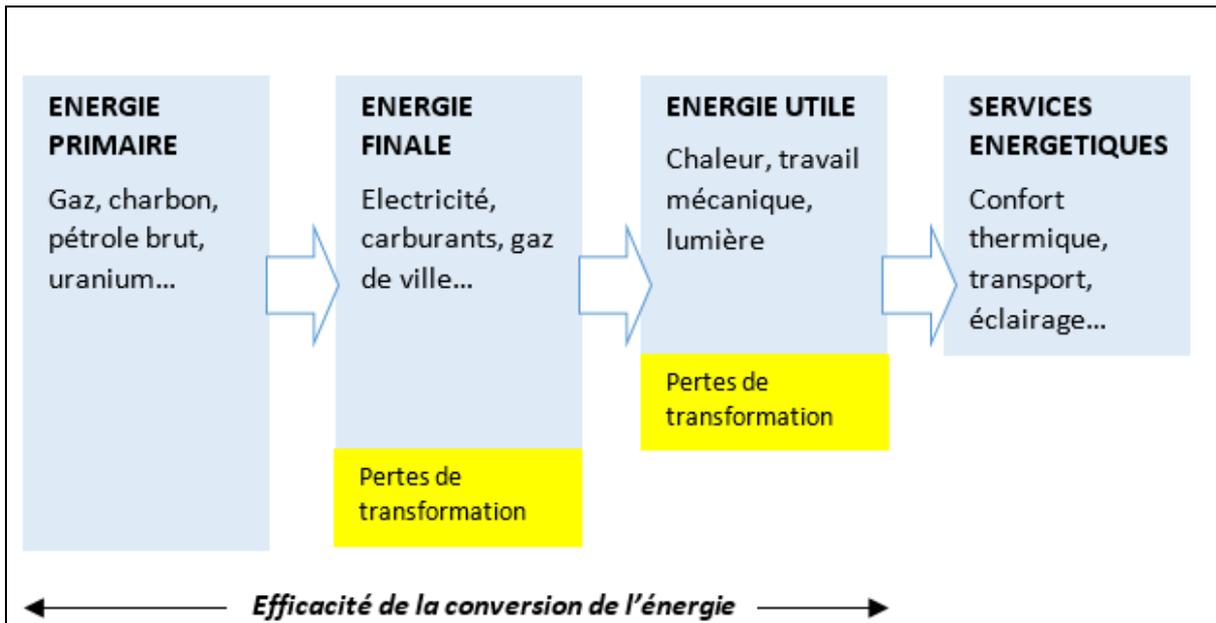


Figure 13. **Les différents stades de l'énergie.**
Source : Auteur.

Outre la différence dans le stade de l'énergie retenue, une démarche agrégative doit prendre en compte les différences de qualité. Par exemple, l'énergie qui prend la forme de chaleur n'est pas équivalente à celle qui prend la forme d'un 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, p.112). Ainsi 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 1kWh de chaleur à 30 degrés sera 0,066kWh.

En résumé, le concept **d'énergie utile** est en définitive ce qui s'approche le plus de l'idée de services énergétiques recherchés par les utilisateurs finaux des appareils. Le passage à l'**exergie utile** nous permet d'agréger ces flux d'énergie utile dont la qualité peut être différente. Si les données sur l'énergie finale sont accessibles et produites par l'IEA, les données sur l'exergie utile commencent à être disponibles grâce au travail de quelques pionniers (Ayres et Warr, 2009) rejoints désormais par tout un réseau (le exergy economic network). Depuis, de plus en plus de pays ont été couverts. Pour y parvenir, ces auteurs

identifient les différents usages de l'énergie et les flèchent. Par exemple, de l'essence est utilisée par les moteurs diesel pour un usage de « déplacement » (traduction de « mechanical drive »). On estime l'efficacité de ce processus, ce qui permet de déduire une quantité d'exergie utile. Même chose pour l'usage final « température » (qui plus précisément peut se décomposer en température élevée, moyenne et basse). Par exemple, dans le cas du carburant utilisé pour produire de la chaleur de haute température (500°C), l'efficacité de la conversion est comprise selon les pays entre 58 et 71% (Serrenho et al., 2014). Dit autrement, 1KWh d'essence par exemple permet de générer entre 0,58 et 0,71KWh de chaleur à 500°C. En procédant de la sorte pour chaque énergie finale et chaque usage possible, il est possible d'obtenir la quantité totale de services énergétiques. Pour illustrer le propos, la figure 14 présente l'exergie utile totale, par catégorie d'usage, générée dans quinze pays de l'Union européenne entre 1960 et 2009.

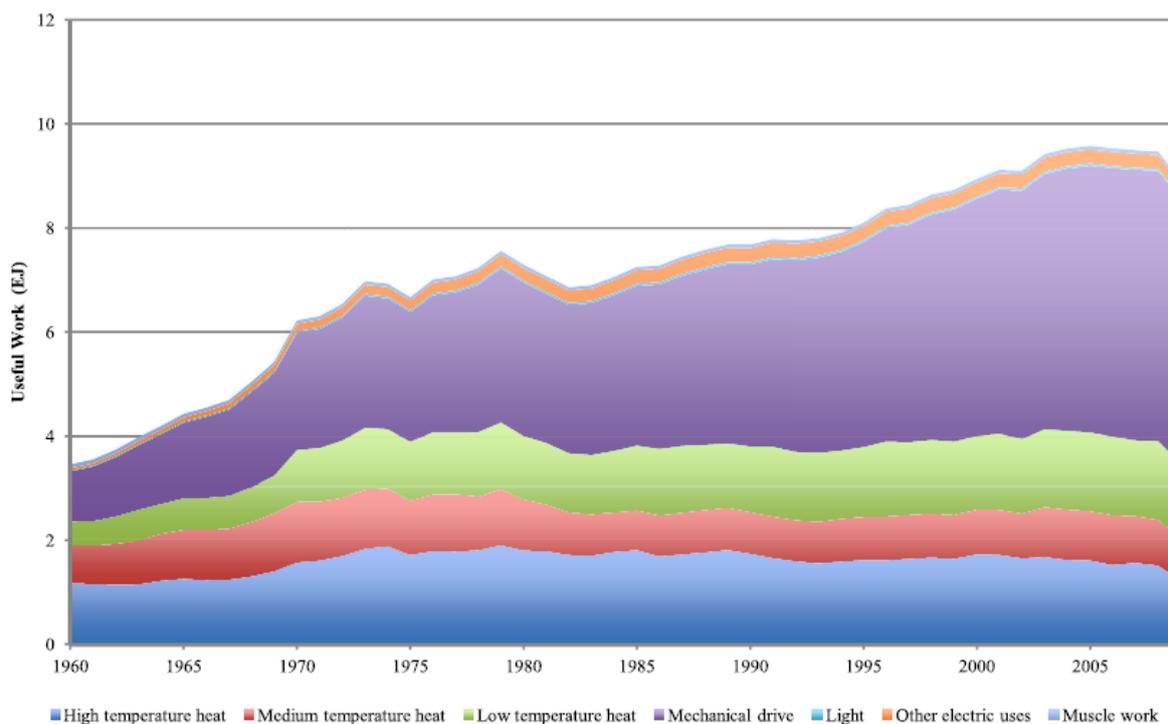


Figure 14. **Exergie utile en exajoules dans l'Union européenne à 15 (1960-2019)**

Source : Serrenho et al (2014, p.709).

Cette dernière a été multipliée par 2,5 environ entre 1960 et 2009 en Europe (Serrenho et al., 2014). Le mouvement mécanique représente la grande majorité des usages

énergétiques, viennent ensuite les différents types de chaleur. En divisant l'exergie utile par l'exergie finale, on obtient une efficacité énergétique moyenne par usage. On peut aussi raisonner à un niveau plus agrégé en rapportant l'exergie finale totale à l'exergie utile totale, ce qui permet d'obtenir un ratio d'efficacité énergétique macroéconomique permettant de remplacer l'intensité énergétique du PIB. Par exemple, dans le cas des 15 pays européens, l'efficacité énergétique est passée de 16,5% en 1960 à 20% en 2009, soit une progression de 21% en 50 ans. Dit autrement, alors que 1KW d'exergie finale générerait, en moyenne, 0,16 KW d'énergie utile en 1960, 49 ans plus tard, on obtient 0,2KW.

La comparaison entre l'Union européenne, l'Angleterre et les Etats-Unis fait apparaître des divergences : certains pays sont plus efficaces énergétiquement que d'autres. C'est ce que montrent, par exemple, Brockway et al. (2014) pour 5 types de procès de production différents (production de chaleur, électricité, mouvement mécanique et mouvement musculaire). L'efficacité énergétique des véhicules anglais est bien meilleure et s'améliore considérablement au fil du temps (passant de 12 à 21%, un véhicule est donc deux fois plus efficace en 2010 qu'en 1960, soit une augmentation de 100%) tandis qu'aux Etats-Unis cette évolution est bien plus modeste (passant de 13 à 16%, soit une augmentation de 25%). Au total, l'efficacité de la transformation a peu progressé aux Etats-Unis (11% de l'énergie finale finissent en exergie utile) alors qu'au Royaume-Uni elle a fortement augmenté (15% finissent sous forme d'exergie utile, contre 8% en 1960).

Cette mesure est donnée par le ratio $\frac{E}{UE}$ noté CE par les auteurs pour « *conversion efficiency* ». Ainsi le ratio d'intensité $\frac{Ei}{Xi}$ est ici décomposé en deux sous-ratios : l'efficacité énergétique par secteur ($\frac{Ei}{UEi}$), d'une part, et l'intensité en énergie utile du PIB ($\frac{UEi}{Xi}$), d'autre part. En effet : $\frac{Ei}{UEi} * \frac{UEi}{Xi} = \frac{Ei}{Xi}$

Ensuite, l'effet de structure est également détaillé. Les auteurs souhaitent saisir l'origine d'un changement de la structure productive. Schématiquement, un tel changement peut avoir deux sources. D'abord, les consommateurs nationaux peuvent changer leurs habitudes de consommation et se tourner vers des biens moins intensifs en énergie tel que le suggère la CEK. Cependant, l'économie peut aussi se transformer à la suite d'une modification

de sa spécialisation au sein du commerce international. Dit autrement, les consommateurs nationaux peuvent continuer à avoir les mêmes habitudes de consommation et, en même temps, l'économie nationale réoriente la production nationale vers d'autres secteurs. Ces deux effets peuvent être distingués grâce à l'introduction du terme XGi , qui est l'output global du secteur i incorporé à la demande finale domestique, et Xi qui est la production domestique du secteur i (que celle-ci soit consommée domestiquement ou non). Ainsi, le ratio $\frac{Xi}{XGi}$ peut s'interpréter comme le « taux de couverture » des besoins domestiques. Par exemple, si le Royaume-Uni produit pour 1000 £ d'acier (Xi) et que, dans le même temps, la demande finale britannique a nécessité pour être satisfaite 1000 £ d'acier (XGi) (directement ou indirectement), alors ce taux est de 100%. Si, à un moment donné, le Royaume-Uni produit moins d'acier mais continue à en utiliser autant, alors ce taux de couverture diminue. C'est à partir de ce ratio que l'effet délocalisation (noté OS dans l'article pour « offshoring ») est apprécié par les auteurs : l'économie nationale se transforme sans que fondamentalement la demande nationale n'ait muté.

Le ratio $\frac{XGi}{Y}$ se propose de saisir les changements dans les habitudes des consommateurs (*CN pour « changed needs »*), autrement dit le type de biens et services sur lesquels la demande finale se porte. La demande finale est mesurée à partir du PIB (Y) tandis que sa composition est saisie à partir de XGi , c'est-à-dire à la quantité de biens i incorporée dans cette demande. Par exemple, si la quantité d'acier incorporée dans la demande augmente plus vite que la demande, alors on peut dire que la structure de la demande des agents britanniques devient plus intensive en acier. Ainsi, lorsque la structure de la demande évolue vers des productions peu intensives en énergie, toutes choses égales par ailleurs, la contribution du ratio à la consommation d'énergie est négative et inversement. Le tableau 13 reproduit les résultats de cette nouvelle décomposition.

Unité : ktoe	1997-2001	2001-2005	2005-2009	2009-2013	Total
Efficacité de la conversion	-3046	-3418	-1061	-272	-7797
Intensité en exergie utile du PIB	653	-6139	-7591	-1660	-14737
Délocalisations	-4939	-1602	-2066	25	-8582
Changements des besoins	1501	-1671	375	-13	191
Demande	6630	7130	-220	1233	14773
Population	767	1168	1505	1313	4754
Total	1566	-4533	-9057	626	-11398

Tableau 13. **Décomposition étendue de la consommation d'énergie des secteurs productifs britanniques (1997-2013).**

Source : Hardt et al., 2018, p.129

Cette décomposition offre un nouveau regard sur le découplage britannique. Tout d'abord, elle montre que l'efficacité énergétique redéfinie de manière rigoureuse occupe une place moins importante que dans la décomposition traditionnelle. Par exemple, sur la période 1997-2013, la consommation d'énergie britannique chute de 11398 ktoe, mais c'est en premier lieu l'intensité en services énergétiques du PIB qui fournit la plus forte contribution à la baisse (-14737), puis les « délocalisations » (-8582) et enfin les progrès de l'efficacité énergétique (-7797). Dans la décomposition classique, l'effet technologique, apprécié à partir de l'intensité énergétique, était le premier facteur de réduction.

Autres résultats : l'évolution de la structure de la demande (« changed needs ») ne permet pas de réduire la consommation d'énergie tandis que le volume demandé par tête contribue massivement à son augmentation (+14 773), bien plus que la seule croissance de la population (+4754). Sans le recours aux délocalisations, la baisse de la consommation d'énergie totale aurait été bien plus modeste (-2816) et, avec elle, le découplage absolu anglais.

Malgré son intérêt, cette décomposition n'est pas exempte de limite. L'interprétation de l'intensité en services énergétiques du PIB, qui est le principal facteur de réduction de la consommation d'énergie, est pour le moins délicate. Cela signifie simplement qu'il faut moins de services énergétiques pour produire un euro de PIB. Toutefois, on ne sait pas vraiment quels phénomènes sont à l'œuvre dans la dynamique du ratio. Cela peut, tout d'abord, renvoyer à d'autres formes d'efficacité énergétique. Par exemple, la meilleure performance d'un moteur (efficacité dans la conversion) n'épuise pas l'explication d'un véhicule plus économe. On peut, par exemple, avoir une voiture plus légère qui consomme moins : dans ce cas, on a affaire à de l'efficacité dite « adaptative » qui n'est pas saisie par le ratio $\frac{E}{U}$. L'autre interprétation possible tient à l'évolution des rapports de force dans les chaînes de valeur que nous avons déjà mentionnée. C'est le cas lorsqu'un pays parvient, toutes choses égales par ailleurs, à capter plus de valeur économique pour une quantité donnée de services énergétiques. Cet effet pourrait facilement être considéré comme étant de l'ordre d'une réduction artificielle, liée aux relations avec l'extérieur, et donc plus proche dans sa nature des « délocalisations ». Une dernière interprétation possible, évoquée par les auteurs, tient au choix du déflateur. Ici, toutes choses égales par ailleurs, un déflateur qui considère une hausse de qualité plus forte qu'un autre aura un effet positif sur le ratio PIB/U⁵³. Enfin, il est également possible que les progrès de l'intensité énergétique proviennent d'un effet de structure interne aux secteurs retenus. En effet, la mesure de l'effet structurel dépend du degré de désagrégation de données. Par exemple, le changement structurel mesuré à un niveau très agrégé de type secteur primaire/secondaire/tertiaire) sera différent d'un changement structurel plus fin (industrie électrique, textile, etc.).

Malgré ces réserves, les données de la décomposition viennent plutôt confirmer ce que l'on a pu observer jusqu'à présent dans les sections précédentes. Que l'on songe aux séries en approche consommation (1.2.) ou la prise en compte du commerce international dans les régressions à la Kuznets (2.1.), une fois pris en compte, l'effet du commerce international apparaît conséquent et conduit à une diminution de l'ampleur du découplage absolu constaté. La présentation du cas de la Suisse, petit pays très ouvert commercialement

⁵³ Nous renvoyons sur ce point le lecteur au point 1.3.2. qui détaille l'effet des conventions de calcul du déflateur sur les séries de PIB réel.

qui, de surcroît, a réalisé un découplage absolu entre 2001 et 2011, permet d’approfondir le propos.

Le cas suisse (2001-2011)

Moreau et Vuille (2018) proposent une analyse de la dynamique de la consommation d’énergie en Suisse sur la période 2001-2011. A l’instar de Hard et al. (2018), ils partent de la décomposition classique (volume, structure, intensité) mais l’enrichissent de l’énergie incorporée (E_i) dans la balance commerciale. Deux intensités énergétiques du PIB sont ainsi calculées : l’une avec uniquement la consommation d’énergie domestique, l’autre avec la consommation d’énergie incorporée (E_i) dans la balance commerciale. Autrement dit :

$$E_i = \text{énergie domestique} - \text{énergie incorporée aux biens finaux exportés} \\ + \text{énergie incorporée aux biens finaux Importés.}$$

Dans le cas de la Suisse, cette prise en compte du rôle joué par le commerce international vient transformer la vision du découplage. Alors qu’en approche production celui-ci était timidement absolu (-2 pétajoules, PJ par la suite), en approche consommation, celui-ci devient relatif puisque la consommation d’énergie progresse de 24,5% (+258PJ).

De plus, un des résultats importants mis en évidence par la figure 15 est que les économies réalisées par l’intensité énergétique (-269PJ) correspondent quasiment à l’augmentation de l’énergie incorporée dans la balance commerciale (+260PJ) sur la période. Ainsi, une approche production conduirait à conclure que la Suisse réalise un timide découplage absolu grâce aux progrès de l’efficacité énergétique, alors que ces gains sont concomitants d’une augmentation de l’intensité énergétique de la balance commerciale. Ces observations confortent les remarques faites précédemment sur la nécessité d’avoir des agrégats suffisamment fins.

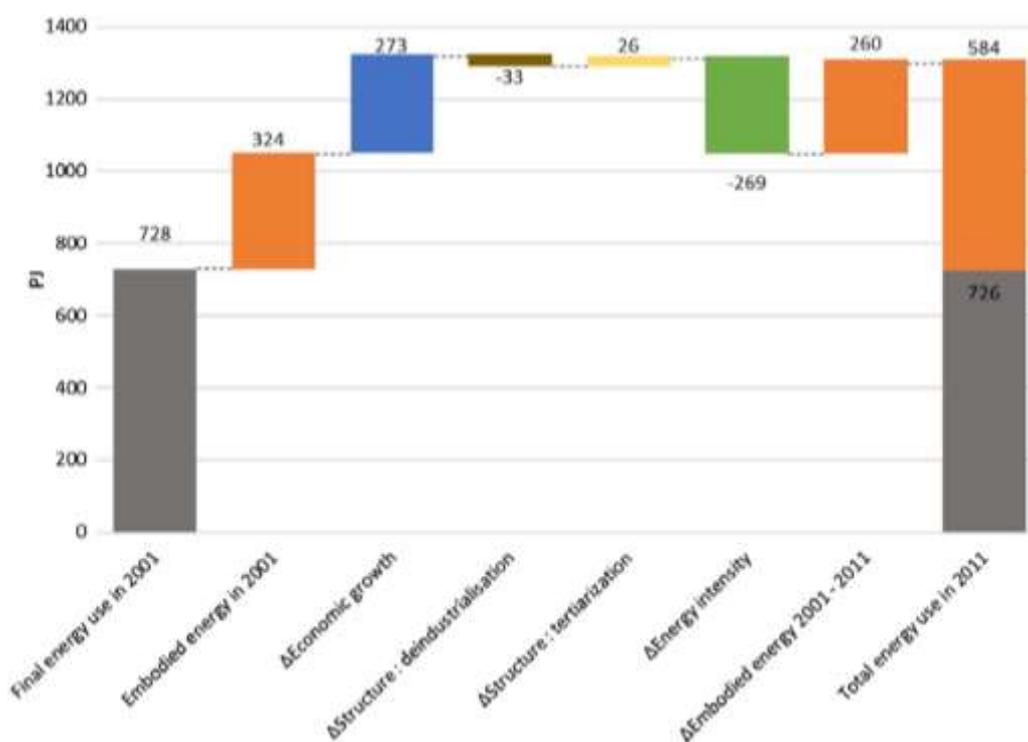


Figure 15. **Décomposition de la consommation d'énergie en pétajoules (PJ) pour la Suisse (2001-2011).**

Source : Moreau et Vuille (2018, p.59).

Que ce soit dans le cas suisse ou britannique, l'analyse montre l'importance de la relation à l'extérieur dans l'atteinte d'une trajectoire de croissance verte. L'effet structurel apparaît relativement modeste, contrairement aux prédictions de la CEK. Pour la Suisse, ce changement a permis d'économiser 7PJ soit 0,96% de la consommation de 2011 tandis que, dans le cas britannique, la contribution à la consommation d'énergie est positive (+191ktoe⁵⁴ sur la période 1997-2013). Pour finir ces remarques sur l'importance du choix des agrégats, nous allons présenter un argument supplémentaire apporté par Henriques et Kander (2010) et qui tient à la mesure du changement structurel.

Mesurer le changement structurel à partir de sa part dans le PIB réel

D'après ces auteurs, la contribution du changement structurel serait biaisée dès lors qu'il est apprécié en valeur nominale. En effet, la tertiarisation de l'économie s'apprécie

⁵⁴ Nous retenons le changement structurel au sens strict, c'est-à-dire une fois les effets du commerce international déduits (« offshoring » dans l'étude de Hardt et al.).

généralement comme l'évolution de la part des services dans la valeur ajoutée nominale totale. Or, cette tertiarisation apparaît plus modeste si l'on raisonne à partir de la production réelle de services. Pour les Etats-Unis, par exemple, la part du secteur des services augmente de 20 points en valeur nominale entre 1950 et 2005, mais seulement de 9 points en valeur réelle. Même phénomène en France et en Grande-Bretagne dont les données sont reproduites dans le tableau 14. Ces résultats s'expliqueraient par la « maladie de Baumol » (Baumol et Bowen, 1968). En effet, d'après Baumol, les services connaissent une augmentation de leurs coûts plus rapide que celle de leur productivité. De ce fait, leur prix relativement à celui des biens industriels tend à augmenter. Leur part en valeur tend donc à croître du fait de cet effet prix. Cependant, une fois ces évolutions du prix relatif prises en compte, la part des services, mesurée cette fois en volume, augmente moins vite qu'en valeur.

Part dans le PIB	France			Grande-Bretagne		
	Nominal	Réel	Ecart	Nominal	Réel	Ecart
1971	57	64	-7	53	59	-6
1990	69	71	-2	63	65	-2
2005	77	73	+4	76	73	+3
Δ1971-2005	+20	+9	+11	+23	+14	+9

Tableau 14. **Part des services dans le PIB nominal et dans le PIB réel en % entre 1971 et 2005 en France et en Grande-Bretagne.**

Source : auteur à partir des données de Kander et Henriques (2020)

Sur cette base, les deux auteurs mènent une analyse de décomposition d'index. Contrairement aux travaux présentés précédemment, la décomposition porte sur l'intensité énergétique et non la consommation en valeur absolue. En termes de niveau de désagrégation, cinq secteurs sont retenus : l'agriculture, l'industrie et les services mais également les transports et les ménages. Avec cette mesure corrigée de l'évolution structurelle, les auteurs constatent que le changement structurel n'a pas permis de réduire l'intensité énergétique totale de l'Italie, de la Suède et de l'Espagne entre 1971 et 2005 alors

même que cette période est usuellement retenue comme typique d'une désindustrialisation relative favorable à la baisse de l'intensité énergétique.

En résumé, les différents travaux présentés montrent l'importance du choix dans les agrégats des décompositions pour apprécier la contribution des deux effets mis en avant par la CEK, à savoir, l'effet technologique et l'effet structurel. Pour l'effet structurel, afin de mesurer rigoureusement l'argument avancé par la CEK, il est préférable comme le font Hardt et al. (2018) de ne cerner que la part qui résulte d'un changement des goûts des consommateurs en la distinguant de celle résultant d'un changement dans l'insertion internationale. L'usage de séries de consommation d'énergie en approche production comme chez Moreau et Vuille (2018) poursuit le même objectif. Il est également préférable de mesurer la part d'un secteur dans l'économie en euros constants (plutôt qu'en euros courants) afin d'éviter le biais créé par la maladie de Baumol (Kander et Henriques, 2020). Ces corrections faites, la contribution de l'effet structurel risque d'être plus modeste voire d'être positive comme dans le cas britannique.

L'effet technologique suppose aussi d'être correctement mesuré. De ce point de vue, l'usage de l'intensité énergétique dans les décompositions classiques est insatisfaisant dans la mesure où cet agrégat ne saisit pas que des effets techniques⁵⁵. Bien que critiquable par certains aspects⁵⁶, la proposition, portée par le *exergy economics network*⁵⁷, d'utiliser l'efficacité agrégée de la conversion de l'énergie, offre une alternative convaincante (cf. encadré 1). Dans le cas britannique, ce changement d'indicateur conduit à rétrograder l'efficacité énergétique de la première à la troisième place des contributions permettant de réduire la consommation d'énergie. La réplique de cette étude pour d'autres pays serait souhaitable pour pouvoir confirmer la généralité ou non de ce résultat.

Ces résultats suffisent-ils à invalider la CEK ? Après tout, n'est-il pas possible d'envisager que ces deux effets jouent plus à l'avenir ? Répondre à cette question suppose de se donner

⁵⁵ Par exemple, une amélioration de la position dans les chaînes de valeur.

⁵⁶ On peut notamment mentionner la question de l'agrégation de services énergétiques (Giampietro, Mayumi, et Alevgul H Sorman, 2010) et l'oubli de certaines formes d'efficacité énergétique (efficacité adaptative notamment). Il subsiste par ailleurs un terme (l'intensité en services énergétiques du PIB) qui est également délicat à interpréter.

⁵⁷ Hardt et al (2018) en font partie. Voir <https://exeryeconomics.wordpress.com/>

quelques éléments de prospective. Sur l'effet structurel, peu de travaux abordent cette question. Un travail récent de Hardt (2021) sur l'Angleterre et l'Allemagne estime les gains à attendre d'une réorientation de l'activité des secteurs intensifs en énergie vers les services intensifs en main-d'œuvre. A partir des tables inputs-outputs, l'auteur simule un changement structurel conséquent⁵⁸ conduisant à une réduction de la consommation d'énergie finale totale de 22%. Même si d'autres travaux seraient nécessaires, cette étude suggère que, malgré un changement structurel massif, la réduction attendue reste modeste, du moins insuffisante pour atteindre des niveaux de réduction conformes aux objectifs de soutenabilité⁵⁹.

Dans le cas de l'efficacité énergétique, les potentiels d'amélioration font débat. Une première hypothèse de travail consiste à prolonger les tendances passées. Dans le cas du Royaume-Uni, cela donnerait une réduction de la consommation d'énergie par deux pour les 50 prochaines années. Cependant, cette hypothèse semble très optimiste. En effet, certains auteurs repèrent un *effet de dilution* de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire une tendance à se tourner vers des processus moins efficaces qu'auparavant. Ce phénomène a été mis en évidence en longue période pour le cas japonais (Williams, Warr et Ayres, 2008), où l'efficacité énergétique culmina à 38% en 1970 pour redescendre à 33% en 1998. Dans le cas des Etats-Unis, un déclin de l'efficacité énergétique pour les appareils électriques est également observé. Il provient de la croissance de la part de l'air conditionné dans les usages électriques (10 à 20%), qui est un processus relativement moins efficace que d'autres usages (par exemple, une bouilloire électrique). La cause ici est donc bien un changement dans les usages (développement de l'air conditionné associé au confort). Un autre exemple est fourni par l'usage de la chaleur directe. Aux Etats-Unis, les auteurs constatent un mouvement, au sein de l'industrie, de la haute température (*high temperature heat*) vers la basse température (*low temperature heat*), moins efficace d'un point de vue thermodynamique. Or, la haute température est essentiellement utilisée par les industries de l'acier, du fer et du ciment. Leur délocalisation/externalisation à l'étranger a conduit à une chute de la part de cet usage et une baisse de l'efficacité. Ce phénomène s'observe également pour 15 pays européens (Serrenho

⁵⁸ La demande finale adressée aux secteurs très intensifs (dont l'intensité est supérieure à 3MJ/€) est réduite de 50% et cette demande est réallouée aux cinq secteurs intensifs en travail retenus.

⁵⁹ En effet un facteur quatre, comme énoncé par le GIEC, signifie une baisse de 75%.

et al., 2014). Ces quelques éléments montrent que les progrès de l'efficacité énergétique pourraient être plus limités que ceux requis par un scénario de croissance verte.

Au-delà de la question des indicateurs retenus, la méthode de décomposition d'index présente une limite plus fondamentale liée à son caractère statique.

2.2.3. Les limites d'une méthode statique : l'exemple de l'effet rebond

La décomposition d'index permet-elle véritablement d'expliquer la dynamique de la consommation d'énergie ? Une limite fondamentale réside dans le fait que, par définition, une décomposition n'a rien à dire sur les liens *entre* les variables choisies. Par exemple, d'après cette méthode, l'efficacité énergétique a un effet négatif sur la consommation d'énergie tandis que le PIB a un effet positif sur cette dernière. Mais quel est l'effet d'une amélioration de l'efficacité énergétique sur le PIB ? La décomposition d'index ignore cette question car elle traite ces deux variables comme étant indépendantes l'une de l'autre. Cette question n'est pas propre à la relation PIB-efficacité énergétique, elle se pose également pour les deux autres couples de variable, à savoir la relation PIB-changement structurel et la relation efficacité énergétique-changement structurel.

Dans le cas de la relation efficacité énergétique-changement structurel, Stern (2004) explique :

*«All these studies treat energy intensity as an exogenous variable, whereas actually it is also partly determined by shifts between fuels of different qualities and **industries with different energy intensities** »*
(p.1432, mis en gras par l'auteur).

Par exemple, la décomposition de l'intensité énergétique suédoise (Kander, 2002) révèle une contribution positive du changement structurel entre 1870 et 1913 et une contribution négative entre 1913 et 1970. Dans le cas de la relation PIB-changement structurel, Hardt (2021) rappelle que, historiquement, les deux principales sources du changement structurel ont été (1) les progrès différentiels de la productivité du travail⁶⁰ d'une

⁶⁰ Le secteur des services connaît des gains de productivité plus modestes que dans le secteur industriel, comme l'explique la maladie de Baumol présenté plus en amont de ce chapitre (section 2.2.2.).

part et (2) les changements dans la demande d'autre part. En effet, c'est parce que l'industrie libère du travail plus vite que les services que le poids des services dans l'emploi et la valeur ajoutée tend à augmenter (1). Ce mouvement s'accompagne d'une modification de la structure de la demande en faveur des biens supérieurs (loi d'Engel) parmi lesquels figurent de nombreux services comme la santé (2). Dit autrement, le changement structurel s'accompagne historiquement d'un progrès de la productivité du travail (lequel est associé à des rythmes de consommation d'énergie par travailleur plus élevés) et d'un progrès des revenus. Dans les deux cas, cela signifie que le changement structurel s'est accompagné d'une croissance de la production, le fameux « effet volume » qui lui aussi tire la consommation d'énergie vers le haut.

On touche ici à une des limites de l'hypothèse « toutes choses égales par ailleurs » qui est au cœur de la décomposition d'index : les variables ne sont pas indépendantes. Afin de démontrer ce point, nous nous focalisons, dans le reste de cette section, sur la relation entre l'efficacité énergétique et le PIB.

L'effet rebond : quand l'efficacité énergétique augmente le PIB et la consommation d'énergie

Dans les décompositions d'index, la contribution de l'efficacité énergétique est négative. Le raisonnement est le suivant : toutes choses égales par ailleurs, si l'efficacité énergétique n'avait pas eu lieu, de combien aurait été la consommation d'énergie ? Ce raisonnement néglige les potentiels effets dynamiques des progrès de l'efficacité énergétique sur l'activité et, en retour, sur la consommation d'énergie. On parle d'effet rebond, concept formulé, pour la première fois, par Stanley Jevons dans son ouvrage consacré à la question du charbon (Jevons, 1865). Jevons s'y inquiète de l'épuisement des ressources charbonnières du Royaume-Uni qu'il identifie comme principale source de la prospérité de son pays :

*« Civilization, says Baron Liebig, is the economy of power, and our power is coal. It is the very economy of the use of coal that makes our industry what it is »
(p.140).*

Parmi les solutions à l'épuisement avancées par ses contemporains figure l'efficacité énergétique au sujet de laquelle Jevons nourrit peu d'espoir. D'après lui, l'efficacité énergétique conduirait plutôt à accroître la consommation de charbon qu'à la diminuer :

« it wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth [...] Every improvement of the engine when effected will only accelerate anew the consumption of coal... »
(Jevons, 1865, p.140)

« Every such improvement of the engine, when effected, does but accelerate anew the consumption of coal. Every branch of manufacture receives a fresh impulse – hand labour is still further replaced by mechanical labour. »
(Jevons, 1865, p.152-153)

Au cœur de ce paradoxe – le « paradoxe de Jevons » est l'autre nom de l'effet-rebond –, il y a un mécanisme économique : celui d'une déformation des prix relatifs avec des effets sur la dynamique économique. En effet, la baisse du prix relatif des services énergétiques (ici ceux fournis par les machines à vapeur) fait qu'ils vont pouvoir être consommés dans un nombre plus important de branches. « Tout ce qui conduit à augmenter l'efficacité du charbon et à diminuer le coût de son usage a directement tendance à augmenter la valeur du moteur à vapeur et à élargir le champ de son utilisation » (Jevons, 1865, p.107). Cette diffusion a par ailleurs des effets d'entraînement sur d'autres secteurs : baisse du prix de l'acier qui se répercute sur le transport, lequel peut réduire le coût de production du charbon, etc. La figure 16 ci-dessous résume les boucles de rétroaction à l'œuvre dans le cas d'une efficacité énergétique touchant les machines à vapeur.

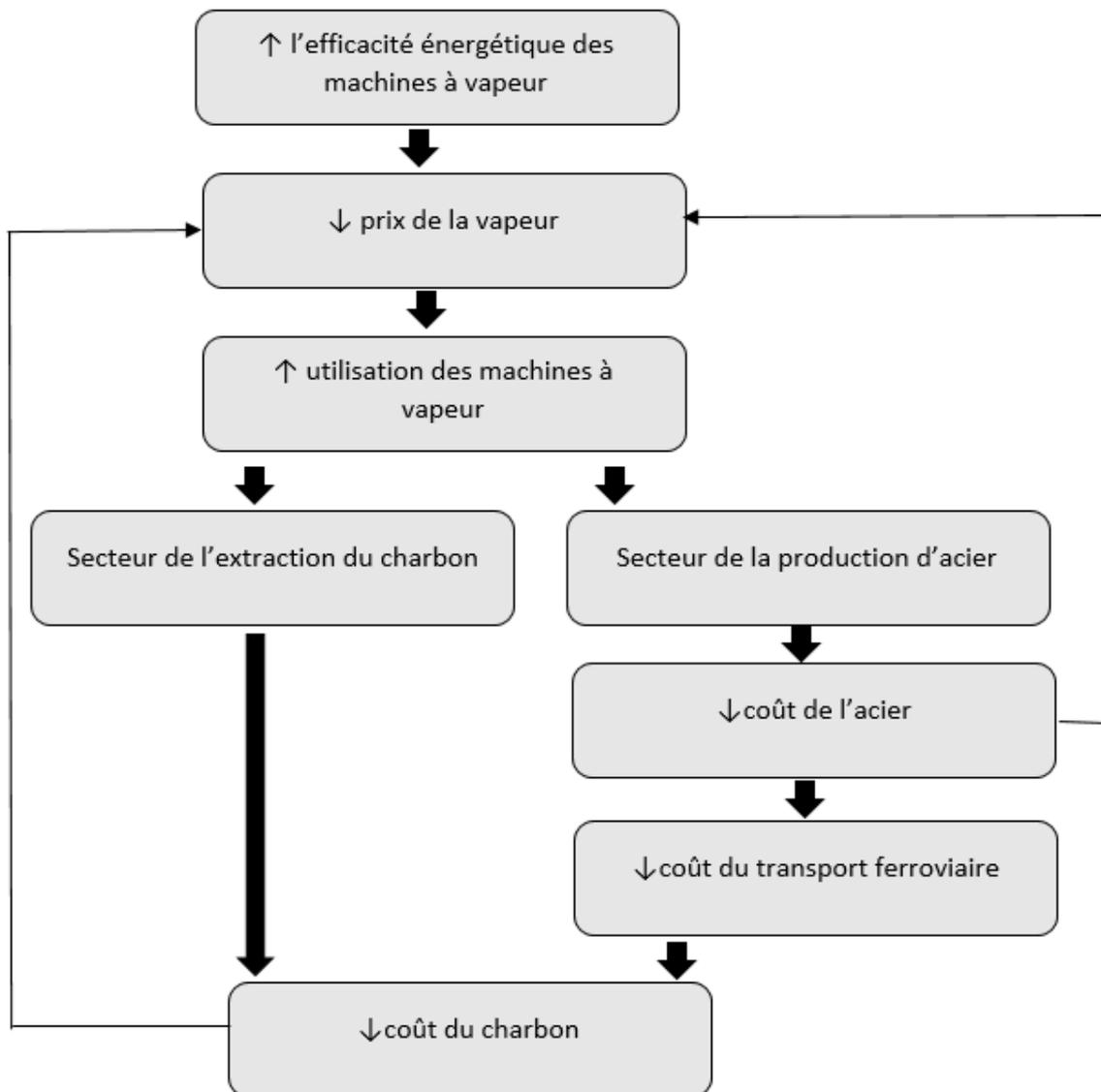


Figure 16. **Les effets dynamiques d'une amélioration de l'efficacité énergétique des machines à vapeur**
Source : auteur à partir de Sorrell, Dimitropoulos, 2007.

On peut noter au passage que, pour être vérifié, ce mécanisme suppose, d'une part, que l'énergie représente une part importante du coût de production de l'acier. Autrement dit, plus une branche est intensive en énergie, plus l'effet sur les prix risque d'être fort. D'autre part, cela suppose une non-satiété de la demande d'acier, c'est-à-dire que l'élasticité entre le prix et la demande d'acier soit positive. La baisse du prix de l'acier stimule une consommation supplémentaire de ce matériau.

Jevons conclut que les progrès de l'efficacité énergétique ne permettent pas de réduire la consommation de charbon, au contraire, sans eux, on utiliserait moins de charbon qu'aujourd'hui car celui-ci coûterait trop cher et son exploitation dans bon nombre de branches ne serait pas rentable. Cette conclusion va totalement à rebours des propositions avancées par les tenants de la CEK. Elle contredit également les représentations statiques, comme la décomposition d'index, qui concluent que, sans efficacité énergétique, la consommation d'énergie aurait été plus élevée.

Tout au long du XXe siècle, le paradoxe de Jevons a peu intéressé les analystes (Missemer, 2017). Il faudra attendre les chocs pétroliers et la prise de conscience des enjeux climatiques pour que les réflexions reprennent, du fait de la nécessité d'économiser l'énergie. On doit particulièrement à Daniel Khazoom (1987 ; 1980) et Leonard Brookes (1992) d'avoir remis au centre de l'attention l'effet rebond. Le postulat de Khazoom-Brookes affirme, en effet, que les améliorations de l'efficacité énergétique intéressantes au niveau microéconomique conduisent à une augmentation de la consommation d'énergie au niveau macroéconomique. Là encore, on retrouve le mécanisme des prix évoqué par Jevons :

« Changes in appliance efficiency have a price content [...] with increased productivity comes a decline in the effective price of commodities, and [...] demand does not remain constant [...] but tends to increase. »
(Khazoom, 1980, pp22–23)

Cette réaffirmation des résultats de Jevons ne se fit pas sans controverses. Les « techno-optimistes » ne manquèrent pas de critiquer cette thèse. Ainsi, Lovins estime :

« Though rebounds' can in principle make net savings slightly smaller than gross savings, at least for space conditioning, they cannot make net savings become less than zero, because nothing that can be bought with the money saved by saving energy contains more energy per pound than the direct energy purchase that was saved in the first place »
(Lovins, 1998)

Dans cette citation Lovins reconnaît qu'il est possible que les gains réellement obtenus soient inférieurs aux gains théoriques promis par une amélioration de l'efficacité énergétique. La réduction d'énergie serait ainsi moindre que prévue, voire nulle. Lovins conteste toutefois

la possibilité que la consommation d'énergie augmente, une situation qualifiée par la littérature de « backfire » ou « retour de flamme » en français. Aussi, à ce stade de l'analyse, faut-il clarifier ce que l'on entend par « effet rebond ».

La formule rigoureuse de l'effet rebond (ER) peut s'écrire comme suit :

$$ER = \left[1 + \frac{\text{Variation de la consommation d'énergie (en \%)} }{\text{Progrès de l'efficacité énergétique (en \%)} } \right] * 100$$

Prenons trois cas significatifs pour illustrer cette équation. Si l'efficacité progresse de 5% et que la consommation d'énergie diminue de 5%, alors $ER = [1 + (-5/5)] * 100 = 0$: l'effet rebond est nul, les gains d'efficacité ont servi dans leur intégralité à réduire la consommation d'énergie. Dans le cas où ces 5% s'accompagnent d'une stabilité de la consommation d'énergie, alors cela veut dire que l'essentiel des gains a permis le développement de nouveaux usages. L'effet rebond est donc de $(1 + (0/5)) * 100 = 100\%$. Enfin, un dernier cas est envisageable et correspond au scénario anticipé par Jevons : lorsque les progrès de l'efficacité énergétique s'accompagnent d'une augmentation de la consommation d'énergie. Par exemple, si la consommation augmente de 5%, $ER = (1 + (5/5)) * 100 = 200\%$ Dans ce cas, on parle de « backfire », le plus problématique pour les politiques publiques. Au total, on peut distinguer 5 cas, présentés dans le tableau 15.

Effet rebond (ER) en %	Variation de la consommation d'énergie (E) suite à un progrès de l'efficacité de 1%
Super-conservation (ER<0%)	$\Delta E < -1\%$
Nul (ER=0%)	$\Delta E = -1\%$
Partiel (0%<ER<100%)	$-1\% < \Delta E < 0\%$
Complet (ER=100%)	$\Delta E = 0\%$
« Backfire » (ER>100%)	$\Delta E > 0\%$

Tableau 15. **Typologie des différents effets rebonds**
Source : auteur, à partir de Brockway et al.(2017)

Ainsi, si l'existence théorique de l'effet rebond est admise, c'est son ampleur qui fait débat (Polimeni, 2008). Trancher ce débat suppose de quantifier empiriquement l'ampleur de cet effet. Dans la littérature, la majeure partie des travaux étudie les effets rebonds microéconomiques. Dans cette perspective, les auteurs s'intéressent à la réaction des ménages ou des entreprises suite à un progrès de l'efficacité énergétique portant sur un appareil, un service énergétique en particulier. Ces études considèrent ainsi l'usage des véhicules (Dimitropoulos, Oueslati et Sintek, 2018 ; Greene, 2012 ; Small et Van Dender, 2007), le chauffage du domicile (Galvin, 2014 ; Yilmaz et al., 2022) ou encore l'utilisation de l'air conditionné (Raynaud et al., 2016). Cet échelon d'analyse offre l'avantage de partir d'une définition technique de l'efficacité énergétique. Par exemple, le gain d'efficacité d'un moteur qui est un paramètre technique connu. L'effet rebond mesuré est qualifié de direct lorsque le gain d'efficacité sur le processus a un impact sur la consommation d'énergie de ce même procès. Par exemple, dans le cas de l'efficacité énergétique des moteurs thermiques, seule la consommation de litres de carburant, consommés par ces mêmes moteurs, est prise en compte au titre du rebond. Cependant, les économies financières associées aux progrès de l'efficacité énergétique peuvent donner lieu à d'autres consommation d'énergie, qualifiées d'indirectes, dans la mesure où elles stimulent la consommation d'autres biens et services. Par exemple, les économies financières réalisées sur l'achat d'essence peuvent servir à dépenser plus en matière de consommation de téléviseurs dont la production et l'usage est consommateur d'énergie. L'effet rebond n'est donc pas seulement direct mais également indirect. De plus, une analyse complète doit pouvoir intégrer non seulement la consommation liée aux usages mais également celle liée à la production des appareils (l'empreinte).

Alors que dans le cas des ménages, le principal canal par lequel se manifeste l'effet rebond est le canal du revenu⁶¹, pour les entreprises, le canal des coûts de production est déterminant. En effet, dans un cadre néoclassique par exemple, la baisse des coûts se traduit par une hausse de l'offre et, avec elle, une augmentation de la consommation d'énergie. De même l'effet substitution, à l'œuvre au niveau des inputs, peut jouer en faveur d'une augmentation de la consommation d'énergie : la baisse du prix des services énergétiques⁶² favorise une substitution du travail par du capital technique donc le recours à des méthodes

⁶¹ On retrouve ici les canaux classiques de l'analyse microéconomique : effet revenu et effet substitution.

⁶² Les services énergétiques étant rendus par une machine, leur prix apparaît comme une composante du prix d'utilisation du capital technique.

de production plus intensives en énergie. Les travaux tentent alors de savoir si les gains initiaux ne sont pas annulés par ces deux effets.

Ces deux types de rebond sont obtenus au terme d'un raisonnement en équilibre partiel. En effet, le prix des inputs (celui de l'énergie) mais aussi celui des biens produits est considéré comme fixe. Cependant, les comportements des agents économiques sont susceptibles d'affecter les prix. Par exemple, si les progrès de l'efficacité conduisent à réduire la consommation d'énergie, la demande d'énergie sur ce marché chute, le prix est susceptible de baisser, ce qui peut, en retour, stimuler la consommation d'énergie. De même, la baisse du prix des services énergétiques peut conduire les firmes à diminuer le prix de vente des marchandises, ce qui va favoriser la consommation de biens et services donc la consommation d'énergie. Dans ce cas, on parle d'effets rebonds macroéconomiques qui supposent de se placer dans une perspective d'équilibre général (Brockway et al., 2021).

Ainsi, l'effet rebond suit une multitude de canaux dans sa diffusion à l'ensemble de l'économie : prix relatifs des inputs et des outputs, niveau de production et revenus (voir tableau 16). Saisir l'ensemble de ces effets est l'objet d'une littérature spécifique, celle s'intéressant aux *economy-wide rebound effects*, qu'on pourrait traduire en français par effets rebonds de l'ensemble de l'économie (Barker, Ekins et Foxon, 2007 ; Brockway et al., 2017 ; Howells et al., 2010 ; Saunders, 2000 ; Stern, 2020). Ces travaux, macroéconomiques, se distinguent des travaux microéconomiques dans la mesure où ils étudient l'effet de l'ensemble des progrès de l'efficacité énergétique sur les variables économiques, que cela soit les quantités produites ou les prix relatifs (tableau 16). Comme l'explique Alcott (2007), « Direct rebound is a pet subject of study, but in and of itself is not relevant for environmental policy, which needs to know economy-wide rebound adjusted for trade of embodied energy» . Onze ans plus tard, Stern fait le même constat : « The size of the economy-wide rebound effect is crucial for estimating the contribution that energy efficiency improvements can make to reducing greenhouse gas emissions and for understanding the drivers of energy use» (Stern, 2020, p.1). Dans la mesure où notre recherche porte sur les relations entre les variables agrégées de PIB, de consommation d'énergie et d'efficacité énergétique, la suite de la section se concentrera sur cette littérature. Au-delà des résultats, notre objectif demeure d'ordre méthodologique : identifier les alternatives pour pallier les limites des décompositions d'index.

Type de rebond	Mécanisme
Micro-économique (Equilibre partiel)	<p>Effet revenu pour les ménages (plus de revenu, plus de services énergétiques)</p> <p>Effet output pour les entreprises (baisse des coûts et hausse de l'offre donc consommation accrue de services énergétiques)</p> <p>Effet substitution pour les entreprises (des services énergétiques à la place du travail)</p>
	<p>Indirect Effet énergie incorporée : les appareils plus performants ont une empreinte énergétique qui réduit les gains</p> <p>Effet redéploiement des dépenses : disponibilités financières liées à la baisse du prix des services énergétiques conduisant à des dépenses supplémentaires et à de la consommation d'énergie supplémentaire</p>
Macroéconomique (Equilibre général)	<p>Effet marché de l'énergie : baisse de la demande d'énergie donc sur le prix de l'énergie, favorisant en retour la demande d'énergie</p> <p>Effet de composition : baisse du prix des biens intensifs en énergie favorisant leur consommation donc une augmentation de la demande d'énergie</p> <p>Effet croissance : Baisse du prix des biens et services du fait de la baisse des coûts entraînant une croissance de la demande et de la production</p>

Tableau 16. **Les différents stades de mesure de l'effet rebond.**

Source : auteur.

La mesure des effets rebonds macroéconomiques

La littérature empirique sur les effets rebonds macroéconomiques est relativement récente. En 2009, Allan et al. (2009) indiquaient « qu'il n'y a à cette date, comparativement, très peu de mesures de l'ampleur des effet indirects et systémiques des changements de prix relatifs, de la production et des revenus induits par les améliorations de l'efficacité énergétique » (Allan et al., 2009), de même l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) estimait en 2010 qu'il y avait là une « priorité de recherche économique » (ADEME, 2010, p.6). La littérature empirique sur l'effet rebond macroéconomique a depuis connu un développement important et acquis une certaine maturité (Lange et al., 2021). Plusieurs méthodes peuvent être identifiées que l'on peut schématiquement regrouper en deux catégories : les modèles à équilibre général calculable (appelé CGE en anglais pour *Computable General Equilibrium*) et les autres méthodes.

En effet, d'après Brockway et al. (2021), auteurs d'une méta-analyse sur le sujet, les modèles CGE sont l'approche la plus fréquente pour apprécier les effets rebonds au niveau macroéconomique. Ces modèles, d'inspiration néoclassique décrivent les comportements des agents économiques, ainsi que les relations entre les secteurs, à partir d'une série d'équations qui sont ensuite paramétrées. Parmi les 8 modèles CGE répertoriés en 2009 par Sorrel et al. (2009), tous concluent à un effet rebond supérieur à 37%. Cependant, la plupart des modèles voient un effet rebond supérieur à 50% tandis que certains concluent à l'existence d'un « backfire » ($ER > 100\%$) : Glomsrød and Taoyuan (2005) pour la Chine ; Hanley *et al.* (2009) pour l'Ecosse ou encore Semboja (1994) dans le cas du Kenya. Ces modèles suggèrent également que l'ampleur des effets rebonds dépend du secteur où l'efficacité énergétique apparaît. Onze ans plus tard, Brockway et al. (2021) complètent cette revue avec 16 modèles CGE supplémentaires, postérieurs à 2009. L'effet rebond médian trouvé est de 58% tandis que la moyenne est à 65%.

Ces modèles sont néanmoins sujets à la critique pour de nombreuses raisons. C'est principalement le manque de réalisme des hypothèses néoclassiques qui sont au fondement de ces modèles qui pose problème. On peut, par exemple, citer la maximisation de l'utilité, la concurrence parfaite, les rendements d'échelle constants. Le choix des formes fonctionnelles est, lui aussi, peu réaliste et sert principalement les besoins de la modélisation (Sorrell, Dimitropoulos et Sommerville, 2009). Ces modèles sont également très sensibles à la valeur

des paramètres (Brockway et al., 2021 ; Stern, 2020). Dans le cas du Royaume-Uni, Turner (2009) montre qu'en fonction des valeurs retenues, le rebond mesuré peut varier d'une valeur négative à une valeur supérieure à 100%. Parmi les paramètres important figure l'élasticité postulée entre l'énergie et les inputs non énergétiques (Broberg, Berg et Samakovlis, 2015 ; Saunders, 2000) et pour laquelle les estimations empiriques sont contradictoires (Koetse, de Groot et Florax, 2008)⁶³.

Pour toutes ces raisons, Sorrell et al. (2009), préfèrent se tourner vers des modèles macro-économétriques. Plus complexes et plus coûteux en termes de données, ces derniers sont toutefois moins dépendants des hypothèses du cadre néoclassique puisque les paramètres sont établis empiriquement. Pour mesurer le rebond, la démarche consiste à construire plusieurs scénarios de progrès technique. Il faut ensuite comparer la consommation d'énergie du scénario avec progrès technique du scénario sans progrès technique, l'écart étant la consommation d'énergie dont est responsable le progrès technique. En 2009, la seule application est le modèle MDME3 (Barker, Ekins et Foxon, 2007). L'effet rebond macroéconomique des politiques d'efficacité énergétique britanniques y est estimé à 26%. Il est cependant possible de considérer que ce chiffre est nettement sous-estimé. Par exemple, l'efficacité énergétique modélisée est considérée comme purement énergétique : elle n'affecte pas la productivité du travail ou du capital, une hypothèse qui tend à réduire l'ampleur de l'effet rebond (Sorrell et al., 2009). De même, l'empreinte énergétique des nouvelles technologies plus éco-efficientes ainsi que celles des importations (potentiellement stimulées par les progrès de l'efficacité) ne sont pas prises en compte. Plus récemment, Rausch et Schwerin (2018) ont ainsi mesuré, à partir d'un modèle d'équilibre général à deux secteurs, calibré sur données américaines (1960-2011), un effet rebond de 102%. Egalement, Lemoine (2020) estime, à partir d'un modèle d'équilibre général à n secteurs de production et 1 secteur de production énergétique, un rebond de 28% pour les premiers et un rebond de 80% pour le second.

Parmi les autres méthodes employées, on peut également citer les décompositions de la croissance et les analyses économétriques. Dans le cas des décompositions, la démarche consiste à saisir la contribution de différents facteurs à la croissance de la production à partir

⁶³ La question de la substitution entre ressources énergétiques et le capital est abordée plus en détail au chapitre 2 consacré à la théorie néoclassique de la croissance.

de données historiques. Par exemple, Brockway et al. (2017) utilisent une fonction CES (Constant Elasticity of Substitution) calibrée économétriquement sur la période 1980-2011 pour estimer la contribution des différents facteurs à la croissance chinoise, britannique et américaine. L'effet rebond se mesure par le ratio entre l'augmentation de la consommation d'énergie attribuée au progrès technique rapportée à une mesure de l'efficacité agrégée⁶⁴. Dans ce cadre il existe un « backfire » pour la Chine tandis qu'on observe un effet rebond partiel (<100%) pour les Etats-Unis et la Grande-Bretagne. Dans une démarche similaire mais à partir d'une fonction de production translog, Lin et Du (2015) trouvent, sur la période 1981-2011, un rebond compris entre 30 et 40% pour la Chine.

Sur les douze études (non CGE) présentées par Brockway et al. (2021), dix concluent à un rebond supérieur à 50% dont trois où le rebond est supérieur à 100%. La relative homogénéité des résultats est assez surprenante vu la différence dans les démarches ainsi que les différentes définitions de l'efficacité énergétique retenues. Le point commun de tous ces travaux toutefois est de faire appel, d'une manière ou d'une autre, à une théorie de la croissance. Cela est assez visible avec les modèles CGE d'inspiration néoclassique ou encore le recours à des fonctions de production agrégée dans les décompositions de la croissance. Ce lien entre existence du rebond et théories de la croissance est fait de manière explicite par Sorrel (2009) :

« Of particular interest is the apparent similarity between some of Brookes' arguments and the heterodox claim that the increased availability and quality of energy inputs is the primary driver economic activity. But energy is only economically productive because it provides useful work⁶⁵. Hence, if increases in energy inputs contribute disproportionately to economic growth, then improvements in thermodynamic efficiency could do the same, since both provide more useful work. The dispute over Jevons' Paradox may therefore be linked to a broader question of the contribution of energy to economic growth. »
(Sorrell, 2009, p.1467)

Dans cette citation, Sorrel fait référence à la théorie néo-thermodynamique de la croissance (Ayres et Warr, 2009) laquelle identifie l'augmentation de la quantité de services

⁶⁴ En l'occurrence les auteurs utilisent l'efficacité thermodynamique.

⁶⁵ Le travail utile est synonyme de l'exégie utile, notion définie dans l'encadré 1 de ce chapitre.

énergétiques comme principale source de la croissance⁶⁶. Or la quantité de services énergétiques provient, par construction, de deux sources : une augmentation de la consommation d'énergie finale d'une part, un progrès de l'efficacité énergétique d'autre part. Dès lors que l'efficacité énergétique est identifiée comme un facteur de croissance, il est normal de conclure à l'existence d'un effet rebond. En effet, dans ce cas, l'efficacité énergétique favorise un effet volume qui vient augmenter la consommation d'énergie. Finalement, si l'étude de l'effet rebond est fondamentale pour saisir la plausibilité d'un découplage, celle du rôle de l'énergie dans le processus de croissance l'est tout autant.

Conclusion de la deuxième section

Parmi les influences théoriques importantes des défenseurs de la croissance verte figure la courbe environnementale de Kuznets. C'est pourquoi nous avons mené une revue de littérature des travaux portant spécifiquement sur l'énergie. Nous avons pu mettre en évidence deux résultats. D'abord, la majorité des travaux récents ne permettent pas de conclure à une courbe en U inversé indiquant une trajectoire de découplage. Ensuite, et plus fondamentalement, ces estimations économétriques ne permettent pas de mesurer rigoureusement les mécanismes qui fondent la CEK pour ses théoriciens, à savoir l'effet volume, l'effet technologique et l'effet de structure. Les travaux empiriques sur le CEK fonctionnent ainsi comme une boîte noire que la méthode d'analyse de décomposition d'index se propose d'ouvrir. En effet, la décomposition d'index permet de décomposer la consommation d'énergie en un certain nombre de variables qui peuvent alors servir de proxy aux effets envisagés par la CEK. A partir d'une revue de différents travaux, nous avons montré l'insuffisance des décompositions classiques : les agrégats captent plus que les effets qu'ils sont censés résumer, comme l'illustre le recours à l'intensité énergétique du PIB. Des décompositions plus fines peuvent réduire considérablement la contribution des effets mis en avant par la CEK. Malgré ces précautions, une limite importante de cette méthode reste sa manière de traiter les différentes variables de la décomposition comme exogènes, indépendantes les unes des autres. L'exemple de l'effet rebond l'illustre. Alors que les décompositions d'index prennent en compte tout le potentiel de réduction de l'efficacité

⁶⁶ Cette théorie est présentée de manière détaillée à la section 2.2. du chapitre 2.

énergétique, la littérature sur les rebonds macroéconomiques montre au contraire qu'une part importante, supérieure à 50%, disparaît, en raison même des effets d'entraînement de l'efficacité énergétique sur l'activité économique. L'effet technologique ne vient pas seulement réduire la consommation d'énergie, il active également l'effet volume, donc contribue à la croissance de la consommation d'énergie par ce biais. Ce constat amène à tirer un certain nombre de conclusions quant aux méthodes à employer pour apprécier la possibilité d'un découplage.

Conclusion du chapitre 1 : la nécessité d'étudier la place de l'énergie dans les théories de la croissance

Ce chapitre propose une évaluation critique des principales méthodes utilisées pour appréhender le découplage entre le PIB réel et la consommation d'énergie. Nous avons ainsi pu identifier un certain nombre de précautions méthodologiques à prendre pour appréhender le découplage.

Constater l'existence du découplage peut tout d'abord passer par une analyse descriptive des séries de consommation d'énergie et de PIB réel. Dans ce cas, la précaution à prendre tient à la construction des séries statistiques. Pour la consommation d'énergie, le chercheur doit pouvoir justifier d'un régime de responsabilité ou, a minima, comparer les résultats lorsque le régime varie. Cela est également vrai pour le PIB réel dont de nombreuses conventions peuvent avoir un impact (frontières, effet qualité, année de référence). Alors qu'il est relativement commun dans la littérature d'avoir plusieurs estimations quant aux séries de consommation d'énergie, l'utilisation de différentes séries de PIB réel n'est jamais discutée. La littérature gagnerait à poursuivre dans cette direction.

Si elle constate (ou non) le découplage, cette analyse de séries statistiques ne dit pas grand-chose des phénomènes à l'œuvre. Or, pour les défenseurs de la croissance verte, dont les théoriciens de la CEK font partie, le découplage serait atteint grâce aux progrès technologiques ainsi que par la réorientation structurelle de nos économies. Pour vérifier cette hypothèse, l'analyse de décomposition d'index permet de mesurer la contribution de ces deux facteurs à la consommation d'énergie. Cependant, cette méthode pose problème. Il

faut tout d'abord être vigilant quant aux décompositions retenues. Sans décompositions suffisamment fines, les effets mis en évidence par la CEK sont surestimés. Plus fondamentalement, le caractère explicatif des décompositions d'index est discutable. La mesure de la contribution considère les variables comme indépendantes les unes des autres. Une manière de traiter ces difficultés suppose de se tourner vers la modélisation de la croissance. En effet, la modélisation offre la possibilité d'endogénéiser un certain nombre de variables en précisant le lien entre elles. Dans notre cas, il faut pouvoir saisir comment les variables telles que la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique participent à la dynamique de croissance. Confrontés à ces difficultés, les travaux sur l'effet rebond, présentés dans la dernière sous-section, mobilisent tous une théorie de la croissance sous-jacente, dans laquelle le chercheur propose déjà une manière d'articuler ces variables entre elles. Par exemple, dans le cas de la théorie néoclassique, l'énergie est traitée comme un input à côté du travail et du capital, plus ou moins substituable, dans le cadre de fonctions de production agrégée. Cette représentation est-elle satisfaisante ? Les modèles utilisés par les travaux sur l'effet rebond ne répondent pas à ces questions. Comme l'indique Sorrel⁶⁷, ces remarques invitent à se tourner vers la question plus large du rôle de l'énergie dans le processus de croissance.

Les deux prochains chapitres seront ainsi consacrés aux théories de la croissance. Le chapitre 2 présentera la manière dont l'énergie est intégrée au modèle de Solow, à travers des fonctions de production agrégées, enrichies d'un facteur énergie. Le chapitre 3 présentera deux théories hétérodoxes, la théorie classique et la théorie physiocratique, toutes deux regroupées sous terme « d'approche par le surplus » et qui propose une manière différente d'intégrer l'énergie à l'analyse de la croissance économique.

⁶⁷ Voir la citation en fin de section 2.2.3.

CHAPITRE 2.
L'ENERGIE ET LES FONCTIONS DE PRODUCTION AGREGEE.
EVALUATION DE LA PERTINENCE DU CADRE NEOCLASSIQUE
POUR INTÉGRER L'ENERGIE À LA THEORIE DE LA
CROISSANCE

PLAN DU CHAPITRE 2

INTRODUCTION DU CHAPITRE 2	119
1. LA THÉORIE NEOCLASSIQUE DE LA CROISSANCE ET LA QUESTION ÉNERGETIQUE.....	120
1.1. LE MODÈLE DE SOLOW	121
1.2. L'INTÉGRATION DES RESSOURCES NATURELLES DANS LE MODÈLE DE SOLOW	125
1.3. LES ÉVALUATIONS EMPIRIQUES DE LA SUBSTITUABILITÉ ENTRE CAPITAL ET ÉNERGIE	130
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE SECTION	135
2. ÉCONOMIE ÉCOLOGIQUE ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE : D'UN PARADIGME ALTERNATIF À UNE NOUVELLE SYNTHÈSE AVEC LA THÉORIE NEOCLASSIQUE ?.....	138
2.1. LA THERMODYNAMIQUE COMME FONDAMENT DU NOUVEAU PARADIGME BIOÉCONOMIQUE CHEZ GEORGESCU-ROEGEN	138
2.2. LA THÉORIE NEO-THERMODYNAMIQUE DE LA CROISSANCE : UNE CRITIQUE INTERNE DE LA THÉORIE NEOCLASSIQUE PAR L'ÉCONOMIE ÉCOLOGIQUE.....	143
2.3. LA THÉORIE NEO-THERMODYNAMIQUE À L'ÉPREUVE DE LA CONTROVERSE DES DEUX CAMBRIDGE. 151	
2.3.1. Enjeux épistémologiques autour des fonctions des productions agrégées.....	151
2.3.2. Les réponses de la théorie néo-thermodynamique à la controverse des deux Cambridge	157
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME SECTION	161
3. DES IMPASSES DE L'USAGE DE FONCTION DE PRODUCTION AGREGÉ À LEUR DEPASSEMENT : UNE EXPLORATION DES ALTERNATIVES	162
3.1. L'EXERGIE UTILE COMME MESURE DE LA PRODUCTION PHYSIQUE AGREGÉE	163
3.2. CALCULER UN RATIO DE DÉPENDANCE ENTRE LA PRODUCTION PHYSIQUE ET L'ÉNERGIE.....	166
3.3. ARTICULER LA RÉALITÉ MONÉTAIRE ET RÉALITÉ PHYSIQUE : UNE TYPOLOGIE DES DIFFÉRENTES APPROCHES	169
CONCLUSION DE LA TROISIÈME SECTION	176
CONCLUSION DU CHAPITRE 2 : LA NECESSITÉ D'ABANDONNER LE CADRE STANDARD ET DE SE TOURNER VERS D'AUTRES PARADIGMES.....	177

Introduction du chapitre 2

Au terme du précédent chapitre, nous avons conclu que l'analyse du découplage nécessitait d'étudier les théories de la croissance et la manière dont celles-ci intègrent la consommation d'énergie. En effet, pour déterminer si la croissance peut se faire avec de moins en moins d'énergie, il est pertinent de comprendre le rôle que joue cette dernière dans ce processus. Cette piste de recherche est explorée au sein des chapitres 2 et 3. Nous débutons, dans le présent chapitre, par la théorie néoclassique de la croissance dans la mesure où elle constitue la représentation *mainstream*, la plus connue, que l'on trouve en bonne place dans la plupart des manuels d'économie. Par la suite, des représentations plus hétérodoxes, à savoir les théories classiques et physiocratiques et leurs prolongements contemporains, seront présentées. Elles feront l'objet du chapitre 3.

La première section du présent chapitre est consacrée au modèle de Solow et plus généralement à la théorie de la croissance néoclassique, laquelle fait usage de fonctions de production agrégées. L'objectif est de voir comment les ressources naturelles, et en particulier les ressources énergétiques, ont été intégrées à ce cadre d'analyse. En effet, c'est sur cette base que les néoclassiques considèrent qu'une croissance verte est possible, à condition que les ressources naturelles soient substituables par du capital. Dans un second temps, nous examinons la littérature empirique qui évalue le degré de substituabilité entre l'énergie et le capital technique. Une analyse critique des résultats est menée.

La deuxième section est consacrée à l'économie écologique, branche de l'économie qui, à partir des années 1970, se développe en réaction à la manière dont sont abordées les questions d'environnement dans le cadre néoclassique. Les économistes écologiques insistent en particulier sur l'importance de la thermodynamique, la physique de l'énergie, pour discuter des contraintes qui pèsent sur les activités de production et, plus largement, sur la croissance. Cela étant, une partie de ces auteurs, ceux appartenant à la théorie néo-thermodynamique (Ayres, Warr, Kümmel, etc.), ne rejettent pas totalement l'approche néoclassique et proposent des amendements aux fonctions de production agrégée, une position que l'on peut qualifier de *critique interne*. Cette section a pour objectif de montrer la manière dont la théorie néo-thermodynamique estime pouvoir réconcilier la théorie néoclassique de la croissance avec les principes de la thermodynamique. Nous menons une évaluation critique

de cette synthèse à l'aune des critiques postkeynésiennes portées lors de la controverse des deux Cambridge.

Dans notre troisième et dernière section, sur la base des résultats mis en avant dans la section précédente, nous mettons en évidence un paradoxe. Les agrégats monétaires ne permettent pas de discuter d'une relation technique entre l'énergie et la production. Mais le recours à des agrégats physiques pose une autre difficulté : la perte de sens économique. Ce paradoxe conduit à reconnaître l'existence de deux dimensions distinctes de la réalité qui ne doivent pas être confondues, le monétaire et le physique. À partir d'une analyse de la littérature, cette section propose une typologie de la manière qu'ont les différents paradigmes économiques d'articuler ces deux dimensions.

1. La théorie néoclassique de la croissance et la question énergétique

La théorie néoclassique de la croissance peut être présentée à partir du modèle fondateur de Solow. La première sous-section rappelle l'architecture du modèle ainsi que les principales hypothèses, préalable nécessaire pour comprendre la manière dont l'énergie va être intégrée à ce cadre (1.1.). En effet, si à l'origine ce modèle ne considère que les facteurs travail et capital ainsi qu'un progrès technique exogène, la publication du rapport Meadows en 1972 va conduire à l'ajout d'un nouvel input : les ressources naturelles. Sur cette base, les néoclassiques estiment que la durabilité de la croissance (c'est-à-dire la capacité à découpler la production de l'usage de ressources naturelles) dépend d'un paramètre clef : le degré de substituabilité entre l'énergie et le capital (1.2.). C'est pourquoi notre troisième sous-section présentera les travaux empiriques qui évaluent le degré de substituabilité énergie et capital. Nous insisterons sur les difficultés méthodologiques d'un tel exercice et la robustesse des résultats obtenus (1.3.)

1.1. Le modèle de Solow

Ce modèle est présenté par Robert Solow dans un article paru dans le *Quarterly Journal of Economics* en 1956, intitulé *A contribution to the theory of economic growth*. Cette contribution intervient dans un contexte particulier : à l'époque et à partir d'un modèle keynésien, les économistes Harrod et Domar montrent que l'instabilité est une caractéristique centrale du phénomène de croissance. L'ambition de Solow, annoncée dès l'introduction de son papier, est de questionner les résultats d'Harrod et Domar en insistant sur le caractère restrictif de leurs hypothèses, en l'occurrence la complémentarité entre le capital et le travail : « The bulk of this paper is devoted to a model of long-run growth which accepts all the Harrod-Domar assumptions except that of fixed proportions. » (Solow, 1956, p.66).

L'autre apport du modèle de Solow, développé à partir de 1957 dans un article intitulé *Technical Change and the Aggregate Production Function*, est de fournir un cadre pour saisir la contribution du progrès technique à la croissance. Cet élément était, lui aussi, absent du modèle d'Harrod et Domar : « The new wrinkle I want to describe is an elementary way of segregating variations in output per head due to technical change from those due to the availability of capital per head » (Solow, 1957, p.312).

En ce sens, la théorie de Solow n'identifie pas de nouvelles sources à la croissance que la littérature précédente aurait jusqu'ici ignorées, elle propose plutôt une nouvelle formalisation des principaux facteurs et, en même temps, une méthode pour mesurer leur contribution rôle : la décomposition analytique de la croissance. Fait notable pour notre propos, lors de ce premier développement du modèle, la nature est totalement absente du processus de production : « there is no scarce nonaugmentable resource like land », écrit Solow (1956, p. 67), et, par extension, pas d'énergie. Un tel enrichissement aura lieu plus tard, en 1974, lorsqu'il faudra répondre aux prévisions du rapport Meadows (1972).

Dans le modèle de 1957, l'économie nationale ne produit qu'un seul bien qui peut être utilisé pour la consommation et l'investissement. Ce bien est produit par des combinaisons diverses de capital technique et de travail, les deux seuls facteurs de production retenus. Comme chez Harrod et Domar, cette relation technique est représentée par une *fonction de production agrégée* : tout le travail de l'économie est capturé par l'agrégat L, tout le capital par l'agrégat K, malgré l'hétérogénéité du parc de machines et des qualifications des

travailleurs. Cette simplification sera l'objet de vives controverses sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

Toutefois, à l'inverse d'Harrod et de Domar, il existe une possibilité de substitution entre les facteurs de production. Les isoquantes sous-jacentes sont ainsi conformes aux hypothèses néoclassiques standard : la productivité marginale est positive et décroissante. D'après Pasinetti (1977), la spécificité du courant néoclassique tient précisément à la généralisation des rendements marginaux décroissants à tous les facteurs de production, là où les économistes classiques les réservaient au seul facteur « terre ». En raison de la possibilité de substitution, Solow considère que son modèle est plus généraliste que celui d'Harrod et Domar. Ce dernier ne serait qu'un cas restreint à la situation où les facteurs de production sont strictement complémentaires. Pour cette raison, la fonction de Cobb-Douglas est retenue par Solow car elle permet de reproduire les hypothèses néoclassiques : rendements d'échelle constants (fonction de degré 1) et substituabilité entre les facteurs de production (il existe une diversité de combinaisons permettant une somme de paramètres égale à 1).

Autre rupture avec Harrod et Domar, Solow introduit une hypothèse relative à l'investissement. Désormais, l'épargne est nécessairement investie, conformément à la loi de Say. Les marchés sont réputés produire cet équilibre à long terme (rôle du taux d'intérêt), là où, chez Keynes, l'égalité macroéconomique entre investissement et épargne résultait du multiplicateur. Le modèle de Solow est ensuite bouclé en faisant l'hypothèse que le taux d'épargne est constant, c'est-à-dire que l'épargne constitue une fraction fixe du revenu.

En résumé :

- La production (ou le revenu national) dépend du capital par tête, mais les rendements marginaux sont décroissants. De ce fait, l'augmentation du capital par tête augmente la production, mais de moins en moins vite.
- Le capital par tête dépend de l'investissement, mais également du rythme de dépréciation du capital qui est fixe.
- Le capital accumulé dépend directement du taux d'épargne, de sorte que l'investissement est une fonction croissante du revenu.

Dans ce cadre, si la population est stable et en l'absence de progrès technique, il existe un état stationnaire vers lequel converge l'économie. En effet, l'augmentation du capital par tête fait augmenter la production mais de moins en moins. Comme la production et le revenu national ralentissent, l'investissement ralentit et le stock de capital tend à augmenter de moins en moins vite. Dans la mesure où le capital installé s'use à un certain rythme de dépréciation, il arrive un stade où le capital par tête n'augmente plus : la part du revenu épargnée-investie permet tout juste de remplacer les équipements déclassés. Une population en croissance vient changer la donne en termes de production totale, mais les résultats en termes de production par tête sont les mêmes. En définitive, seul un progrès technique, exogène dans le modèle, permet de sortir de cette situation.

La décomposition analytique de la croissance

Ce cadre théorique fournit une méthode pour apprécier la contribution des différents facteurs de production à la croissance. Pour y parvenir, il faut spécifier les paramètres (élasticités à l'output) de la fonction de production, ce qui est possible à partir du cadre théorique néoclassique. On utilise ici l'hypothèse de rémunération égale à la productivité marginale, déduite du cadre microéconomique (le programme du producteur). En effet, l'optimum du producteur correspond à une situation où la substitution entre les facteurs de production s'arrête car il n'y a pas de meilleure solution technique pour un ensemble de prix donnés. Cette combinaison productive optimale minimise le coût total pour un niveau de production donné, ce qui graphiquement correspond à l'isoquante la plus basse dans le plan avec la droite d'isocoût tangente. C'est le cas lorsque le taux marginal de substitution technique (TMST) (pente de l'isoquante) est égal au rapport des prix relatifs des facteurs (pente de la courbe d'isocoût). À l'optimum, on a donc $P_{mK}/P_{mL} = r/w$, avec P_{mK} et P_{mL} , respectivement la productivité marginale du capital et du travail, et r et w la rémunération unitaire du capital et du travail.

Cette règle de rémunération présente également un intérêt mathématique car elle vient « épuiser le produit » dans la mesure où l'ensemble des salaires et des profits versés correspond à la valeur de la production. En faisant l'hypothèse que la fonction de production à rendement constant existe et que la règle de la rémunération à la productivité marginale est

observée, il est possible de déduire l'effet d'une variation de la quantité d'un facteur de production sur le niveau de production. C'est le *théorème du cost-share* (en français, théorème de l'épuisement du produit, TEP). Par exemple, si les travailleurs reçoivent 75% de la valeur ajoutée, alors, à la marge, en réduisant la quantité de travail de 1%, la production sera réduite de 0,75%. Ainsi, la part des revenus reçus est un indicateur de la productivité marginale du facteur travail.

Grâce au TEP, il est possible de déterminer les paramètres de la fonction de production et procéder à une estimation empirique des quantités produites. Pour ce faire, il suffit de disposer de séries statistiques sur la quantité de facteurs de production (heures de travail, quantité de capital en monnaie déflatée). Les données sur le progrès technologique ne sont pas nécessaires, ce dernier étant défini comme une fonction du temps. La contribution du progrès technique est un résidu.

L'utilisation de cette méthode donne de très bons résultats empiriques : les séries de production obtenues par cette méthode sont en adéquation quasi parfaite avec les séries historiques de PIB réel ($R^2 > 99$). Cela amènera Paul Douglas, inventeur de cette fonction, à conclure lors d'une conférence en 1976 : « Un grand nombre de travaux indépendants corrobore la formule originale de Cobb-Douglas mais, ce qui est encore plus important, la bonne approximation des coefficients estimés avec les parts effectivement reçues [par les facteurs] conforte la théorie marginaliste de la répartition, aux dépens de celle de Marx » (Douglas, 1976, p.914). De même, Gregory Mankiw, auteur de nombreux manuels, estime que les bons résultats empiriques renforcent la validité d'une telle représentation :

« Quand j'enseigne le modèle de croissance de Solow, je trouve toujours rassurants les R^2 élevés. Il n'y a aucun doute qu'un R^2 faible aurait ébranlé ma foi »
(cité par Guerrien (2017, p.1)).

En résumé, au terme de cette présentation de la démarche de Solow nous pouvons mettre en évidence trois conclusions qui structureront la manière d'intégrer l'énergie. 1) La croissance est le résultat de la combinaison de facteurs de production que l'on peut agréger de sorte que la totalité de l'économie peut être représentée par une fonction de production. 2) Ces facteurs tendent à être rémunérés à leur productivité marginale de sorte que les

revenus reçus peuvent servir à mesurer la contribution de chacun des facteurs. Ces deux hypothèses sont absolument centrales et Solow très clair sur ce point :

« I would like to remind my colleagues and their readers that every piece of empirical economics rests on a substructure of background assumptions that are probably not quite true. For instance, these total-factor-productivity calculations require not only that market prices can serve as a rough-and-ready approximation of marginal products, but that aggregation does not hopelessly distort these relationships »
(Solow, 1988, p.314)

La validité de cette représentation du processus de croissance serait toutefois attestée par les bonnes prédictions obtenues à partir des fonctions de production agrégées paramétrées en fonction de ces prémisses théoriques (la rémunération à la productivité marginale).

Dans les années 1950, les néoclassiques ne considèrent plus le facteur de production terre qui, chez les classiques, permettait d'intégrer les contraintes de la nature. La publication du rapport Meadows en 1972 va toutefois obliger la théorie néoclassique à s'amender sur ce point et à intégrer les ressources naturelles à leur analyse de la croissance.

1.2. L'intégration des ressources naturelles dans le modèle de Solow

Dans le modèle de Solow, en dehors de l'absence de progrès technique, il n'existe pas de limites à la croissance. Au tournant des années 1970, le rapport Meadows (1972) estime, au contraire, que les ressources naturelles, notamment énergétiques, peuvent être un facteur limitant. À l'initiative du Club de Rome, le modèle développé par les chercheurs du MIT intègre les relations entre l'économie et l'environnement via des boucles de rétroaction. Ce rapport soulève une énorme controverse et constitue un défi lancé aux économistes conventionnels. Les néoclassiques, au premier chef Solow (1974), mais aussi Stiglitz (1974), vont alors intégrer les ressources naturelles aux fonctions de production agrégées sous la forme d'un nouvel agrégat (R pour ressources). Solow et Stiglitz cherchent à montrer sous quelles conditions le niveau de vie par tête peut être maintenu à partir d'un stock de ressources épuisables. La nouvelle fonction de production devient :

$$Q = K^\alpha R^\beta L^\gamma, \alpha + \beta + \gamma = 1$$

Avec Q la production, K le capital, R les ressources et L la force de travail.

Cette intégration se fait sans véritable prise en compte de la spécificité de ces ressources pour le processus économique. Aucune ouverture aux sciences comme la physique n'est opérée qui aurait pu permettre d'affiner, au niveau conceptuel, la relation entre l'énergie et la production. Cette définition faible (au sens d'absence de spécificité) des ressources naturelles permet à Solow de traiter théoriquement une situation qu'il juge « intéressante », mais dont on ne parvient pas à savoir si elle est consistante avec la réalité physique des processus productifs. Dans cette situation, la productivité moyenne des ressources est *illimitée* :

« For the problem to be interesting and substantial, R must enter in a certain way. For example, if production is possible without natural resources, then they introduce no new element. [...] On the other hand, if the average product of resources is bounded, then only a finite amount of output can ever be produced from the finite pool of resources, and the only level of aggregate consumption maintainable for infinite time is zero. The interesting case is one in which $R = 0$ entails $Q = 0$, but the average product of R has no upper bound »
(Solow, 1974, p.34)

Sous cette hypothèse, il est possible d'envisager un flux de production stable à partir d'une quantité de ressources de plus en plus faible. L'épuisement des ressources étant alors compensé par le fait qu'on parvient à produire avec de moins en moins de ressources (Q/R peut augmenter indéfiniment). On pourrait dire que le découplage absolu entre énergie et production est déjà présent dans les hypothèses. Chez Solow, cette productivité des ressources peut croître grâce à l'augmentation du capital. Plus précisément, il faut que la productivité marginale du capital (α) soit supérieure à la productivité marginale des ressources (β). Dans ce cas, le TMST ou rapport des productivités marginales (α/β) est supérieur à 1. En terme littéral, enlever une unité de ressources réduit la production de β , mais ajouter une unité de capital, à la place, permet d'augmenter la production de α . Cela peut sembler contradictoire avec les hypothèses néoclassiques, en particulier celle de productivité marginale décroissante. En effet, d'après le cadre d'analyse néoclassique, le TMST est censé

se modifier le long de l'isoquante : plus la combinaison devient intensive en capital relativement aux ressources, plus il faudra de capital pour maintenir un même niveau de production. En effet, à mesure que la combinaison s'enrichit en capital, le capital devient moins efficace (sa productivité marginale, α , diminue). À l'inverse, d'après cette hypothèse, la productivité marginale des ressources est censée augmenter à mesure que l'on en utilise moins. Si on poursuit le raisonnement, on ne voit pas pourquoi, à un moment donné, β ne deviendrait pas supérieur à α , c'est-à-dire un TMST < 1 . Si on admet ce raisonnement, seule une très forte (et croissante) disponibilité en capital est susceptible de compenser la moindre disponibilité en ressources naturelles. Ces conditions valent pour un niveau de production qui resterait stable. Pour avoir croissance, l'augmentation du capital devrait être d'autant plus soutenue.

Ce raisonnement sur la substituabilité entre capital et ressources est également présent chez Stiglitz qui s'emploie, lui aussi et la même année, à intégrer les ressources naturelles à l'analyse néoclassique de la croissance (Stiglitz, 1974) :

« even with no technical change, capital accumulation can offset the effects of the declining inputs of natural resources, so long as capital is more important than natural resources, i.e. the share of capital is greater than that of natural resources ». (p.131)

Comme le signale la citation de Stiglitz, cette substituabilité peut être appréciée à partir de la méthode du *cost-share* (ou TEP) que nous avons détaillée précédemment. D'après ce raisonnement, l'énergie apparaît substituable puisque la part de la valeur ajoutée qui revient au secteur énergétique est très inférieure (autour de 8%) à celle qui revient au capital employé dans le reste de l'économie (30% en tendance). C'est d'ailleurs sur la base de cet argument qu'un éminent analyste de la croissance comme Denison (1979) estime que l'énergie joue un rôle mineur dans le processus de production. On notera au passage que l'input énergie n'est pas ici saisi pour lui-même (avec un agrégat spécifique), mais plutôt comme un output monétaire produit par du travail et le capital (ceux employés dans le secteur énergétique). L'énergie se résume donc à un travail et un capital spécifiques, bien loin de ce que pourrait être une définition physique de l'énergie, nous y reviendrons.

Stiglitz identifie un second facteur susceptible de nécessiter de moins en moins de ressources naturelles :

« The fact that there is a limited amount of natural resources and natural resources are necessary for production does not necessarily imply that the economy must eventually stagnate and then decline. Two offsetting forces have been identified: technical change and capital accumulation. [...] With technical change, at any positive rate, we can easily and paths along which aggregate output does not decline »
(Stiglitz, 1974, p.130-131).

Dans son modèle, le progrès technique est défini comme chez Solow, comme un résidu, une fonction du temps (noté e dans l'équation ci-dessous). Ce progrès technique est neutre au sens de Hicks, c'est-à-dire qu'il ne transforme pas le rapport des productivités marginales. La fonction de production agrégée s'écrit donc :

$$Q = e^{\delta t} K^{\alpha} R^{\beta} L^{\gamma}, \alpha + \beta + \gamma = 1$$

Stiglitz montre que, pour que la production (Q) puisse se maintenir à un niveau constant avec un stock de ressources épuisables, il faut que le taux auquel le progrès technique améliore la productivité des ressources (λ/β) soit supérieur à la croissance démographique (n), ici absente de l'équation.

Si on raisonne à population fixe, la condition devient $\beta < \lambda$, une solution proche de celle identifiée précédemment pour le capital. Ici, ce n'est pas l'augmentation soutenue de la quantité de capital qui permet de faire avec de moins en moins de ressources, mais le rythme du progrès technique. La représentation graphique ne permet de mettre en évidence que cette équivalence des résultats (figure 17). On part d'une combinaison productive initiale A permettant de réaliser un niveau de production $Q=10$. Les deux inputs sont le capital (K) et l'énergie (E). Mettons que la quantité d'énergie chute de $E1$ à $E2$ et entraîne avec elle la baisse du niveau de production de 10 à 5. La combinaison productive B est alors plus intense en capital qu'auparavant (la quantité d'énergie a chuté tandis que la quantité de capital est restée la même). Il y a alors deux possibilités pour retrouver le niveau de production initial ($Q=10$) :

- Dans le premier cas, il faut augmenter la quantité de capital de $K1$ à $K2$ pour compenser l'épuisement des ressources naturelles. L'ampleur de cette augmentation dépend du

rapport des productivités marginales. Dans tous les cas, la combinaison productive devient encore plus intensive en capital (point C) que celle de départ (A).

- Dans le second cas, c'est le progrès technique qui permet cela. On garde la même composition de la combinaison productive que celle de B, mais le progrès technique neutre au sens de Hicks permet d'obtenir une quantité supérieure d'output (10 au lieu de 5). Il y a translation de l'ensemble des isoquantes vers la gauche⁶⁸ : la combinaison B permet, désormais, de produire ce qu'on obtenait avec la combinaison D avant ce progrès technique.

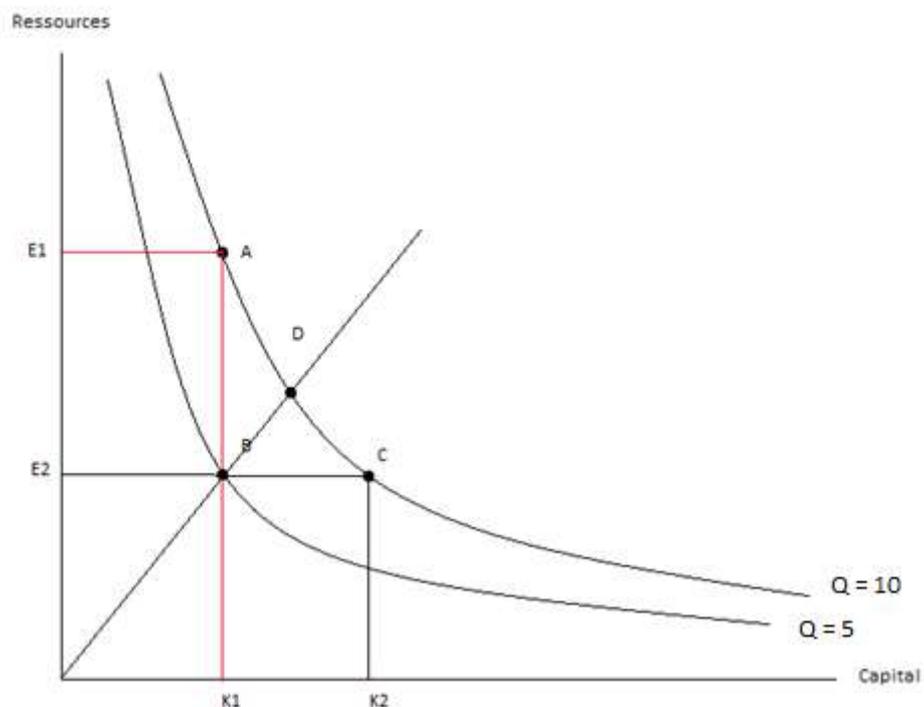


Figure 17. **Production constante et baisse de la quantité de ressources.**

Source : auteur.

En définitive, Stiglitz et Solow mettent en évidence les conditions théoriques suivant lesquelles l'épuisement des ressources naturelles n'engendre pas de décroissance de la production. Bien que le raisonnement vise à décrire une situation d'état stationnaire à partir

⁶⁸ L'isoquante $Q=10$ se déplace vers la gauche et remplace $Q=5$.

d'un stock fini (donc décroissant) de ressources, leur réponse n'est pas totalement déconnectée de l'étude de la possibilité d'une croissance verte. En effet, dans les deux cas, l'enjeu est bien de savoir s'il est possible de découpler (de manière absolue) les ressources naturelles (et en particulier de l'énergie) de la production de biens et services. Ainsi, ces travaux sont précieux pour notre recherche dans la mesure où ils identifient trois paramètres clefs susceptibles de permettre un découplage entre énergie et PIB : les productivités marginales du capital et de l'énergie ainsi que le rythme du progrès technique.

Stiglitz et Solow restent à un stade d'analyse théorique et ne se préoccupent pas de donner des valeurs réelles à ces paramètres. A minima, il est possible d'utiliser le théorème du *cost-share* et la part des facteurs dans le PIB pour estimer la productivité marginale, ce que fera, par exemple, Denison (1979). Pourtant, à la même époque, une littérature empirique s'est intéressée à la question de la substituabilité entre l'énergie et le capital – sur laquelle nous allons nous pencher. Ces deux littératures se sont développées de manière autonome (Couix, 2019) alors même que leurs questionnements sont proches et que la vérification empirique est un argument revendiqué par Stiglitz en faveur des fonctions de production. Dans notre dernière sous-section, nous présentons une analyse critique de ces résultats.

1.3. Les évaluations empiriques de la substituabilité entre capital et énergie

Pour apprécier les résultats de cette deuxième littérature, il est opportun de revenir sur la définition de l'élasticité de substitution et voir le lien qu'elle entretient avec les théorisations de Solow et Stiglitz. Comme l'explique Babeau (1964), deux types d'élasticité peuvent être distingués :

- **l'élasticité (de substitution) technique** qui étudie l'évolution de la combinaison productive consécutive à une variation des productivités marginales relatives, c'est-à-dire le taux marginal de substitution technique (Hicks, [1932] 1963). Du point de vue technique, cette définition est à privilégier.
- **l'élasticité (de substitution) prix** qui étudie l'évolution de la combinaison productive consécutive à une variation des prix relatifs.

Dans le cas de l'énergie et du capital, l'élasticité technique (ϵ_t) s'écrit :

$$\epsilon_t = \frac{\Delta \frac{K}{E}}{\Delta \frac{PmE}{PmK}}$$

Avec K le capital, E la quantité d'énergie, PmE et PmK, respectivement la productivité marginale de l'énergie et du capital.

Alors que Stiglitz et Solow ne prenaient en compte que le TmST (ils comparent PmE et PmK), la substituabilité est un concept légèrement différent. Graphiquement, le terme figurant au dénominateur correspond à la pente de l'isoquante. L'élasticité de substitution mesure donc à quelle vitesse la pente de l'isoquante se verticalise (ou s'horizontalise) à mesure que la combinaison productive évolue. Ainsi, un facteur est réputé peu substituable lorsqu'une augmentation de sa part dans la combinaison technique (mettons le capital, relativement à l'énergie) entraîne une forte augmentation du TmST ($\Delta(PmE/PmK)$). En effet, dans ce cas, la pente de l'isoquante est très courbée et se rapproche d'une isoquante complémentaire (figure 18) : il faudra donc, très rapidement, beaucoup plus de capital pour pallier une baisse de l'énergie. Dans le cas d'un bien complémentaire cette quantité tend vers l'infini de sorte que l'élasticité tend vers zéro. A l'inverse, si l'énergie est très substituable, il est *toujours possible* de remplacer l'énergie par une quantité quasi fixe de capital. La variation du TmST est nulle et l'élasticité de substitution devient infinie. Deux autres cas intermédiaires (substituable et faiblement substituables) sont présentés dans le tableau 17.

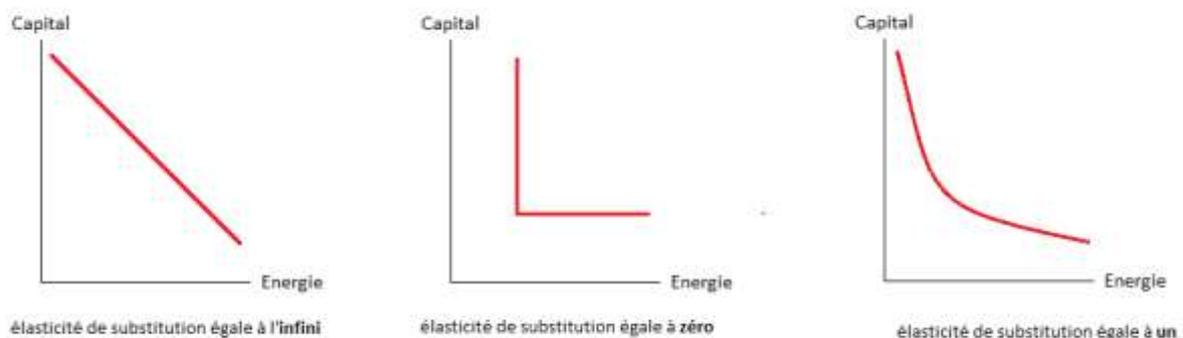


Figure 18. **Représentation graphique de l'élasticité de substitution.**

Source : auteur.

Pour une variation donnée de K/E	Fortement substituable	Substituable	Faiblement substituable	Complémentaires
TMST	Augmente à un rythme inférieur à $\Delta K/E$	Augmente au même rythme que $\Delta K/E$	Augmente à un rythme supérieur à $\Delta K/E$	Augmente à l'infini
Elasticité de substitution	Entre 1 et l'infini	1	Entre 0 et 1	0

Tableau 17. **Les différentes valeurs de l'élasticité.**
Source : auteur

La mesure de l'élasticité de substitution apparaît donc comme un enjeu important pour discuter de la possibilité d'une croissance verte dans le cadre d'analyse néoclassique. Le cas le plus favorable, pour Solow et Stiglitz, est celui où l'élasticité de substitution est supérieure à 1 : le fait de réduire la part de l'énergie dans la combinaison productive (K/E augmente) augmente modérément le TmST (PmE/PmK). Dans ce cas, la productivité marginale du capital chute peu et seule une faible quantité de capital supplémentaire est nécessaire pour compenser l'énergie en moins. Par exemple, c'est le cas des fonctions Cobb-Douglas où, par définition, l'élasticité de substitution est fixée à un⁶⁹. Dans le cas où l'élasticité de substitution serait inférieure à 1, seul un progrès technique est susceptible d'éviter les limites à la croissance⁷⁰. En termes de forme fonctionnelle, une fonction CES (Constant Elasticity of Substitution) offre cette possibilité, bien qu'une élasticité constante soit contestable. En effet, il y a peu de chance que le rapport d'utilisation des facteurs évolue au même rythme que le TmST. Certains seuils et discontinuités pourraient exister. Les évaluations

⁶⁹ La discussion sur les formes fonctionnelles pertinentes à retenir pour intégrer l'énergie aux fonctions de production agrégée est abordée plus en détail dans la section 2.2.

⁷⁰ En effet, le progrès technique, analysé dans le modèle de Stiglitz, laisse le rapport des productivités marginales inchangé.

empiriques de la substituabilité sont donc à prendre avec précaution : ce sont des estimations réalisées à un moment donné qui ne sauraient donner une valeur définitive de la relation.

Chez Solow et Stiglitz, la substituabilité est un concept qui se veut technique : il est bien question chez eux de *productivités marginales*. Cependant, dans la littérature empirique que nous allons présenter, un glissement s'opère entre les deux définitions de la substituabilité : la substitution s'apprécie à la suite d'une variation de prix. Ces travaux considèrent donc que les prix relatifs sont un proxy convenable du TmST ce qui vaut adhésion à l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale.

En microéconomie néoclassique, ces deux définitions de l'élasticité sont, en effet, réputées équivalentes : à l'optimum, le rapport des prix est égal au rapport des productivités marginales. Ce résultat suppose néanmoins que les facteurs de production ne soient pas complémentaires puisque, dans ce cas, la productivité marginale serait nulle (impossibilité d'augmenter la production en ajoutant un seul input). Il faut également que les inputs soient parfaitement divisibles, autrement, il ne serait pas possible de mener un programme d'optimisation. Par ailleurs, l'égalité entre $\frac{P_{mE}}{P_{mK}}$ et $\frac{pE}{pK}$ suppose qu'à condition que les marchés fonctionnent en concurrence pure et parfaite.

A première vue, l'utilisation de cette méthode peut paraître paradoxale au sens où, pour mesurer un degré de substituabilité (fort, faible, nul), on fait l'hypothèse que les facteurs sont substituables pour pouvoir utiliser la variable prix. Généralement, on justifie cette validité en invoquant le long terme ou le niveau plus agrégé (où les possibilités de substitution sont plus facilement envisageables).

Les résultats obtenus par cette littérature sont divergents. Par exemple, pour la période 1947-1971, Berndt et Wood (1975) trouvent que l'énergie et le capital sont complémentaires. Avec des données en coupe transversale, Griffin et Gregory (1976) trouvent, à l'inverse, que le capital et l'énergie sont substituables. Depuis ces travaux fondateurs, il n'existe toujours pas de consensus (Frondel, 2011). La dernière méta-analyse en date compare 34 publications parues entre 1975 et 2002 et montre que sur les 317 élasticités prix considérées, une part importante est positive (indiquant une substituabilité) mais la part

d'estimations négatives reste significative (indiquant plutôt une complémentarité) (Koetse, de Groot et Florax, 2008).

Une partie de ces auteurs s'est interrogée sur l'origine des divergences de résultats obtenus. Parmi les facteurs identifiés, figurent le type d'industries et de pays considérés, le type d'énergie analysé (Altunç et Yildirim, 2020), le type d'élasticité retenue (Berndt et Wood, 1979 ; Frondel, 2011) ou encore l'utilisation de données temporelles ou de panel (Apostolakis, 1990) . Une dernière source de divergence est la part en valeur de l'énergie (Frondel et Schmidt, 2002), le *cost-share* (cf. section. 1.1.). En repartant de la formule de l'élasticité prix, ces deux auteurs montrent qu'elle peut, dans le cadre d'une fonction de production translog⁷¹, s'écrire sous la forme suivante :

$$\varepsilon(KE) = \frac{\gamma KE}{SK} + SE$$

Avec εKE l'élasticité, KE la combinaison productive, SE la part en valeur de l'énergie, SK la part en valeur du capital, et γ un paramètre relatif à la combinaison productive composée de capital et d'énergie. Dans la mesure où γKE est généralement de faible amplitude, les auteurs font l'hypothèse que la part en valeur des différents facteurs va surdéterminer l'élasticité estimée : « using a static translog approach tends to reduce the issue of factor substitutability to a question of cost shares » (p.54). Pour tester leur hypothèse, Frondel et Schmidt repartent des différents travaux identifiés par Apostolakis (1990) dans sa revue de littérature. Ils comparent les élasticités obtenues en fonction de la part en valeur de l'énergie (figure 19). Leurs résultats mettent en évidence une relation linéaire entre élasticité et part en valeur : plus la part en valeur est élevée, plus l'élasticité prix est forte. Ainsi, « 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 », concluent ces auteurs (Frondel et Schmidt, 2002, p.72).

⁷¹ Cette fonction est très majoritairement utilisée par cette littérature empirique.

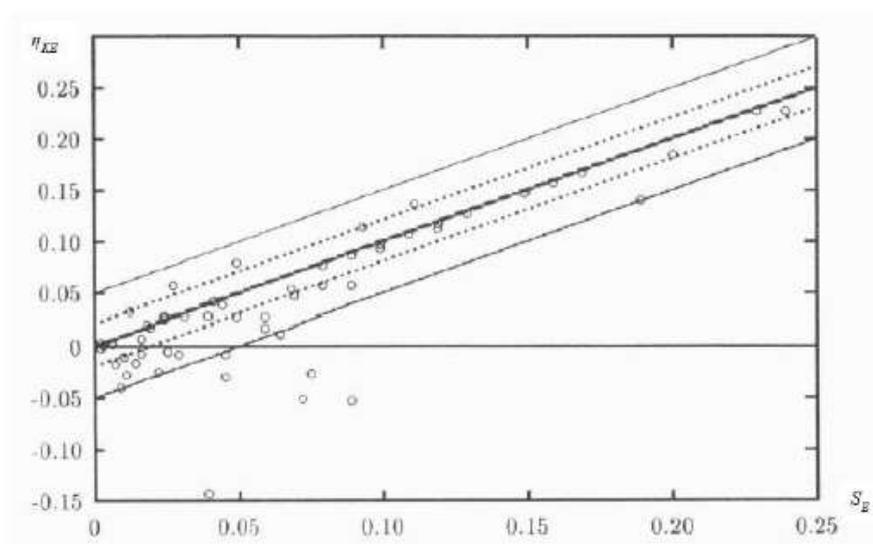


Figure 19. **La relation entre l'élasticité prix et la part en valeur de l'énergie**

Source : Frondel et Schmidt (2002, p.63).

En définitive, ces estimations empiriques ne permettent pas de véritablement éclairer les questions qui étaient soulevées par les modèles théoriques. Elles ne parviennent pas à mesurer la relation technique entre capital et énergie et donc de discuter de la durabilité de la croissance économique. Les productivités marginales ne sont pas mesurées directement mais approchées à partir d'une hypothèse forte : la rémunération d'un facteur à sa productivité marginale qui surdétermine les résultats obtenus.

Conclusion de la première section

Cette première section a permis de montrer la manière dont la théorie néoclassique de la croissance s'est saisie de la question des ressources naturelles initialement absente de ses formalisations. Suite au rapport Meadows, l'énergie est intégrée à côté du travail et du capital dans des fonctions de production agrégée. Dans ce cadre, la possibilité d'un découplage s'apprécie à partir du rythme du progrès technique (exogène dans ces travaux) mais également de l'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie. La mesure de l'élasticité de substitution est donc un enjeu important mais l'importante littérature empirique sur le sujet n'a pas produit de résultats convergents. La difficulté méthodologique à laquelle sont confrontés ces travaux tient à la mesure de la productivité marginale du capital

et de l'énergie qui n'est pas directement observable. Les auteurs se rabattent alors sur l'élasticité-prix moyennant une hypothèse déterminante : la rémunération des facteurs de production à leur productivité marginale. Cette hypothèse est également au fondement du théorème de l'épuisement du produit (TEP) qui conclut à la mesure de la contribution d'un facteur à l'output à partir de la part des revenus reçus. Or, cette hypothèse est loin d'être neutre sur les résultats obtenus⁷². Une part en valeur élevée de l'énergie dans le PIB amène à conclure à 1) une contribution forte de l'énergie à la croissance (application du TEP), 2) à une substituabilité faible entre l'énergie et le capital, et 3) à l'impossibilité d'un découplage entre l'énergie et le PIB. À l'inverse, une part en valeur faible conduit aux conclusions opposées (tableau 18).

	Contribution de l'énergie à la croissance (TEP)	Substituabilité (prix) entre l'énergie et le capital	Découplage absolu entre énergie et PIB
Part en valeur de l'énergie élevée	Forte	Faible	Difficile
Part en valeur de l'énergie faible	Faible	Forte	Aisé

Tableau 18. **Impact de l'hypothèse de productivité marginale sur les scénarios de découplage.**
Source : auteur.

A titre d'exemple, pour les États-Unis entre 1949 et 2009, la part en valeur des dépenses énergétiques (au stade primaire) apparaît relativement modeste (figure 20). Mis à part la période 1974-1985, elle dépasse rarement les 7%. En application du cadre néoclassique, on peut donc conclure que, 1) à l'instar de Denison (1979), la contribution de

l'énergie à la croissance américaine apparaît donc faible, 2) l'input énergétique relativement est substituable et 3) le découplage énergétique est possible.

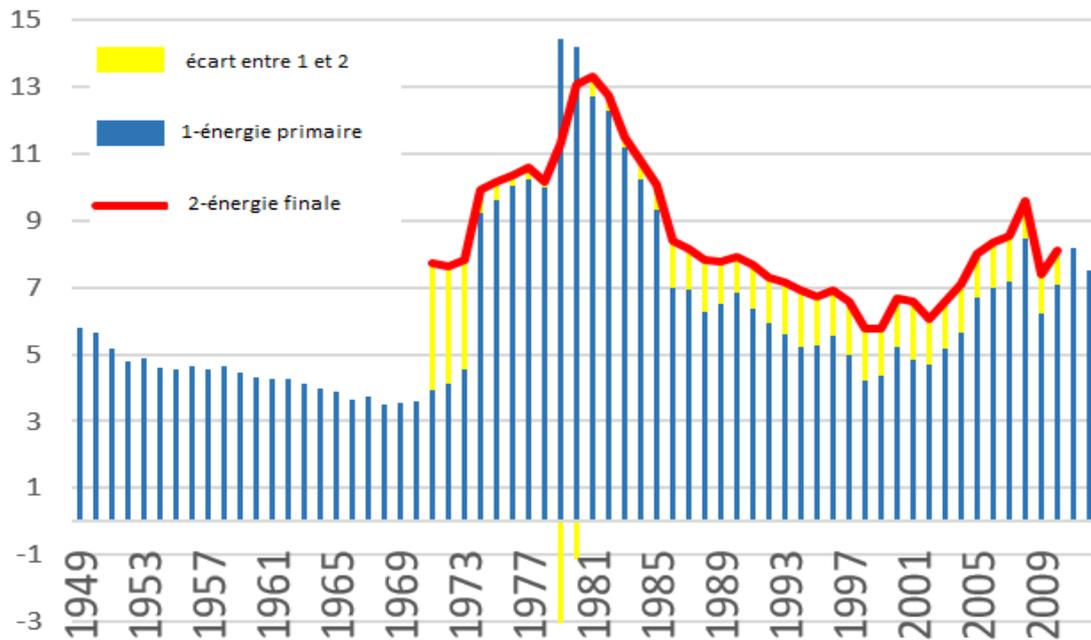


Figure 20. **Dépenses en énergie (primaire et finale) rapportées au PIB.**

Source : auteur. Données : Court and Fizaine (2016) pour l'énergie primaire et Agence Internationale de l'énergie pour l'énergie finale.

Ces conclusions heurtent la représentation du processus économique développée par l'économie écologique où flux de matières et énergies jouent un rôle fondamental. Dans la mesure où l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale est déterminante dans les résultats néoclassiques, elle fait l'objet de vives critiques par l'économie écologique. Le rapport que cette dernière entretient au cadre néoclassique, et plus particulièrement à l'usage des fonctions de production agrégée, fait l'objet de la section suivante.

2. Economie écologique et croissance économique : d'un paradigme alternatif à une nouvelle synthèse avec la théorie néoclassique ?

L'économie écologique réunit un ensemble de courants dont le socle commun est de considérer que les activités humaines dépendent de l'environnement dans lequel elles sont insérées. L'économie écologique étudie « les interactions complexes entre l'économie humaine et le fonctionnement physique et biologique de la planète Terre dont cette économie dépend », expliquent les deux auteurs du « Repères » publié sur le sujet (Douai et Plumecocq, 2017). Dit autrement, l'économie est encadrée dans un environnement naturel (Passet, 1979).

Parmi les différentes contributions fondatrices de l'économie écologique, nous présentons dans une première sous-section (2.1.) celle de Georgescu-Roegen (GR par la suite). Son objectif est de forger un nouveau paradigme – la « bioéconomie » – qui rendrait à la nature le rôle central qu'elle occupe dans le processus de production. Cette refondation passe par la mobilisation de lois découvertes par les sciences physiques et, plus précisément, par l'une de ses branches : la thermodynamique. Si Georgescu-Roegen appelle au développement d'une alternative en rupture avec la théorie néoclassique, d'autres auteurs comme Ayres sont moins critiques et acceptent de se situer dans une critique interne au paradigme standard. Cette branche de l'économie écologique, appelée par la suite théorie néo-thermodynamique, accepte de mener une discussion au sein des fonctions de production agrégées. Ces travaux sont présentés dans la sous-section 2.2.

2.1. La thermodynamique comme fondement du nouveau paradigme bioéconomique chez Georgescu-Roegen

La loi de l'entropie ou le caractère indispensable de l'énergie pour le processus de production

Comme évoqué au chapitre 1, le 1^{er} principe de la thermodynamique est celui de la conservation de la matière-énergie, c'est-à-dire le fait que l'homme ne peut ni créer, ni

détruire de la matière-énergie (GR regroupe ces deux éléments dans un même terme car ils ont des propriétés assez semblables dans sa démonstration). Dès lors, qu'est-ce que fait le processus économique étant donné qu'il ne peut produire ni matière, ni énergie ? Réponse : « il se limite à absorber de la matière-énergie pour la rejeter continuellement » (Georgescu-Roegen, 1979, p.46). Cela dit, il y a bien une différence entre ce qui est absorbé (inputs) et ce qui sort (outputs) du processus productif, mais cette différence est, d'un point de vue physique, qualitative. Pour le comprendre, il faut mobiliser la seconde loi de la thermodynamique appelée aussi loi de *l'entropie*.

L'entropie, nous dit GR, citant le dictionnaire, est « une mesure de l'énergie inutilisable dans un système thermodynamique » (p.47). Considérons la première partie de la définition : *la question de l'énergie utilisable*. L'énergie se présente sous deux états qualitativement différents : *l'énergie utilisable ou libre* (la basse entropie) sur laquelle l'homme peut exercer une maîtrise presque complète et *l'énergie inutilisable ou liée* (la haute entropie) que l'homme ne peut absolument pas utiliser. Exemple : l'énergie chimique contenue dans un morceau de charbon est de l'énergie libre, l'homme peut la transformer en chaleur, en travail mécanique. Lorsqu'on brûle ce morceau de charbon, son énergie chimique ne subit ni diminution ni augmentation (cf. le premier principe de conservation de la matière-énergie) mais « cette énergie initiale s'est tellement dissipée sous forme de chaleur, de fumée et de cendres que l'homme ne peut plus l'utiliser » (p.47), bref, elle est devenue de l'énergie inutilisable/liée. Et GR de conclure : « l'énergie liée est l'énergie chaotiquement dispersée » et l'entropie est « une mesure du désordre » (p.67).

Considérons maintenant la deuxième partie de notre définition initiale : le système thermodynamique. Il faut ici distinguer les systèmes clos, qui ne reçoivent aucun flux d'énergie et de matière extérieurs, des systèmes ouverts, qui en reçoivent. Par exemple, la Terre est un système ouvert puisqu'elle bénéficie du flux solaire. La loi de l'entropie établit que, dans un système thermodynamique clos, l'énergie devient irrévocablement de l'énergie liée (l'entropie augmente). Pour reprendre notre exemple du morceau de charbon : même s'il reste en terre, il deviendra, à terme, de l'énergie liée. Prise isolément, la Terre peut être considérée comme un système fermé. Le flux solaire (extérieur à ce système) – qui est un flux de basse entropie – vient en partie compenser l'augmentation de l'entropie (l'augmentation

de l'énergie liée). Même chose pour un organisme vivant (qu'on peut considérer comme un système thermodynamique ouvert) : nous puisons dans les sources de basse entropie terrestre pour compenser l'augmentation de l'entropie à laquelle notre organisme est sujet. Cela dit, le système qui regroupe l'organisme vivant et son environnement, lui, connaît une augmentation de l'entropie.

La basse entropie est donc précieuse pour toute vie biologique mais également pour tout système matériel puisqu'elle conditionne leur reproduction. On l'a vu avec le cas d'un organisme vivant, mais cela est aussi vrai pour une machine qui va s'user (une usure physique : les matériaux dont elle est composée vont se détériorer) et devra être remplacée par une nouvelle. Ce renouvellement se fait nécessairement par des prélèvements en matière-énergie libre, c'est-à-dire de la basse entropie.

Deux sources principales de basse entropie sont identifiées par GR : « le *stock* d'énergie libre des dépôts minéraux dans les entrailles de la Terre » et « le *flux* du rayonnement solaire intercepté par la Terre » (p.54). Ces deux sources se distinguent sur de nombreux points : l'homme a une maîtrise presque complète de la dot terrestre, alors qu'il ne peut utiliser *maintenant* le flux solaire à venir. La source terrestre nous fournit les matériaux de basse entropie avec lesquelles nous fabriquons nos biens les plus importants alors que le rayonnement solaire est la source de la vie sur Terre (photosynthèse chlorophyllienne). Enfin, le stock terrestre d'énergie est quantitativement une faible source comparée à celle fournie par le soleil (ces stocks terrestres tout entiers ne pourraient fournir que quelques jours de lumière solaire).

En résumé, pour reprendre une métaphore de GR, la loi de l'entropie peut être représentée par un sablier dans lequel on aurait de la matière-énergie. En haut, on trouverait de la basse entropie qui en s'écoulant dans la partie inférieure connaîtrait une transformation qualitative en haute entropie. Ce sablier ne peut être retourné : ce mouvement, comme le stipule le principe d'entropie, est irréversible.

Les conséquences sur la représentation du processus économique

Le processus économique est soumis à cette loi. La matière-énergie qu'absorbe le processus économique pour produire biens et services est dans un état de basse entropie – que GR appelle également *les ressources naturelles de valeur* – tandis que la matière-énergie qui en sort est dans un état de haute entropie – *les déchets sans valeur*. Le mot valeur est ici à prendre dans le sens de la *valeur d'usage*, l'utilité concrète des ressources pour le processus productif.

Dès lors, GR s'interroge sur le sens de ce processus économique puisque, d'un point physique, ce dernier paraît absurde : des *ressources naturelles de valeur* sont transformées en *déchets sans valeur*. Si on s'arrêtait là, le processus économique ne serait que gaspillage, anti-économique en quelque sorte. Cette contradiction est levée en expliquant que « le véritable produit économique du processus économique n'est pas un flux matériel de déchets mais un flux immatériel : *la joie de vivre* » (p.51). La lutte économique – la lutte pour la vie, pour la joie de vivre – de l'homme se concentre donc sur la basse entropie. Par exemple, la migration des peuples originaires des steppes asiatiques, dont l'économie était fondée sur l'élevage du mouton, peut s'expliquer par la dégradation entropique : c'est parce que les sols étaient épuisés qu'ils sont partis à la recherche de nouvelles sources de basse entropie. La rareté de la basse entropie (la pression constante sur les ressources) peut sembler pertinente pour expliquer en partie l'immigration vers le Nouveau Monde. Dans le même ordre d'idée, GR remarque que la plupart des inventions humaines dessinent une meilleure économie de basse entropie.

Ainsi, « le processus économique est solidement arrimé à une base matérielle qui est soumise à des contraintes bien précises » (p.52) : il mobilise nécessairement de la basse entropie, la dégrade en haute entropie dans le but de produire de la joie de vivre. Le processus économique n'a donc qu'une direction : la hausse de l'entropie. Les économistes « mécanistes » n'auraient pas compris cela et, en ce sens, ils auraient succombé à un « fétichisme de la monnaie ». En effet, la monnaie est la seule au sein du processus économique à circuler dans les deux sens : avec la monnaie, je peux acheter un bien, mais je peux récupérer cette somme en revendant cette marchandise, il y a donc bien réversibilité et circularité.

« Le processus économique est un mécanisme circulaire auto-entretenu, une sorte de manège de foire tournant entre « production » et « consommation ». Rien ne révèle mieux cette philosophie mécaniste que le diagramme bien connu par lequel le processus économique est décrit dans presque tous les manuels économiques, y compris ceux des plus hautes autorités de la profession. En parfait accord avec les lois de la mécanique, on pourrait tout aussi bien inverser toutes les flèches sur ce graphique-là, il représenterait toujours le même mécanisme »
(Georgescu-Roegen, 1978, p.99)

En revanche, ce que le processus économique a prélevé comme basse entropie est perdu à jamais, il y a *irréversibilité* (le charbon a été dissipé sous forme de chaleur, de fumée et de cendres). Il n'est pas possible pour l'homme de le reconstituer. Et s'il s'y employait, il dépenserait beaucoup trop de basse entropie dans cette entreprise. Pour illustrer cela, GR prend la métaphore d'un collier de perles que l'on aurait dispersées aléatoirement sur la surface du globe. Si tant est que cela soit possible, les efforts nécessaires pour récupérer toutes les perles ont un coût supérieur au gain en termes de basse entropie. Et GR de conclure : « En termes d'entropie, le coût de toute entreprise biologique ou économique est toujours plus grand que le produit » (Georgescu-Roegen, 1979 p.50). C'est là le cœur de sa critique du dogme mécaniste.

Cette représentation du processus économique est au cœur du paradigme que GR veut fonder. A ses yeux, il faut un nouveau cadre, il n'y a pas possibilité de porter ces idées au sein des courants existants, qu'ils soient néoclassique ou hétérodoxes⁷³. C'est pourquoi les fonctions de production agrégées sont rejetées au profit d'une construction théorique alternative : le modèle flux-fonds de la production⁷⁴.

A l'inverse, une branche de l'économie écologique, appelé théorie néo-thermodynamique, préfère une autre voie. Elle estime qu'une importation des concepts de la thermodynamique est envisageable *au sein du cadre* néoclassique. Par la suite, nous

⁷³ Ainsi du courant marxiste qui est critiqué en ces termes : « Le fait pourtant évident qu'entre le processus économique et l'environnement matériel il y a une continue interaction génératrice d'histoire ne revêt aucun poids pour l'économie orthodoxe. Il en va de même pour les économistes marxistes qui jurent au nom du dogme de Marx que tout ce que la nature offre à l'homme n'est que don gratuit. Quant au fameux diagramme de la reproduction introduit par Marx, il représente aussi le processus économique comme un ensemble absolument circulaire et se suffisant à lui-même » (GR, [1979], p.45).

⁷⁴ Pour une présentation voir par exemple (Couix, 2020b).

qualifierons ce courant de critique interne au sens où de nombreux éléments du cadre théorique néoclassique sont conservés : le comportement maximisateur, la représentation de l'économie sous la forme d'une fonction de production agrégée ou encore l'usage d'agrégats monétaires pour mesurer des variables physiques. Notre seconde sous-section présente les principaux travaux et leurs résultats.

2.2. La théorie néo-thermodynamique de la croissance : une critique interne de la théorie néoclassique par l'économie écologique

La critique interne opérée par une partie de l'économie écologique revendique une évaluation empirique de la contribution de l'énergie. Ce programme de recherche est initié, dès les années 1980, par Kümmel (1982), rejoint par Ayres et Warr (2003), au début des années 2000. La représentation de l'économie proposée par ces auteurs continue de reposer sur des fonctions de production, mais d'importantes innovations sont intégrées. De nouvelles formes fonctionnelles sont proposées afin d'intégrer le poids des contraintes physiques sur le processus de production. Ensuite, cette attention au monde physique s'accompagne d'une volonté d'accroître la dimension physique des agrégats utilisés. A partir de ces redéfinitions les paramètres de la fonction de production sont estimés et une nouvelle décomposition de la croissance est proposée.

D'une critique microéconomique du théorème du *cost-share* à de nouvelles formes fonctionnelles

Pour les économistes écologiques, l'erreur néoclassique réside dans l'adhésion au théorème de l'épuisement du produit (*cost-share*) qui identifie contribution de l'énergie et part en valeur⁷⁵. Une partie de leurs efforts va donc être consacrée à déconstruire ce résultat (Kümmel, 1982 ; Ayres et Warr, 2005 ; Ayres et al., 2013 ; Kümmel, 2013). Leurs démonstrations ne mobilisent pas les arguments déjà connus dans la littérature. Par exemple, Guerrien (2016) insiste sur le caractère contradictoire d'avoir des rendements d'échelle

⁷⁵ Voir sur ce point la section 1.1. du présent chapitre.

décroissants au niveau microéconomique et des rendements d'échelle constants au niveau macroéconomique (Cobb Douglas de degré 1). En effet, sans rendements d'échelle décroissants, la firme ne peut arrêter un niveau optimal de production, ni décider d'une combinaison productive assurant la rémunération à la productivité marginale (Guerrien, 2016). Chez les économistes écologiques, l'argument repose principalement sur la mise en évidence de contraintes au niveau microéconomique :

« 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, p.160)

Ces contraintes portent sur la manière de combiner les facteurs pour obtenir une quantité de production, mais toujours à partir de situations microéconomiques. La correspondance entre Robert Ayres et Robert Solow illustre le propos⁷⁶. Solow, qui a été sollicité sur l'article de Kümmel (2010), n'est pas convaincu par l'existence de contraintes techniques et évoque des possibilités de substitution au niveau macroéconomique. Ayres insiste sur la validité de l'argument microéconomique en rappelant que Gregory Mankiw (1997), économiste et vulgarisateur néoclassique, déduit le *cost-share* d'un raisonnement purement microéconomique.

« 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, p.27).

Sans possibilité de substituer, il n'y a plus de rémunération à la productivité marginale, sans rémunération à la productivité marginale, il n'y a plus de correspondance entre la part de l'énergie et sa contribution à la croissance. Cette contribution va devoir être estimée selon une autre procédure, à partir des données empiriques, tel est le sens de la démarche. Ayres, Warr et Kümmel vont alors proposer une forme fonctionnelle nouvelle pour prendre en

⁷⁶ Solow, Archives, Box 104, Dossier : 2008 Mar. 11-May 13 cité par (Couix, 2020a).

compte ces contraintes productives qui, d'après eux, sont au nombre de deux. La première contrainte introduite est qu'il faut un niveau minimal d'énergie et de travail pour faire fonctionner le capital, ce qui signifie que la productivité marginale du capital tend vers zéro dès lors que l'énergie ou le travail font défaut. La seconde porte sur l'automatisation et considère qu'à un certain niveau, la productivité marginale du travail tend vers 0. La fonction LINEX⁷⁷ va intégrer ces contraintes : « Cette forme fonctionnelle est construite pour satisfaire ces conditions », explique Couix (2020b, p.154). Pour ces auteurs, cette fonction de production est plus pertinente sur de nombreux points. Outre, la prise en compte des contraintes mentionnées, elle est de type VES (variable elasticity of substitution) ce qui est plus réaliste que le cas d'une CES (constant elasticity of substitution)⁷⁸. De plus, les paramètres qui vont être estimés économétriquement peuvent être interprétés sans ambiguïté : « One parameter can be interpreted as the capital effectiveness and the other one as the energy demand of the fully utilized capital stock » (Ayres et al., 2013, p.83).

Avant de procéder à une estimation empirique des paramètres, il nous faut présenter un autre amendement apporté au cadre néoclassique : la mesure de l'énergie à partir d'un agrégat physique.

Une nouvelle mesure physique de l'input énergétique

Les tenants de l'économie écologique entendent saisir l'énergie à partir d'un véritable agrégat physique. Il est possible d'agréger l'énergie à partir d'une unité physique comme le BTU (pour *british thermal unit*), comme le propose Kümmel. Les travaux plus récents de Ayres et Warr préfèrent introduire un nouvel agrégat, l'exergie utile. Pour résumé⁷⁹, cette définition de l'input énergétique offre deux avantages. Tout d'abord, on se situe au stade *utile*, c'est-à-dire que l'énergie est ici mesurée en sortie d'appareils. Cette définition se rapproche donc de l'idée de services énergétiques. Ensuite, on s'intéresse à l'exergie plutôt qu'à l'énergie. La mesure à partir de l'exergie permet de prendre en compte les différences de qualité entre les différents services énergétiques utilisés. Pour le dire simplement, d'un point de vue physique,

⁷⁷ Pour Linear Exponential production function.

⁷⁸ Voir sur ce point les développements relatifs à l'élasticité de substitution à la section 1.3. de ce chapitre.

⁷⁹ Ce concept est présenté de manière détaillée dans l'encadré 1 de la sous-section 2.2.2. du chapitre 1.

les 18kWh générés par une ampoule ne sont pas équivalents à 18kWh de mouvement mécanique générés par un moteur. L'exergie permet d'agréger ces différents usages en prenant en compte les différences qualitatives. Pour finir, un dernier intérêt de cette mesure est de permettre une définition technique de l'efficacité énergétique au niveau agrégé. En effet, l'efficacité de conversion de l'énergie au niveau macroéconomique peut s'apprécier en rapportant l'exergie mesurée au stade utile (à la sortie des appareils) à celle mesurée au stade final (carburants). Le recours à des appareils plus efficaces énergétiquement vient réduire les pertes : l'exergie utile générée à partir d'une quantité d'exergie finale produite sera plus élevée. Cette nouvelle définition plus technique qu'économique va pouvoir être mobilisée pour discuter la notion de progrès technique, relativement désincarnée dans le modèle de Solow (cf. 1.1.).

Le rôle essentiel de l'énergie dans le processus de croissance

Deux objectifs sont poursuivis par les néo-thermodynamiciens. Le premier est de produire une estimation de la contribution de l'énergie à la croissance alternative à celle obtenue par le théorème du *cost-share*. Le second est de fournir une meilleure explication de la croissance que celle proposée par le cadre néoclassique (réduction du résidu). On s'intéresse ici à la fonction instrumentale du modèle.

Pour ce qui est du premier objectif, Ayres et Warr (2009, p.212) obtiennent des élasticités de production de l'énergie et du capital de 0,5 (en exergie utile), Kümmel (2011) une élasticité de 0,7 pour le capital et 0,3 pour l'énergie (en BTU – British Thermal Unit). L'appréciation de la contribution à partir de l'élasticité de production témoigne de la volonté de dialogue avec l'économie néoclassique. L'élasticité de production du travail est, dans les deux cas, très faible. Pour rappel, le théorème du *cost-share* concluait à élasticité à l'output comprise entre 0,05 et 0,1. Ces travaux concluent donc à une contribution de l'énergie 3 à 10 fois plus élevée que la théorie néoclassique standard.

Pour ce qui est du second objectif, il s'agit d'étudier la manière dont le modèle reproduit les séries de PIB réel et l'importance du résidu constaté. A partir de la fonction LINEX, Ayres et Warr comparent quatre modèles. Deux modèles utilisent le stade final de l'énergie (séries E et R sur la figure 21,) tandis que deux autres utilisent le stade utile (séries Ue et Ur). L'autre distinction tient au périmètre de l'énergie retenu : les séries E et Ue retiennent uniquement l'énergie commerciale tandis que les séries R et Ur intègrent l'énergie non commerciale. Pour Ayres et Warr, le modèle qui reproduit le mieux les séries historiques est celui utilisant l'exergie utile totale (commerciale et non commerciale). La série historique de PIB réel états-unien est reproduite fidèlement, sauf pour la fin de la période (1985-2000) où un écart « autour de 12% » apparaît. Ainsi, la quasi-totalité du résidu de Solow disparaît sur la période 1900-2000 aux Etats-Unis (ce que ne permet pas une intégration de l'énergie à son stade primaire (courbes verte et bleue)). La productivité globale des facteurs serait donc liée aux progrès de l'efficacité énergétique, confirmant, là encore, le rôle fondamental de l'énergie : « it would seem that 'technical progress' – as defined by the Solow residual – is almost entirely explained by historical improvements in exergy conversion » (Ayres and Warr, 2005, p.17). D'après Ayres et Warr, la croissance du résidu à partir des années 1980

s'expliquerait par le rôle croissant des technologies de l'information ainsi que celui de la connaissance.

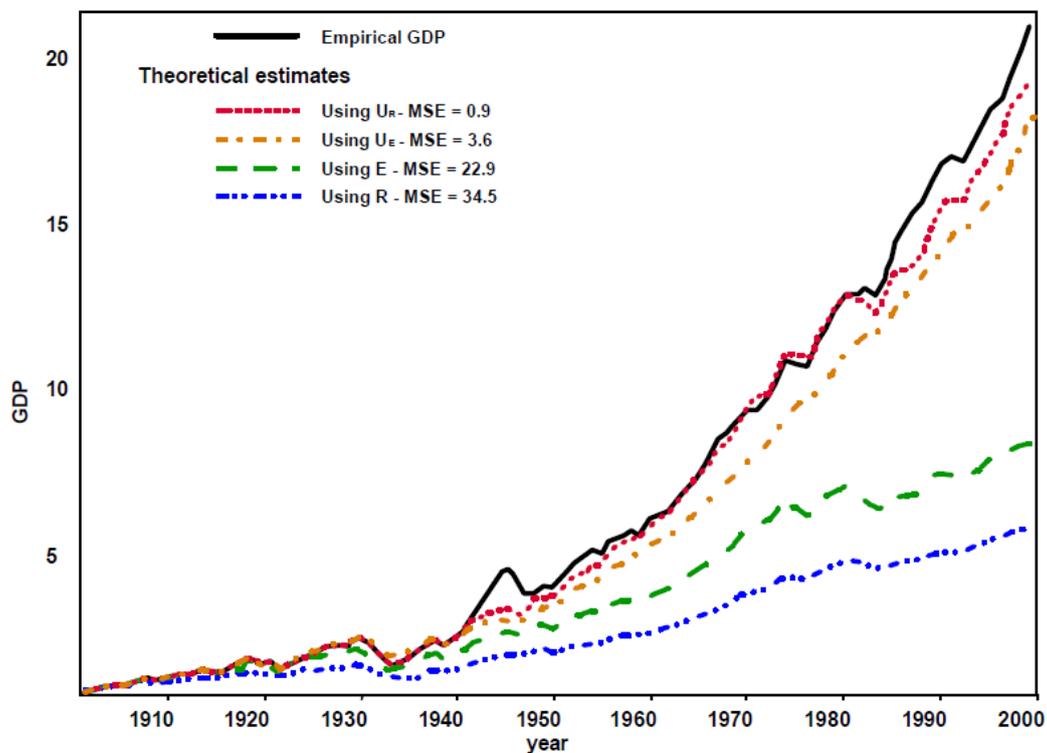


Figure 21. **Fonction de production LINEX production avec exergie utile.**
Source : Ayres and Warr (2005, p.17).

Ces bons résultats doivent être pris avec précaution. Pour Pottier (2012) la bonne approximation proviendrait du fait que « le travail utile croît plus vite que la production ». Or, « l'introduction de n'importe quelle série croissant plus vite que le PIB, à côté du capital et du travail, permettrait d'approcher correctement, avec la fonction LINEX, la série de la production » (p.143). Ces difficultés statistiques (les séries temporelles affichent toutes une forte croissance) sont présentées plus en détail par Couix (2020, p.160) auquel nous renvoyons le lecteur.

Prolongements contemporains

L'approche de Ayres, Warr et Kümmel a pu susciter une certaine défiance de la part des auteurs néoclassiques par son usage d'une forme fonctionnelle peu usuelle, la fonction

LINEX, comme en témoigne la correspondance entre Ayres et Solow. Solow suggère à Ayres de traiter les facteurs comme complémentaires plutôt que de recourir à une telle fonction :

« Presumably there is some substitutability possible between energy flow and other inputs. If there is not, which you seem to suggest with respect to baking bread, that is just a technicality: there are well known ways of dealing with fixed coefficients »

*(Solow, archives, box 105, dossier: 2009 Jan. 5-27
cité par Couix, 2020, p.152).*

Les derniers développements de la théorie néo-thermodynamique (Santos et al., 2018) peuvent s'interpréter comme une tentative de réconciliation avec Solow et les néoclassiques dans la mesure où la fonction LINEX est abandonnée au profit de fonctions Cobb-Douglas. Présentons succinctement leur démarche. Tout d'abord, des fonctions de production agrégées plausibles sont identifiées à partir de l'outil économétrique. Le caractère plausible est défini à partir de trois critères qui doivent être réunis :

- Une relation de co-intégration entre capital, travail, exergie utile et production (PIB réel) doit exister.
- Les coefficients correspondants à l'élasticité à l'output doivent être positifs.
- Enfin, il doit y avoir une causalité à la Granger entre les inputs et l'output.

Ensuite, les différents modèles considérés comme valides sont départagés à partir de leur capacité à réaliser les meilleures prédictions de l'output (R^2 le plus élevé). En d'autres termes, plus le résidu est faible, plus le modèle est considéré comme qualitatif. A partir de cette procédure, un modèle statistique se distingue en particulier puisque le résidu n'est que de 3%. Ses inputs sont l'exergie utile, le travail et le capital, ce dernier facteur étant fonction de l'exergie utile et du travail ($K(U,L)$). Les auteurs en viennent ainsi à reformuler l'agrégat capital communément utilisé par la littérature néoclassique dans un sens plus physique : « l'utilisation réelle du capital dans la production est mieux décrite comme restreinte par ces deux facteurs » (Santos et al., 2018, p.117)

Model / Data	Fonction de production estimée	Facteur estimé	RMSE (niveau)	Adj. R ² (%)	Croissance de la production (%)	α_{KgK} (%)	α_{LgL} (%)	Résidus (%)
$(q,u)_L$	$Q = e^{-7,77} * U^{0,84} * L^{0,16}$	Aucun	0,051	99,54	-	-	-	-
$(q,k^{AMECO})_L$	$Q = e^{-5,19} * K^{0,60} * L^{0,40}$	Aucun	0,167	95,39	3,45	1,04	0,32	2,08
$(q,k^{AMECO},u)_L$	$Q = e^{-4,79} * K^{0,64} * L^{0,36}$	Aucun	0,152	96,52	3,45	1,04	0,32	2,08
$(q,k^{S\&L},u)_L$	$Q = e^{-8,05} * K^{0,37} * L^{0,63}$	Aucun	0,206	89,31	3,45	1,45	0,32	1,67
$(q,k^{S\&L},u)_L$	$Q = e^{-8,05} * K^{0,37} * L^{0,63}$	K(U,L)	0,040	99,70	3,45	2,30	0,32	0,82
$(q,u)_{HL}$	$Q = e^{-8,39} * U^{0,78} * L^{0,22}$	Aucun	0,048	99,69	-	-	-	-
$(q,k^{AMECO})_{HL}$	$Q = e^{-7,11} * K^{0,45} * L^{0,55}$	Aucun	0,150	96,45	3,45	1,04	1,04	1,36
$(q,k^{S\&L},u)_{HL}$	$Q = e^{-9,65} * K^{0,31} * L^{0,69}$	Aucun	0,144	96,26	3,45	1,45	1,04	0,95
$(q,k^{S\&L},u)_{HL}$	$Q = e^{-9,65} * K^{0,31} * L^{0,69}$	K(U,L)	0,040	98,89	3,45	2,37	1,04	0,03

Tableau 19. **Capacité des différentes fonctions de production à prédire le PIB réel portugais.**

Source : Santos et al. 2016, p.28

Ce modèle peut être interprété comme une fonction Cobb-Douglas, ce qui facilite les échanges avec le champ de l'économie standard. Santos et al. estiment ainsi que la théorie néoclassique de la croissance est perméable aux conclusions de la thermodynamique :

« Nous faisons l'hypothèse que l'exergie utile pourrait être la clef pour mettre en lumière le rôle actuel joué par l'énergie dans l'économie et réconcilier la vision apparemment incompatible de la théorie néoclassique de la croissance avec l'économie écologique⁸⁰ »
(Santos et al., 2018, p.118).

Une nouvelle synthèse serait donc envisageable. Le résidu de Solow serait expliqué par la prise en compte rigoureuse de l'énergie, à partir de l'exergie utile, et des progrès de l'efficacité énergétique. La relation entre l'énergie et la production pourrait être exprimée sous la forme d'une fonction de Cobb-Douglas, chère aux économistes néoclassiques, mais dont les paramètres seraient évalués empiriquement et non déduits d'un théorème microéconomique, le *cost-share*. Ces résultats suffisent-il à considérer que l'intégration de la thermodynamique à l'analyse néoclassique est une réussite ? Pour pouvoir répondre, deux points doivent être examinés plus en détail.

⁸⁰ Traduction par l'auteur.

En premier lieu, il faut considérer la question de la représentation de l'économie à partir de fonctions de production. Cette dernière a fait l'objet de critiques importantes, en particulier lors de la controverse des deux Cambridge. Santos et al. (2016) ou encore Kümmel (2011) estiment que les critiques de Joan Robinson (1953) et de Sraffa (1963) quant aux problèmes de l'agrégation, en particulier du capital, n'affectent pas la portée de leur approche.

En second lieu, il y a la question de la charge de la preuve, du test de la théorie. Que ce soit chez les auteurs néoclassiques, mais également chez Ayres et Warr, il y a adhésion à une forme d'instrumentalisme méthodologique, au sens de Friedman (1953). Bien que la fonction de production puisse parfois être reconnue comme irréaliste, les bonnes approximations aux données conduisent à conserver cette représentation, exactement comme le faisaient Mankiw et Douglas que nous avons cités au début de la section 1.

2.3. La théorie néo-thermodynamique à l'épreuve de la controverse des deux Cambridge

L'objectif de cette dernière sous-section est d'évaluer la synthèse proposée par la théorie néo-thermodynamique à l'aune des arguments post-keynésiens développés lors de la controverse des deux Cambridge. Cette dernière met en évidence les difficultés liées à l'agrégation pourtant nécessaire aux raisonnements mobilisant les fonctions de production agrégées. L'intégration de l'énergie aux fonctions de production agrégée repose ce problème avec acuité (2.3.1.). Dans la mesure où certains travaux de la théorie néo-thermodynamique mentionne cette controverse, nous examinons dans un second temps leurs réponses aux critiques post-keynésiennes (2.3.2).

2.3.1. Enjeux épistémologiques autour des fonctions des productions agrégées

Le difficile passage du micro au macro

L'existence d'une fonction de production à un niveau microéconomique est globalement admise : un producteur combine différents inputs afin de produire un output

bien précis. Cette fonction met en évidence le fait qu'un choix se fait en présence de contraintes techniques. Par exemple, un manuel de microéconomie explique que :

*« To analyze the behavior of the firm, we need to start by identifying those production vectors that are **technologically possible**. [...] The set of feasible production plans is limited first and foremost by **technological constraints**. »*

(Mas-Colell et al., 1995, p.128, mis en gras par l'auteur)

Cependant, même dans ce cas simple, il est nécessaire de distinguer deux fonctions de production (Johansen, 1972) : une fonction *ex ante* (avant investissement dans du capital fixe) et une fonction *ex post*, où la flexibilité est moindre, compte tenu des choix effectués par le producteur. Cette distinction rejoint celle faite par les économistes entre court et long terme. A long terme, les choix apparaissent plus flexibles car les lourds investissements peuvent être révisés.

Le passage d'une fonction de production à un niveau plus agrégé hérite du réalisme du niveau microéconomique et va, en plus, bénéficier du côté flexible associé au niveau macroéconomique (changement structurel et substitution entre les biens et services). Pourtant, ce passage pose de nouvelles difficultés. En effet, les facteurs de production sont extrêmement différents : les travailleurs ont des compétences spécifiques, les machines et le capital sont propres à certains usages et certaines branches. Si le choix de la branche mono-produit limite les problèmes d'agrégation au niveau des inputs, le niveau macroéconomique étend cette difficulté à l'output : les biens et services fabriqués sont eux-mêmes variés, de différentes qualités et leurs caractéristiques évoluent au cours du temps. L'usage de fonctions de production au niveau agrégé crée donc deux problèmes : le premier est celui de l'agrégation de ces éléments disparates, le second est la signification des relations observées entre les inputs et l'output.

Commençons par le second point qui peut être présenté rapidement. A un niveau microéconomique, on peut véritablement parler de « relation technique » entre les inputs et l'output dans la mesure où les combinaisons productives servent à produire un même bien. Cependant, au niveau agrégé, la composition de l'output peut être modifiée. Dans ce cas, la relation décrite ne sera pas purement technique puisque des effets de structure peuvent être

observés. Ces difficultés sont particulièrement visibles dans les débats relatifs à la substitution entre le capital et l'énergie abordés à la section 1. Le contenu de cette substitution n'est jamais véritablement défini : tantôt, elle peut renvoyer à un nouveau procédé technique permettant d'utiliser moins d'énergie pour produire un même bien ; tantôt, il peut s'agir de la production d'un bien différent qui est moins intensif en énergie par rapport à celui produit jusqu'alors. Ces deux cas ne sont pas distingués alors qu'ils sont différents : dans un cas, il y a substitution d'énergie par du capital, dans l'autre il y a changement dans les biens et services consommés. Or, seul le premier cas correspond à une substitution technique. Comme l'explique J.L. Solow :

« 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, p.612).

Au-delà de l'interprétation de la relation, l'agrégation des inputs et des différents éléments composant l'output pose elle aussi des problèmes importants. En effet, pour pouvoir discuter de la relation technique à un niveau agrégé, il faut au préalable avoir précisé comment additionner entre eux des éléments disparates du capital, des travailleurs aux différentes qualifications, mais aussi les différents biens et services produits. On peut, comme Solow, préférer, par commodité, raisonner dans le cadre de modèles à un bien (qui est à la fois consommé et investi), mais cela revient à évacuer ces difficultés de l'analyse plutôt qu'à les traiter :

*« There is only one commodity, output as a whole, whose rate of production is designated $Y(t)$. Thus we can speak unambiguously of the community's real income" [...] "The community's stock of capital $K(t)$ takes the form of an accumulation of the **composite commodity**. »*
(Solow, 1956, p.66, mis en gras par l'auteur)

A l'inverse de Solow, dès lors que l'on reconnaît l'hétérogénéité, l'agrégation va supposer de définir une unité pertinente pour additionner les éléments disparates entre eux. Pour préserver le caractère technique de la relation que l'on souhaite décrire, cette unité doit être physique : il faut des quantités physiques de travail, des quantités physiques de capital et

des quantités physiques de biens et de services. Pour le travail, une unité physique fait relativement consensus : il s'agit du temps de travail exprimé en heures, bien que cela ne prenne pas en compte les différentes qualités de travail⁸¹. En revanche, pour le capital technique et l'output, il n'existe pas d'unité physique « naturelle », les économistes retenant généralement la monnaie déflatée pour exprimer ces quantités « réelles » de capital et de production. Ces difficultés sont au cœur de la controverse des deux Cambridge.

La controverse des deux Cambridge

Historiquement, l'agrégation du capital a donné lieu à un débat intense entre l'université de Cambridge (aux États-Unis dans le Massachusetts) et de Cambridge (en Angleterre) : c'est la célèbre *controverse des deux Cambridge*. À l'époque, la question de la mesure et de l'agrégation du capital devient un enjeu important pour la communauté des économistes au regard des questions de répartition. En effet, d'après les néoclassiques (présents à la Cambridge américaine), chaque facteur de production recevrait une rémunération correspondant à sa productivité marginale. D'un point de vue moral, cela revient à légitimer la répartition organisée par les marchés : chaque facteur, capital et travail, recevrait sa juste part. Or, pour pouvoir calculer une productivité marginale du capital et la comparer relativement à son prix, il faut pouvoir disposer de séries de quantité de capital. Les économistes post-keynésiens comme Joan Robinson (1953) ou Pierro Sraffa (1963), représentants de la Cambridge anglaise, vont critiquer ce résultat en attaquant la mesure du capital. L'article de Robinson commence par ce constat :

« The student of economic theory is taught to write $O = f(L, C)$ where L is a quantity of labour, C a quantity of capital and O a rate of output of commodities. He is instructed to assume all workers alike, and to measure L in man-hours of labour; he is told something about the index-number problem involved in choosing a unit of output ; and then he is hurried on to the next question, in the hope that he will forget to ask in what units C is measured. Before ever he does ask, he has become a professor, and so

⁸¹ En pratique, les études mobilisant des fonctions de production utilisent des séries de l'input travail ajusté en qualité. Voir par exemple Bowles, (1970).

*sloppy habits of thought are handed on from one generation to the next »
(Robinson, 1953, p.81)*

Plusieurs possibilités s'offrent à l'économiste pour agréger le capital. On peut tout d'abord compter les éléments du capital à partir de leur valeur future actualisée. Cette opération suppose toutefois de connaître les prix et coûts futurs pour calculer les flux de profits anticipés mais aussi le taux d'intérêt pour les actualiser. Or, l'objectif initial des néoclassiques est d'expliquer la formation du taux d'intérêt (la rémunération du capital) à partir de la quantité de capital mobilisée (laquelle détermine la productivité marginale). Le raisonnement est donc totalement circulaire : sans le taux d'intérêt, on ne peut connaître la quantité de capital (on ne peut pas actualiser) mais, sans la quantité de capital, on ne peut connaître le taux d'intérêt (on ne peut pas calculer la productivité marginale). « We have to begin by taking the rate of interest as given, whereas the main purpose of the production function is to show how wages and the rate of interest (regarded as the wages of capital) are determined by technical conditions and the factor ratio », résume Robinson (1953, p.81). La thèse néoclassique – la productivité marginale du capital détermine la rémunération du capital – est donc indémontrable.

L'autre possibilité est d'agréger le capital à partir de son coût d'achat. Cependant, utiliser la monnaie est une nouvelle fois problématique car l'inflation entre en jeu : il faut pouvoir agréger des sommes dépensées hier avec celles dépensées aujourd'hui. Une solution suggérée par Robinson est d'utiliser l'unité de salaire, c'est-à-dire de compter finalement le capital comme une quantité de travail « standard ». Là encore, on retrouve le taux d'intérêt car celui-ci est inclus dans le prix du capital passé. En effet, le capital qui a été produit et acheté par le passé incorpore un coût financier, lequel dépend du taux d'intérêt qui prévalait alors :

*« The same stock of physical goods represents a larger amount of real capital when the rate of interest is higher (and has been higher in the past) than when it is (and has been) lower »
(Robinson, 1953, p.86).*

Encore une fois, la quantité de capital n'est pas indépendante du taux d'intérêt. Elle ne peut donc pas être mobilisée pour expliquer causalement la formation des taux d'intérêt et la part reçue par le capital.

En définitive, toute mesure du capital en monnaie est dépendante du taux d'intérêt qui est un revenu du capital. De ce fait, le taux d'intérêt est déterminé par le partage entre salaires et profit. En conséquence, on observe la relation suivante : la répartition primaire détermine le niveau de taux d'intérêt dans l'économie et, in fine, la mesure du capital en monnaie dans l'économie. Comme le résume bien Pottier, « la notion de capital présent dans une économie ne peut pas être séparée du système de prix en vigueur. Le capital n'est pas une notion technique, mais une relation économique-sociale » (2012, p.198). Malgré ces sérieuses réserves, des quantités de capital continuent d'être estimées à partir de leur valeur dans de nombreux travaux faisant usage de fonctions de production agrégées.

Le problème de l'agrégation ne concerne pas seulement le capital, la mesure de la production est également sujette aux mêmes difficultés. Comme nous l'avons vu au chapitre 1 (section 1.3.), l'évaluation de l'output est sensible à l'évolution des prix relatifs. Comme pour le capital, ces difficultés apparaissent lorsque l'on passe des grandeurs nominales aux quantités réelles de production. En l'espèce, il faut choisir un certain niveau de prix relatifs correspondant à une année de base⁸². Ce choix ne prêterait pas à conséquence si les différents prix évoluaient symétriquement : les prix relatifs seraient inchangés, et la mesure en base X ou Y serait équivalente. Toutefois, en pratique, cela n'est pas le cas. En conséquence, l'étalon de mesure retenu, la monnaie déflatée, n'est pas une quantité stable de sorte que la notion de quantité de production physique est à prendre avec précaution. Pour plus de détail sur ces enjeux, nous renvoyons le lecteur à notre premier chapitre qui détaille la procédure pour déflater le PIB.

En résumé, le problème de l'agrégation tient au fait que l'unité monétaire n'est pas satisfaisante pour mesurer une quantité physique de capital ou encore d'output. La conséquence logique serait d'abandonner de tels agrégats au profit de mesures réellement physiques. Pourtant, l'usage d'agrégats monétaires reste abondamment utilisé :

*« The use of constant-price value data for output and the capital stock [...] derived from National Income and Product Accounts [...] treated as unproblematic proxies for their physical counterparts »
(Felipe and McCombie, 2014, p.68).*

⁸² Cette année de base est mouvante dans le cas d'un indice des prix chaîné.

Quels sont les alternatives pour agréger le capital ? La production ? Avant de discuter plus en détail ces points en section 3, nous allons d'abord présenter comment les auteurs de la théorie néo-thermodynamique prennent en compte ces critiques.

2.3.2. Les réponses de la théorie néo-thermodynamique à la controverse des deux Cambridge

Dans la littérature néo-thermodynamique, la référence à la controverse des deux Cambridge et aux difficultés entourant la mesure du capital est bien présente (Heun et al., 2017 ; Kümmel et Lindenberger, 2020 ; Santos et al., 2018). Les auteurs estiment prendre en compte cette controverse. Par ailleurs, l'usage des fonctions de production est également défendu sur la base de l'instrumentalisme méthodologique.

La théorie néo-thermodynamique face aux difficultés d'agrégation

La fonction de production agrégée doit mobiliser des agrégats physiques pour avoir un sens technique et, d'après Kümmel, « la capacité physique et de traitement de l'information fournissent les concepts nécessaires pour agréger et mesurer les facteurs et la production industrielle » (Kümmel, 1982, p.190). Dans un papier récent (Kümmel et Lindenberger, 2020), Kümmel précise quelle serait l'unité de mesure pertinente pour agréger l'output :

« A physical measure of output can be established based on the elementary processes underlying any production, namely work performance and information processing. The corresponding units of measurement are (a weighted sum of) kWh times kBits "spent" in the production process »
(p.4)

On pourrait s'attendre à ce que cette remarque conduise Kümmel à la construction de nouvelles séries de capital et de production mais ce n'est pas le cas. La raison évoquée par Kümmel est l'absence de données :

« For practical reasons, since data on work performed and information processed during production are not available, proportionality between the physical units and the statistically available monetary units (in deflated currency) has to be assumed. This proportionality holds by definition, as long as the monetary evaluation of work performance and information processing does not change in time »
(Kümmel and Lindenberger, 2020, p.4)

Cette hypothèse apparaît donc comme *ad hoc* et n'est pas vérifiée.

Santos et al. (2018) mentionnent les conclusions de la controverse des deux Cambridge:

« The Cambridge capital controversy exposed the problems regarding the aggregation of capital inputs to production, which involves adding up incomparable physical assets »
(Santos et al., 2016 p.7).

Pendant, ils ne concluent pas qu'il faudrait renoncer à agréger le capital ou la production à partir de la monnaie :

« We measure economic output (Q) as gross value added (GVA), corresponding to the sum of payments to capital (K) and labor (L). We consider standard and quality-adjusted measures for these factors, thus observing the effects of quality-adjusting these inputs in our statistical estimates »
(Santos et al., 2018, p.111).

Pour les séries de capital, les auteurs utilisent les séries de stock de capital d'AMECO, estimées en euros de 2006. Pour Santos et al., les implications de la controverse des deux Cambridge se cantonnent à des précautions relatives au travail économétrique. En effet, un des effets de l'usage d'agrégats monétaires est que la fonction de production n'estime pas une relation technique mais une identité comptable (Felipe et McCombie, 2014 ; Shaikh, 1974) :

« Because studies have shown that a Cobb-Douglas (or a more flexible) APF can yield a good fit – even though the aggregation conditions are violated, or there is no APF – results of regressions with such functions should be

*treated with caution (Felipe and McCombie, 2005; Felipe and McCombie, 2013). Hence, any approach to the estimation of APFs between time series for output and inputs should consider that such a relationship may not exist (i.e. the APF relationship should be statistically refutable). In our work we take this into consideration »
(Santos et al., 2018, p.106)*

Cette réfutabilité s'apprécie à partir de plusieurs critères que nous avons présentés en sous-section 2.2. et qui font qu'une fonction de production est plausible.

Ainsi, que ce soit chez Kümmel, père fondateur de cette approche, ou dans les travaux les plus contemporains, force est de constater qu'il n'y a pas de véritable réponse sur la question des agrégats : les agrégats monétaires continuent à être utilisés.

Le traitement du capital opéré dans ces travaux pose une autre difficulté : il apparaît redondant avec un autre agrégat, l'exergie utile. En effet, la délimitation entre l'input capital et l'input énergie est confuse. Rappelons que l'exergie utile est une mesure de l'énergie en sortie des appareils. Par conséquent, un progrès de l'efficacité énergétique des appareils va être traité comme étant de l'ordre de la contribution productive de l'énergie (qualité du facteur énergie). Or, on pourrait très bien considérer ce gain d'efficacité comme relevant de l'amélioration qualitative du stock de capital. Par ailleurs, ce choix des auteurs conduit à un résultat proche de Solow : les progrès de l'efficacité énergétique sont indépendants de l'accumulation de capital. L'investissement dans du capital supplémentaire n'a aucun effet sur le rythme 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, p.4). Cela conduit à rendre l'efficacité énergétique exogène⁸³, comme l'était la productivité globale des facteurs. En d'autres termes, si le résidu de Solow est bien identifié par Ayres et Warr (efficacité de la conversion), il reste inexpliqué puisqu'il n'est pas relié à des variables endogènes au processus économique comme l'investissement.

⁸³ Interrogé sur cette question par mail, Tiago Domingos, un des représentants de ce courant et co-auteur de Ayres et Warr, explique que « ramener la physique dans l'économie peut avoir ce résultat intéressant de légitimation (partielle) d'un progrès technique exogène ».

Plus fondamentalement, faire apparaître l'exergie utile à côté du travail et du capital pose un problème du point de vue de la représentation du monde (voir la figure 22 en section 3.1.). L'exergie utile n'existe pas à côté du capital et du travail qui les fournissent. Travail et capital convertissent l'exergie finale en exergie utile. Le travail et le capital sont des *fonds* qui dégradent un *flux* d'énergie. Mettre ces facteurs sur le même plan, c'est confondre les variables de flux et les variables de stock.

L'instrumentalisme méthodologique comme justification ultime aux fonctions de production agrégée

Les économistes écologiques ne répondent pas vraiment à la question de l'agrégation et à la possibilité de représenter l'économie à partir d'une fonction de production à trois variables. Comme les économistes néoclassiques, leur argument en dernier ressort consiste à revendiquer l'instrumentalisme méthodologique : peu importe que les hypothèses ne soient pas réalistes tant qu'elles permettent de rendre compte des données empiriques. Sur ce point, Ayres et Warr se réfèrent explicitement à Milton Friedman (1953) :

« We postulate (in the spirit of Milton Friedman (1953)) that if an assumed relationship explains (that is, reproduces) the empirical observations, one need not worry too much about the realism of every one of the underlying assumptions. [...] In short, we argue that a postulated functional relationship among aggregates (capital, labor and mass/exergy or useful work) flows is an adequate representation of the real world, at least for the purposes of explaining economic growth ».
(Ayres et Warr, 2009, p.183)

Cet argument n'apparaît toutefois pas satisfaisant pour répondre aux objections soulevées précédemment. Dans le cas de fonctions de Cobb-Douglas utilisées par les néoclassiques, ce sont bien les hypothèses sur la possibilité d'agréger et sur la sélection des paramètres (le *cost-share*) qui conduisent aux « bons résultats » empiriques. En effet, en mesurant le capital et l'output en valeur et en affectant un coefficient correspondant à la part des facteurs, on ne fait qu'estimer une identité comptable qui, par définition, est toujours vraie (Felipe et McCombie, 2014 ; Shaikh, 1974). Ici, les « bons résultats » ne sont qu'un artefact statistique et ne révèlent pas une efficacité particulière dans l'explication du

phénomène que l'on cherche à expliquer. Les travaux de la théorie néo-thermodynamique présentent un risque plus faible dans la mesure où les élasticités à l'output sont estimées directement et non déduites d'une hypothèse (le théorème du cost-share)⁸⁴. Pour autant, d'autres limites sont à relever.

D'abord, le critère du R^2 ne paraît pas suffisant. Avec un nombre de paramètres conséquent, il est toujours possible d'avoir un « good fit » de la série que l'on cherche à modéliser. C'était l'une des critiques de Georgescu-Roegen qui l'exprimait sous la forme métaphorique suivante : « On peut toujours prouver que dans n'importe quelle bûche il existe une belle Madone » (Georgescu-Roegen, 1971, p.340). Par exemple, Aramendia et al. (2021) présentent une série de méthodes pour interroger la relation entre le PIB et l'énergie dans le cas de l'Espagne entre 1960 et 2009. Dans le cas des fonctions de production agrégée, ici trois fonctions CES (Constant Elasticity of Substitution), les résultats sont « bons » au sens où le résidu est faible. Cependant, selon les agrégats retenus, la valeur des paramètres varie de manière importante. Les « meilleurs résultats » sont fournis par des modèles dont les paramètres ont des valeurs insensées : par exemple, des élasticités de substitution qui tendent vers l'infini, ce qui est extrêmement peu réaliste⁸⁵. Cet instrument utilisé pour faire preuve apparaît donc fragile :

*« Arbitrary modelling choices may result in large changes in fitted parameters and therefore economic interpretations, while nonetheless resulting providing very good fits to historical economic output, thereby giving a false sense of robustness »
(Aramendia, 2021, p.28)*

Conclusion de la deuxième section

En résumé, compte tenu de l'absence de prise en compte des lois de la thermodynamique, l'intégration de l'énergie par les théoriciens de la croissance néoclassique est considérée comme invalide par l'économie écologique. Cependant, cette position

⁸⁴ « Non-neoclassical growth analyses with such production functions do not weigh capital, labor, and energy by their cost shares, but rather determine output elasticities econometrically » rappellent (Kümmel and Lindenberger, 2020, p.9).

⁸⁵ Santos et al. (2018) prennent partiellement en compte ces remarques puisque l'un des critères de réfutabilité des Cobb-Douglas retenue est que les élasticités à l'output des différents facteurs doivent être positives (cf. 2.2. de ce chapitre).

commune ne conduit pas aux mêmes conclusions quant à l'alternative à proposer. Si pour un premier groupe d'auteurs parmi lesquels figurent Georgescu-Roegen, le cadre néoclassique et les fonctions de production sont à abandonner, une autre partie des économistes écologiques s'orientent vers une critique interne du cadre standard. Ainsi du courant de la théorie néo-thermodynamique qui formule une nouvelle synthèse entre économie écologique et théorie néoclassique. Dans cette perspective, les principes de la thermodynamique peuvent être fidèlement intégrés aux fonctions de production agrégée, voire pour les approches les plus récentes, aux fonctions Cobb-Douglas. Les résultats obtenus dans le cadre d'estimations économétriques viendraient valider la robustesse de la démarche.

Le choix d'utiliser les fonctions de production agrégées présente d'importantes difficultés soulevées dès les années 1960 par les auteurs post-keynésiens. Le recours à des agrégats monétaires pour discuter de relations techniques à un niveau macroéconomique est hautement problématique. Bien que certains travaux de la théorie néo-thermodynamique mentionnent les critiques adressées aux fonctions de production, notre analyse montre qu'ils n'y répondent pas complètement. Les travaux présentés ne proposent pas d'alternative aux agrégats de capital et de PIB utilisés dans la littérature standard. Le dernier argument mobilisé reste alors celui de l'instrumentalisme méthodologique c'est-à-dire le fait que les « bons résultats empiriques » suffiraient à justifier la démarche (Ayres et Warr). Pourtant cet argument est fragile dans la mesure où, du fait des agrégats monétaires utilisés, il est possible d'estimer une simple identité comptable.

En l'état, le cadre des fonctions de production apparaît problématique et insuffisant pour discuter du rôle de l'énergie dans le processus de croissance. Dans notre dernière section, nous repartons du problème de l'agrégation dans le but d'esquisser des alternatives.

3. Des impasses de l'usage de fonction de production agrégé à leur dépassement : une exploration des alternatives

Au terme de la section précédente, nous avons mis en évidence l'impossibilité de recourir à des agrégats monétaires pour appréhender une relation technique. Des questions restent toutefois en suspens : n'existe-t-il pas une autre manière d'agrèger qui soit plus

satisfaisante, permettant de continuer à raisonner à partir des fonctions de production agrégées ? Ou bien faut-il les abandonner ? Cette dernière section apporte des réponses. Elle présente trois différentes pistes pour dépasser les difficultés identifiées à la section 2 afin d'apprécier la relation entre l'énergie et la production économique à un niveau macroéconomique.

La première alternative consiste à utiliser d'autres agrégats ayant une véritable dimension physique. Ainsi, la première sous-section présente l'usage de l'exergie utile comme unité pour agréger l'output (3.1.). La seconde alternative consiste à mesurer d'une manière différente la contribution de l'énergie à la production. En effet, dans le cadre des fonctions de production, qu'elles soient néoclassiques ou néo-thermodynamiques, la contribution s'apprécie à partir de l'élasticité à l'output. Nous présentons une alternative proposée par Giraud et Kahraman qui se passe de fonction de production : l'usage de ratios de dépendance (3.2.). Enfin, cette section conclut en montrant que le dépassement de ces difficultés passe par une meilleure articulation entre deux dimensions de la réalité : le monde monétaire et le monde physique. Une typologie des différentes manières qu'ont les paradigmes en économie d'articuler ces deux dimensions est proposée (3.3.).

3.1. L'exergie utile comme mesure de la production physique agrégée

La question de l'unité de mesure est centrale. Elle dépend en premier lieu de l'objectif que se donne le chercheur ou le décideur public. Prenons l'exemple simple d'une économie qui produit deux biens : des pommes et des tranches de pain. Si l'objectif est de stocker les marchandises, l'unité volume (le mètre cube par exemple) est pertinente. Si ce sont les coûts d'expédition des marchandises qui intéressent, l'unité de poids (le kilogramme par exemple) pourrait être préférée. Si, enfin, c'est l'apport nutritif des marchandises qui compte, alors on pourrait utiliser l'unité calorie. Acceptons les valeurs données dans le tableau 20 pour illustrer le raisonnement.

	Poids unitaire en grammes	Volume unitaire en cm ³	Énergie unitaire en calories	Quantités 2020	Quantités 2022
Pommes	100	105	52	100	50
Tranches de pain	30	50	87	25	100

Tableau 20. **Valeurs de masse, volume et énergie pour une pomme et une tranche de pain.**

Source : auteur.

Parce qu'on ne répond pas aux mêmes préoccupations, en fonction de l'unité retenue, la mesure du stock de production et de son évolution n'est pas la même. A chaque fois, la réalité et les marchandises qui la composent sont appréhendées sous un angle différent. Par exemple, dans cette économie fictive, la production mesurée en grammes a diminué de 25,5% alors que mesurée en calories elle augmente de 159,7%. Pourtant les trois mesures utilisent une unité physique⁸⁶ (tableau 21).

	En grammes	En cm ³	En calories
Production totale en 2020	10000+750=10750	10500+1250=11750	5200+2175= 4350
Production totale en 2022	5000+3000=8000	5250+5000=10250	2600+8700=11300
Croissance 2020-2022	-25,5%	-12,7%	+159,7%

Tableau 21. **Production totale en grammes, centimètres cubes et calories entre 2020 et 2022.**

Source : auteur

Si l'on souhaite mesurer la dépendance de la production à l'énergie, il paraît pertinent d'agrèger la production à partir de l'énergie. En effet, comme cela a été présenté

⁸⁶ La production mesurée en monnaie donnerait des résultats encore différents. Cette mesure est écartée ici car l'objectif est précisément de procéder à une agrégation physique de la production afin de pouvoir discuter de la relation technique entre production et énergie.

précédemment, d'un point de vue biophysique, le processus économique ne fait que consommer de la basse entropie pour rejeter de la haute entropie. Si on reprend les différents stades de l'énergie, on peut dire que le processus économique absorbe de l'énergie finale et rejette des services énergétiques. D'un point de vue physique, les services énergétiques *sont* l'output du processus économique. Il est donc possible de les considérer comme un bon proxy de la quantité physique de production qui a été générée (figure 22). En effet, l'énergie est la capacité à transformer l'environnement. Plus les services énergétiques sont importants (chauffage, lumière, motricité), plus l'action de transformation du monde a été importante, plus la quantité produite de biens et services est importante.

La figure 22 résume notre propos. Le travail et le capital ont tous les deux besoins d'énergie pour fonctionner. Tous deux peuvent produire des services énergétiques. Le corps humain produit essentiellement de la chaleur et de la puissance musculaire, on parle dans ce cas d'exergie utile *endosomatique*, c'est-à-dire interne à « la machine humaine ». Par opposition, on parlera d'exergie utile *exosomatique* pour tous les services énergétiques dont les humains bénéficient mais qu'ils obtiennent par conversion d'exergie finale dans une machine extérieure à leur propre corps. La production physique est aujourd'hui très majoritairement le fait des machines dans la mesure où l'exergie utile endosomatique (le travail musculaire) représente une part très faible du total (<1%) de l'exergie utile générée (voir par exemple Serrenho et al., 2014).

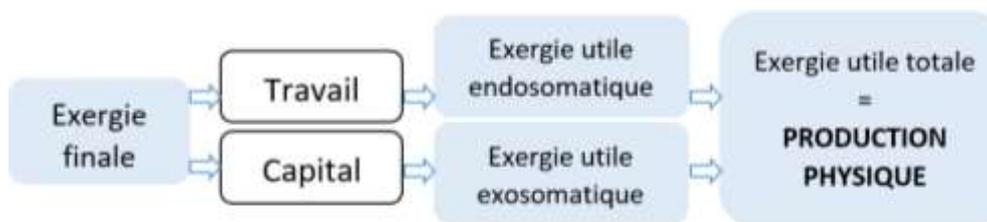


Figure 22. **Le processus de conversion de l'exergie finale en exergie utile.**

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. Robert Ayres, fondateur de la théorie néo-thermodynamique, s'est

d'ailleurs récemment rangé à cette conclusion. Dans un article coécrit avec Keen et Standish (2019), il propose de remplacer le PIB réel par l'exergie utile tout en continuant à utiliser une fonction de production agrégée :

« Once both labour and capital are seen as means to turn energy into useful work⁸⁷, then the inputs of the functions $L(E)$ and $K(E)$ are energy, while the outputs are the potential for useful work (exergy) »
(Keen et al., 2019, p.41)

Redéfini avec ce nouvel agrégat physique, la nouvelle fonction de production est plus apte à apprécier une relation technique au niveau macroéconomique. Cependant, ces auteurs continuent à utiliser une mesure standard du capital qu'eux-mêmes qualifient de « poorly defined and contested [...] of homogeneous machinery » (p.41). Répondre totalement à la controverse de Cambridge supposerait de trouver un agrégat physique pour le capital fixe. Mais peut-être que cette quête est vaine. En effet, l'essentiel de l'exergie utile étant fournie par le capital, l'exergie utile pourrait alternativement être considérée comme le flux de services productifs apportés par le capital et appréciés en unité physique.

Face à cette impasse à trouver une mesure physique à tous les agrégats de la fonction de production, le calcul d'un ratio de dépendance peut apparaître comme une solution pour appréhender la relation technique entre énergie et production au niveau macroéconomique.

3.2. Calculer un ratio de dépendance entre la production physique et l'énergie

Pour mesurer la contribution de l'énergie à la croissance, un agrégat de capital est-il nécessaire ? Dans le cadre des fonctions de production, la représentation des différents inputs est requise afin d'isoler la contribution d'un facteur dans le cadre des décompositions analytiques de la croissance. Cependant, cette représentation présente des limites qui peuvent conduire à les abandonner.

⁸⁷ Pour rappel, le travail utile (useful work) et l'exergie utile sont synonymes : dans les deux cas il s'agit du flux d'énergie sortant d'un appareil (stade utile) et dont la qualité est prise en compte (exergie). Voir l'encadré 1 du chapitre 1 pour plus de détails.

Les décompositions de la croissance permises par les fonctions de production agrégées donnent une *contribution* comptable des différents facteurs, mais ne permettent pas de mettre en évidence les *sources* de la croissance. Pottier (2012) donne l'exemple d'un modèle de Ramsey où la seule source de la croissance est le progrès technique exogène : sans ce progrès technique, il y aurait état stationnaire. Pourtant, la décomposition analytique donne une contribution du capital positive. En effet, le progrès technique améliore la productivité marginale du capital et permet la poursuite de son accumulation. Le capital contribue à la croissance (sans accumulation de capital, la production n'aurait pas été aussi élevée), pour autant, sans progrès technique exogène, il n'y aurait jamais eu accumulation de capital. Une décomposition analytique ne nous dit pas ce qui cause l'augmentation de la contribution productive d'un facteur, c'est-à-dire son élasticité à l'output. Mesurer la contribution de l'énergie à partir de son élasticité à l'output peut ainsi paraître réducteur.

Plutôt que des fonctions de production qui estiment des élasticités à l'output, Giraud et Kahraman (2014) proposent de privilégier le calcul de *ratios de dépendance*. Un ratio de dépendance rapporte la production économique à un facteur de production afin d'en déduire le degré de dépendance au cours du temps. Pour Giraud et Kahraman, un tel ratio est supérieur à l'élasticité à l'output pour apprécier la contribution d'un facteur. En effet, l'élasticité à l'output conclut sur la base de la variation d'un seul facteur, là où le ratio de dépendance fait varier tous les facteurs à la fois. Dans notre cas, un tel ratio permet de faire l'économie de l'agrégat « capital » pour mesurer la contribution de l'énergie à la croissance économique. A partir d'un panel de 50 pays sur la période 1970-2011, les deux auteurs concluent que *le ratio de dépendance* entre l'énergie et le PIB est compris entre 0,6 et 0,7 :

« This means that, ceteris paribus, an increase (resp. decrease) of 10% of energy use per capita induced, on average, an increase (resp. decrease) of about 6 to 7% of GDP per capita »
(p.3).

Si on admet l'idée développée précédemment (cf. 3.1.) que l'exergie utile est une unité pertinente pour agréger la production physique, il est possible de répliquer la démarche de Giraud et Kahraman. Dans ce cas, la mesure du ratio de dépendance de la production physique à l'énergie peut être mesurée à partir de l'évolution du ratio $\frac{\text{exergie utile}}{\text{exergie finale}}$. Ce ratio mesure

rigoureusement l'efficacité de la conversion de l'énergie et peut s'interpréter comme le degré de substitution entre énergie et capital technique au niveau macroéconomique. Si le capital technique devient plus économe en énergie, alors l'exergie utile va augmenter plus vite que l'exergie finale consommée et il sera ainsi possible d'atteindre une forme de découplage. Inversement, si l'exergie finale augmente au même rythme que la production (l'exergie utile), il n'y a couplage entre les deux variables signalant une absence de substitution.

A partir des données de Serrenho et al. (2014), nous calculons ce ratio de dépendance pour 15 pays européens sur la période 1961-2009 (figure 23). Le ratio de dépendance obtenu est de 1,04 : lorsque la production physique augmente de 1%, l'exergie finale augmente de 1,04%. Ces données sommaires indiquent que la progression de la production physique est bien arrimée à la consommation d'énergie finale puisqu'il y a léger surcouplage. Si on accepte cette mesure physique de la production, le découplage absolu n'est donc pas observé. On peut également interpréter ces résultats comme preuve d'une complémentarité entre le capital et l'énergie finale au niveau macro-économique.

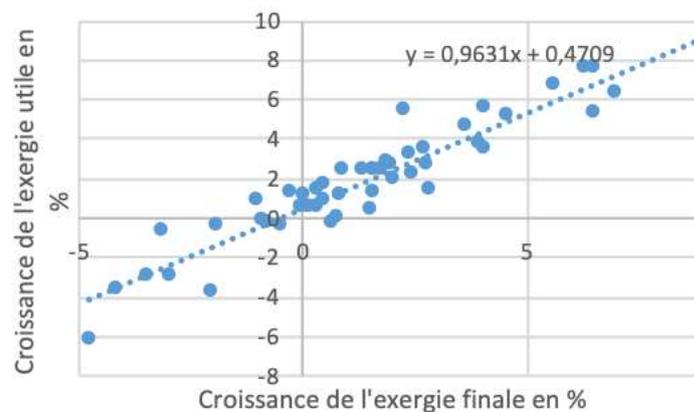


Figure 23. **Croissance de la production physique et de l'énergie finale utilisée pour 15 pays européens (1961-2009).**

Source : auteur. Données : Serrenho et al. (2014).

Malgré les justifications quant aux agrégats retenus, cette redéfinition de la production à partir de l'exergie utile conduit à une perte de sens économique. Le PIB réel mesure l'évolution du pouvoir d'achat du revenu national, ce concept conserve un sens pour les agents économiques, ce qui n'est pas le cas de l'exergie utile. On touche ici à un paradoxe :

- 1) Soit on utilise un agrégat physique qui permet d'apprécier de manière plus rigoureuse la relation technique entre l'énergie et la production mais on perd la signification économique⁸⁸ ;
- 2) Soit on utilise un agrégat économique/monétaire (le PIB réel) mais dans ce cas la relation à l'énergie n'est plus seulement une relation technique.

Ce paradoxe révèle la difficulté à articuler deux dimensions de la production : le physique et le monétaire. La dimension physique renvoie au fait que la production prend place dans un monde régi par les lois de la thermodynamique. Ces lois font peser sur la production humaine des contraintes physiques. Pour reprendre les termes de Georgescu-Roegen : il faut dégrader de l'énergie (la basse entropie) pour produire des biens et services. Mais dans les économies marchandes, la production économique a aussi une valeur exprimée en monnaie qui a une signification pour les acteurs économiques. Dit autrement, les biens et services existent aussi dans un autre espace (la valeur) : c'est la dimension monétaire.

Penser le découplage consiste donc à articuler correctement ces deux dimensions. Aussi, pour clore cette sous-section, nous présentons les différentes manières d'articuler ces deux dimensions identifiées dans la littérature.

3.3. Articuler la réalité monétaire et réalité physique : une typologie des différentes approches

Dans la sous-section précédente (3.2.), nous avons vu que, chez Kümmel, cette articulation entre les dimensions monétaires et physiques de l'activité économique était évacuée à partir d'une hypothèse *ad hoc* de proportionnalité entre la mesure physique et monétaire. En effet, Kümmel ne propose pas de comparaison entre une mesure physique de la production et celle en monnaie (le PIB réel). Apprécier la validité de la thèse de Kümmel peut se faire à partir des séries d'exergie utile. En effet, Kümmel estime que la « capacité

⁸⁸ Couix (2020b) repère également ce paradoxe en ces termes : « Pour redonner une portée plus générale à l'idée de limite thermodynamique, il faudrait donc être en mesure de comparer des biens qualitativement différents entre eux. Or, aucune mesure strictement physique ne permet de faire cela d'une manière qui ait *un sens économique* » (p.113).

physique » peut être utilisée pour agréger. Or, l'exergie utile, en tant que proxy des services énergétiques, correspond bien à une capacité physique à déplacer les objets et transformer l'environnement, raison pour laquelle Keen, Ayres et Standish plaident pour l'utiliser comme mesure de la production physique (cf. infra).

Suivant cette perspective, nous comparons les séries de PIB réel et celles d'exergie utile pour cinq pays : l'Allemagne, la France, le Japon, le Royaume-Uni et les États-Unis. Nous nous basons ici sur le travail effectué par Cahen-Fourot et Durand (2016) qui ont spécifié cette relation pour ces pays entre 1950 et 2009⁸⁹. De 1950 à 1974, la production physique (exergie utile) croît plus rapidement que la production économique (PIB réel). À partir de 1974, la tendance s'inverse : le PIB réel augmente plus rapidement que la production physique, ce qui peut s'interpréter comme une création de valeur progressivement découplée d'une augmentation de la production physique domestique. La proportionnalité entre l'agrégat monétaire et l'agrégat physique n'est pas observée pour la période en question pour les différents pays (tableau 22), ce qui tend à invalider⁹⁰ la thèse de Kümmel.

	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-Uni⁹¹	-2,28	-1,08	1,16	
Royaume-Uni⁹²		0,79	1,61	2,71
États-Unis	-0,77	-1,60	1,77	
Ensemble	-1,92	-0,48	1,52	1,48

Tableau 22. **Croissance annuelle moyenne du ratio PIB réel/exergie utile entre 1950 et 2009.**

Source : auteur à partir de Cahen-Fourot et Durand, (2016, p.20). Données pour l'exergie utile : Ayres et al (2003) pour les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni ; Serrenho et al. (2014) pour la France, le Royaume-Uni et l'Allemagne

⁸⁹ Ces deux auteurs calculent la « productivité du travail utile » qui correspond bien au ratio $\frac{PIB\ réel}{exergie\ utile}$

⁹⁰ Comme expliqué au 2.3.2. Kümmel suggère d'utiliser une autre unité « corresponding units of (a weighted sum of) kWh times kBits “spent” in the production process” (Kümmel and Lindenberger, 2020, p.4).

⁹¹ À partir de la série d'exergie utile de Ayres et al., (2003).

⁹² À partir de la série d'exergie utile de Serrenho et al. (2014).

Van den Bergh (1999) considère également cet enjeu estimant que cette difficulté d'articulation entre dimension physique et monétaire est commune aux travaux néoclassiques et néo-thermodynamiques. Van den Bergh propose de traiter cette relation à partir de la fonction de transformation entre dimensions physiques et monétaires mais ne précise pas la forme de cette fonction. Cette reformulation laisse donc en suspens la question de savoir si le flux en valeur peut être généré avec un flux physique décroissant.

Pour Hornborg (2016), cette articulation a reçu jusqu'alors insuffisamment d'attention, les économistes s'étant jusqu'alors focalisés sur la dimension monétaire de la production :

*« Le caractère ambigu de la relation entre l'énergie et la monnaie continue de nous échapper aujourd'hui. Le pouvoir d'achat manifeste la puissance des empires modernes mais le fait que l'accès à l'énergie soit aussi important pour l'économie semble échapper à l'économie en tant que discipline et profession »
(Hornborg, 2016, p.5)*

L'imbrication entre le monétaire et le physique est désigné comme priorité de la recherche en sciences sociales. Cependant, pour Hornborg, ce travail d'articulation suppose au préalable de bien distinguer ces deux dimensions de la production : « D'un point de vue analytique, la réalité sociale et la réalité naturelle doivent être distinguées si l'on veut pouvoir saisir la manière dont elles sont entrelacées » (Hornborg, 2019, p.72). Par exemple, les travaux des théoriciens néoclassiques et néo-thermodynamiques présentés dans ce chapitre ont échoué à suivre cette précaution méthodologique. En effet, ils ont utilisé pêle-mêle agrégats monétaires et agrégats physiques au sein des fonctions de production pour estimer une relation technique.

Cette question de recherche conduit Hornborg (2014) à proposer une typologie des différentes manières d'articuler physique et monétaire. Quatre démarches correspondant à quatre paradigmes sont identifiées : la théorie néoclassique, la théorie classique, la théorie néo-physiocratique et la théorie non-réductionniste de l'économie écologique. Pour Hornborg, ces paradigmes se distinguent avant tout par la théorie de la valeur qu'ils développent. En effet, c'est par la désignation d'une source de la valeur des biens et services, que ces paradigmes établissent (ou non) un lien entre variables monétaires et variables physiques.

- 1) La **théorie néoclassique** fait de l'utilité la source de la valeur mais, d'après Hornborg, elle est aveugle à la dimension biophysique de la production. Ce constat rejoint celui développé en section 1 : les ressources naturelles sont substituables par du capital et le progrès technique permet de s'en passer. Les coûts de production ne sont pas affectés par la moindre disponibilité des ressources de sorte que la création de valeur peut avoir lieu.
- 2) La **théorie classique** (Smith, Ricardo mais aussi Marx) fait du temps de travail, une unité physique, la source de la valeur. Les contraintes naturelles sont bien présentes et impactent la création de valeur. Par exemple, la mise en culture des terres marginales moins productives, chez Ricardo, augmente le travail incorporé dans le blé, ce qui conduit à une augmentation du prix de ce dernier.
- 3) La **théorie néo-physiocratique** désigne les prolongements contemporains de l'école physiocratique française qui identifiait l'agriculture, principal secteur énergétique dans une économie basée sur la biomasse, comme source de la richesse. D'après Hornborg, les continuateurs (Odum, Costanza) adhèrent à la théorie de la valeur-énergie : la valeur des biens et services dépend de l'énergie qu'ils incorporent. Les contraintes naturelles sont bien présentes : plus d'énergie dépensée conduit à des marchandises plus chères.
- 4) La **théorie non réductionniste de l'économie écologique** dans laquelle Hornborg classe Georgescu-Roegen et Daly. Dans le monde monétaire, cette théorie partage avec les néoclassiques le fait que la valeur trouve sa source dans les préférences des consommateurs. Dans le monde biophysique, elle considère que toute activité de production passe par une dégradation de l'énergie (entropie).

Pour Hornborg, seul le quatrième paradigme est totalement satisfaisant. En effet, le paradigme néoclassique ne prend pas en compte les contraintes naturelles, la création de valeur pouvant alors être déconnectée des ressources. Pour les néo-physiocrates et les marxistes, les contraintes sont présentes mais ces deux théories présenteraient deux défauts qui les disqualifient : le substantialisme et le réductionnisme. Le substantialisme désigne le fait que la source de la valeur est une substance naturelle (l'énergie, le temps de travail). Pour Hornborg, cela est incompatible avec l'idée que la valeur est un phénomène culturel : les

objets valent quelque chose car il existe des préférences historiquement et socialement construites. Le réductionnisme revient à ne considérer qu'un seul facteur à l'origine de la valeur, les autres facteurs, par exemple le rôle du capital, étant niés. La théorie non réductionniste de l'économie écologique est donc préférée car elle éviterait ces deux écueils :

« Only in the non-reductionist economics pioneered by Nicholas Georgescu-Roegen do we find a consistent analytical distinction between the semiotics of market valuation and its material consequences. His conclusion, that the products of economic processes simultaneously represent greater consumer value and greater entropy than the inputs in such processes, remains a formidable challenge to any advocate of economic growth and technological progress »
(Hornborg, 2014, p.16)

D'après Hornborg, cette double dimension de la production conduit à une forme de régularité entre énergie dissipée et valeur économique :

« [La perspective de la théorie non réductionniste de l'EE] ne contredit pas la définition courante de la valeur comme étant basée sur la valeur d'échange (utilité) déterminée par le marché, mais ajoute que l'attribution inévitable d'une valeur plus élevée aux marchandises représentant le potentiel productif restant le plus faible (ou « entropie négative » voir Georgescu-Roegen, 1971) »
(Dorninger et al., 2021, p.3)⁹³

Ainsi, après avoir écarté les thèses néo-physiocratiques, Hornborg retrouve une conclusion assez proche : un produit ayant une valeur plus importante tend à avoir nécessité une dissipation plus importante d'énergie qu'un bien d'une valeur moindre. Les préférences culturelles ne sont donc pas l'unique déterminant de la valeur des biens. L'énergie dissipée et à travers elle les coûts de production ont bien un rôle dans les prix relatifs.

⁹³ Notons ici qu'il s'agit bien des thèses d'Hornborg, développées antérieurement (Hornborg, 1998, 2009), reprises ici dans un papier écrit avec neuf co-auteurs. Cette élaboration théorique d'Hornborg sert de mécanisme explicatif à l'existence d'échanges écologiquement inégaux. En effet, les biens produits par les pays riches ont dissipé plus d'énergie (technique plus capitaliste et position dans les chaînes de valeur) que ceux des pays pauvres. Les écarts de valeur qui en résultent donnent lieu à des termes de l'échange défavorables aux pays pauvres et conduisent à des transferts asymétriques de ressources.

Symétriquement, les conclusions sur l'absence de considération pour les préférences culturelles chez les classiques et les néo-physiocrates paraissent expéditives. En effet, Ricardo et Marx insistent sur le fait que la valeur d'usage (le fait qu'un produit soit utile à quelque chose) est une condition au fait que ce produit ait une valeur d'échange (un prix exprimé en monnaie). De même, Costanza, à l'origine de la théorie de la valeur énergie, considère que :

*« There is no inherent conflict between an embodied energy (or energy cost) theory of value and value theories based on utility »
(Costanza, 1980, p.1224).*

Hornborg ne classe pas les auteurs de la théorie néo-thermodynamique étudiés au cours de ce chapitre. Leur classement n'est pas aisé car leur démarche tend à faire disparaître la distinction physique-monnaie. Cela est toutefois directement lié à l'hypothèse d'équivalence entre mesure physique et mesure monétaire de la production énoncée par Kümmel qui est, en définitive, une théorie de la valeur implicite :

*« The monetary value of goods is the higher the more physical work must be performed and the more information must be processed in the production of the good or the service »
(Kümmel and Lindenberger, 2020, p.2).*

Et Kümmel de préciser :

*« This is not meant to contradict subjective value theory according to which value is ultimately derived from individual preferences and willingness-to-pay »
(Ibid, p.2).*

Sur cette base, nous classons Kümmel, et par extension les auteurs de la théorie néo-thermodynamique, dans la théorie non réductionniste de l'économie écologique.

Malgré ces simplifications, propres à ce genre d'exercice, la typologie d'Hornborg met en évidence un canal important par lequel monde physique et monde monétaire sont connectés : le *canal des coûts de production*. C'est la raison pour laquelle les théories de la valeur sont aussi structurantes dans la typologie : elles identifient des facteurs clés à la dynamique des prix relatifs, ce qui les conduit à désigner un coût de production ultime (énergie chez les néo-physiocrates et chez les non-réductionnistes de l'économie écologique, travail chez les classiques).

Le tableau 23 reprend les arguments de Hornborg et nos remarques. Ce tableau ne vaut pas conclusion définitive, il se veut être un résumé d'étape dans notre raisonnement et appelle, pour certaines affirmations, à de plus amples vérifications⁹⁴.

	Source de la valeur	Rôle des préférences culturelles	Contraintes naturelles et des coûts	si	Critiques	Exemple d'auteurs
Néoclassiques	Utilité	Oui	Absent substituabilité capital énergie et progrès technique		Non prise en compte de la thermodynamique	Solow, Stiglitz
Th. non réduc. de l'EE	Utilité	Oui	Présent. Thermodynamique		Conclusions similaires aux néo-physiocrates ⁹⁵	Daly, Georgescu-Roegen, Kümmel
Néo-physiocrates	Energie incorporée	Oui d'après Costanza.	Présent. l'énergie incorporée, ↑coûts, ↑prix	↑de	Réductionnisme et substantialisme	Odum, Costanza
Classiques	Travail incorporé	Présent. Valeur d'usage comme condition de la valeur d'échange	Présent. de nécessaire et	↑temps travail et ↑prix	Réductionnisme et substantialisme	Ricardo, Marx

Tableau 23. **Comparaisons des différents paradigmes identifiés par Hornborg.**
Source : auteur.

⁹⁴ Par exemple, la question du substantialisme et du réductionnisme des théories classiques et néo-physiocratiques sont discutées plus en détail au chapitre 3.

⁹⁵ Nous faisons ici référence à la critique que nous avons énoncée précédemment : la théorie des coûts formulée par Hornborg ne semble pas différente de celles des néo-physiocrates puisqu'un produit qui a nécessité plus de dissipation d'énergie aura un prix plus élevé. La critique porte donc ici sur l'absence de spécificité.

Conclusion de la troisième section

En résumé, le dépassement des critiques émises à l'égard des fonctions de production agrégées peut prendre plusieurs directions. La première consiste à prendre acte des limites des agrégats monétaires et utiliser des unités physiques pour agréger les différents inputs mais aussi la production. C'est l'une des pistes explorées par Robert Ayres : le capital et le travail sont exprimés de manière standard mais sont tous deux fonctions de l'énergie finale consommée, tandis que la production est mesurée à partir de l'exergie utile. Cette tentative n'est pas pleinement suffisante dans la mesure où l'agrégat de capital continue à être évalué en monnaie.

Ainsi, une solution consiste à se passer de l'agrégat « capital ». Cette démarche proposée par Giraud et Kahraman (2014) est déjà un pas de côté par rapport aux fonctions de production. Dans cette perspective, la relation entre l'énergie et la production est appréciée par un ratio de dépendance. Ces deux propositions peuvent être croisées : nous avons ainsi calculé un ratio de dépendance à partir de l'exergie utile pour 15 pays européens sur la période 1960-2009. Nous concluons à une forte dépendance de la production physique à la consommation d'énergie.

Cependant, ces deux premières propositions ne donnent pas entière satisfaction. Tout d'abord, les ratios de dépendance nous conduisent à une difficulté déjà repérée au chapitre 1 : il s'agit d'une analyse purement descriptive, qui a son intérêt, mais qui ne permet pas de saisir le rôle de l'énergie. Il n'y a pas possibilité d'identifier les mécanismes à l'œuvre. Cette critique n'est pas propre aux ratios de dépendance. La décomposition permise par les fonctions de production sert avant tout à calculer une contribution de l'énergie, pas à préciser ces mécanismes. Ensuite et surtout, l'utilisation d'agrégats physiques fait apparaître une difficulté importante. En voulant donner un sens rigoureusement technique à la relation observée entre énergie et production (ce qui est l'objectif d'une fonction de production), il y a une perte de sens économique. Cela offre un argument supplémentaire à ne pas utiliser les fonctions de production.

La première étape à la construction d'une représentation alternative aux fonctions de production consiste à bien distinguer la dimension physique de la dimension monétaire. La seconde étape est celle de leur articulation. Dans les différents paradigmes, cette articulation

est réalisée par la théorie de la valeur. En effet, le canal par lequel le monde monétaire apparaît lié au monde physique est le canal des coûts de production, coûts de production qui en retour influencent les prix des marchandises. Si on suit le raisonnement de Hornborg, une théorie de la valeur qui ne fait pas des coûts de production un élément structurant de son approche est incapable de prendre en compte les contraintes naturelles qui pèsent sur le processus de production, donc sur la croissance. C'est le cas de la théorie néoclassique qui fait de l'utilité la source de la valeur. À l'inverse, les théories de la valeur-énergie mais aussi celle de la valeur travail sont des théories où les coûts de production permettent de lier contraintes naturelles et création de valeur. Alors que chez les classiques, le coût est déterminé par la quantité de travail incorporée, chez les néo-physiocrates celui-ci dépend de la quantité d'énergie incorporée.

Même si la théorie non réductionniste de l'économie écologique revendique une spécificité, la théorie des coûts sous-jacente ressemble fortement à celles des néo-physiocrates.

Conclusion du chapitre 2 : la nécessité d'abandonner le cadre standard et de se tourner vers d'autres paradigmes

En conclusion, ce chapitre a évalué la pertinence d'une utilisation du cadre néoclassique pour intégrer l'énergie à la théorie de la croissance. Le modèle canonique est celui de Solow progressivement enrichi d'un input en ressources naturelles. Appréhendées de la sorte, les ressources énergétiques ne sont pas indispensables à la croissance dès lors qu'elles peuvent être substituées par du capital ou qu'un certain rythme de progrès technique est observé. Les évaluations empiriques de la substituabilité ne sont pas convergentes, mais surtout leurs résultats sont surdéterminés par l'hypothèse de rémunération à la productivité marginale. Ces limites n'ont toutefois pas conduit à l'abandon des fonctions de production.

En effet, une partie de l'économie écologique, la théorie néo-thermodynamique, estime qu'une synthèse est possible, que la thermodynamique pourrait être intégrée aux fonctions de production. Bien que ces travaux réussissent à montrer une contribution conséquente de l'énergie à partir du cadre néoclassique, elles ne parviennent pas à dépasser

les objections des post-keynésiens énoncées lors de la controverse des deux Cambridge. Une fonction de production agrégée est censée décrire une relation technique entre inputs et outputs mais cela n'est pas possible à partir d'agrégats monétaires. L'usage d'agrégats physiques comme l'exergie utile est plus satisfaisant mais a pour effet de nous éloigner du PIB réel et de l'idée de production économique.

Ce paradoxe révèle que la relation entre la valeur agrégée de la production (le PIB) et la consommation d'énergie n'est pas technique. Représenter le rôle de l'énergie comme un input qu'on combinerait avec du travail et du capital pour produire de la valeur économique n'est donc pas tenable. Ces facteurs de production permettent de réaliser une production physique, pas de la valeur économique. À l'inverse des néoclassiques, les économistes classiques, Marx en particulier, faisaient cette différence : les forces productives produisent des valeurs d'usage mais la valeur économique trouve sa source ailleurs : dans le temps de travail dépensé. Si on accepte cette dichotomie, le rôle essentiel de l'énergie, mis en évidence par la thermodynamique, dans la production de valeur d'usage, ne permet pas de préjuger de son rôle dans la création de valeur. Les mondes physiques et monétaires doivent être distingués (tableau 24).

	Monde monétaire	Monde physique
Nom de l'output	Valeur économique	Production physique
Indicateur	PIB en euros	Exergie utile en joules
Source	Variable selon les théories de la valeur : utilité, énergie incorporée, travail incorporé.	Combinaison des facteurs de production. Contraintes relatives aux lois de la thermodynamique

Tableau 24. **Les deux dimensions de la production : mesure et sources.**
Source : auteur.

Comme l'explique Hornborg, la compréhension de la relation consommation d'énergie-PIB réel suppose, non pas de confondre ces deux niveaux⁹⁶, mais de penser correctement leur articulation. Les contraintes physiques ont une manifestation simple dans le monde monétaire : elles augmentent le coût de production des marchandises. C'est pourquoi les théories de la valeur qui font un lien explicite entre les variables physiques et les prix sont en mesure de discuter de ces contraintes. C'est le cas de la théorie de la valeur énergie portée par les néo-physiocrates mais aussi de la théorie de la valeur travail des classiques. Ce n'est en revanche pas le cas de la théorie néoclassique et sa théorie de la valeur utilité.

Ainsi, la démonstration menée au cours de ce chapitre nous conduit à quitter le cadre néoclassique et à se tourner vers ces deux autres paradigmes : la théorie néo-physiocratique et la théorie classique. Ils sont, a priori, mieux à même de nous permettre de saisir le rôle joué par l'énergie dans le processus de croissance.

⁹⁶ Comme le font les néoclassiques en mesurant la contribution des facteurs de production au PIB réel en lieu et place de la production physique.

CHAPITRE 3.
L'APPROCHE PAR LE SURPLUS. UNE ANALYSE DES
PROPOSITIONS NEOPHYSIOCRATIQUES ET CLASSIQUES
QUANT AU ROLE DE L'ENERGIE DANS LE PROCESSUS DE
CROISSANCE.

PLAN DU CHAPITRE 3

INTRODUCTION DU CHAPITRE 3	183
1. LA THEORIE PHYSIOCRATIQUE : LE SURPLUS ENERGETIQUE COMME CONDITION DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE	185
1.1. LA MESURE DU SURPLUS : DU PRODUIT NET A L'ENERGIE NETTE	186
1.1.1. Les physiocrates : l'agriculture, source du produit net	186
1.1.2. Les néo-physiocrates : de l'énergie nette au EROI	192
CONCLUSION DE LA SECTION 1.1.	204
1.2. DE L'ENERGIE NETTE AU PIB : L'ANALYSE DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE	204
1.2.1. Le canal du prix de l'énergie : quand le EROI ralentit la croissance	205
1.2.2. La théorie de la valeur-énergie.....	216
CONCLUSION DE LA SECTION 1	229
2. LE PARADIGME CLASSIQUE : LE ROLE DETERMINANT DE L'ENERGIE DANS LA FORMATION DU TAUX DE PROFIT ET LA DYNAMIQUE D'ACCUMULATION DU CAPITAL ...	231
2.1. UNE DISTINCTION RIGOUREUSE ENTRE MONDE PHYSIQUE ET MONDE MONETAIRE : DE L'IMPORTANCE DES CONCEPTS DE VALEUR ET DE RICHESSE	232
2.1.1. Le monde physique : le travail et la nature comme sources de la richesse matérielle	232
2.1.2. Le monde monétaire : la valeur comme produit des rapports sociaux marchands.....	234
2.2. L'ARTICULATION ENTRE MONDE PHYSIQUE ET MONDE MONETAIRE : LE TRAVAIL INCORPORE COMME DETERMINANT DU PRIX RELATIF DES MARCHANDISES	237
2.2.1. L'abstraction du travail abstrait lors de l'échange	239
2.2.2. Des régularités dans la quantité de travail abstrait	241
2.3. LA VALIDITE DE LA VALEUR TRAVAIL EN DEBAT : PRIX DE PRODUCTION ET ESTIMATIONS EMPIRIQUES	247
2.3.1. Des valeurs travail aux prix de production : le problème de la transformation	248
2.3.2. Tester la valeur travail : évaluations empiriques de la divergence entre prix et valeurs travail	253
2.4. MODELISER LE ROLE DE L'ENERGIE DANS LA CROISSANCE A PARTIR DES VALEURS TRAVAIL.....	259
CONCLUSION DE LA DEUXIEME SECTION	266
CONCLUSION DU CHAPITRE 3 : LE BESOIN DE TRAVAUX EMPIRIQUES SUPPLEMENTAIRES SUR LES CANAUX DE TRANSMISSION	268

Introduction du chapitre 3

Considérant que l'analyse du rôle de l'énergie dans le processus de croissance est incontournable pour apprécier la possibilité d'un découplage⁹⁷, le chapitre précédent a proposé un examen critique du cadre néoclassique. En préambule nous rappelons les conclusions auxquelles nous sommes parvenu et qui orientent le développement du présent chapitre.

Le découplage suppose d'analyser la dynamique de deux variables : un agrégat physique, la consommation d'énergie, et un agrégat monétaire de la production, le PIB réel. Cette différence de nature entre les agrégats est fondamentale. Le PIB réel n'est pas une quantité de production physique, de sorte que la relation entretenue avec la consommation d'énergie ne peut pas être appréhendée comme une relation technique dont une fonction de production rendrait compte. Pour le dire autrement, production physique et production mesurée en monnaie admettent des sources différentes. La production physique est réalisée par des facteurs de production qui, en vertu des lois de la thermodynamique, mobilisent de l'énergie. La production de valeur provient, selon le paradigme retenu, de différentes sources : utilité pour les néoclassiques, travail incorporé pour les classiques ou encore énergie incorporée pour les néo-physiocrates.

A priori, une théorie de la valeur qui fait un lien explicite aux dimensions physiques est mieux à même d'établir un lien entre les contraintes naturelles du monde physique⁹⁸ et la production de valeur. En effet, selon l'état des contraintes, il faudra plus de travail (ou plus d'énergie, dans le cas des néophysiocrates) de sorte que la marchandise aura une plus grande valeur. C'est là le premier point commun des théories classique et néophysiocratique qui justifie leur traitement au sein d'un même chapitre. Cet a priori restant à examiner, l'analyse de ces deux théories de la valeur occupe d'importants développements au cours de ce chapitre.

L'autre point commun à ces deux paradigmes tient à leur représentation du processus de croissance. Le système économique est représenté comme un ensemble faisant face à une

⁹⁷ Voir chapitre 1.

⁹⁸ Les lois de la thermodynamique sont une expression de ces contraintes.

contrainte de *reproduction matérielle*. A chaque période, des biens et des services sont produits, mais une partie de ceux-ci est prélevée (consommation intermédiaire, amortissement du capital) afin d'assurer la prochaine période de production. Lorsque l'intégralité de la production sert à reproduire l'économie à l'identique, le système ne génère *aucun surplus*. A l'inverse, dès lors qu'une quantité excédentaire est générée, un surplus apparaît⁹⁹. Dans cette perspective, la croissance économique s'analyse donc comme un processus de reproduction élargie où le surplus généré augmente. Du fait de cette représentation commune, nous regroupons, à la suite d'autres auteurs (Lee et Jo, 2011), ces deux paradigmes sous le terme d'*approche par le surplus*.

Or, parce que le surplus est une différence entre deux termes agrégés (la production totale et la consommation productive), son calcul suppose de choisir une unité pour rendre commensurables ces deux grandeurs. Le problème de l'agrégation, présenté au chapitre 2¹⁰⁰ est donc ici également présent. Cependant, à l'inverse des néoclassiques, cette difficulté est identifiée et fait l'objet d'une réflexion approfondie¹⁰¹ :

*« Le lien fondamental existant entre Keynes (1936), Sraffa (1960) et les économistes classiques réside dans le fait que chacun à sa façon, n'a pas uniquement limité le problème de l'agrégation au capital, mais a reconnu la nécessité d'agréger le flux de la production en général. Comme nous allons le voir, pour ces auteurs, la question de la mesure était centrale à toutes leurs analyses »
(Seccarecia, 1982, p.116)*

Les théories classique et physiocratique se distinguent toutefois quant à l'unité pertinente à retenir pour agréger : travail pour les premiers, blé voire énergie pour les seconds. On retrouve une nouvelle fois la théorie de la valeur. Dans ces approches, les théories de la valeur fournissent l'unité pertinente (physique) pour agréger le surplus et, dans le même

⁹⁹ La frontière retenue entre surplus et consommation productive peut être un motif de divergence entre les auteurs. Chez les classiques, par exemple, les salaires sont considérés comme de l'ordre des avances nécessaires, au même titre que les consommations intermédiaires. Le surplus désigne alors ce qui revient aux capitalistes, c'est-à-dire le profit. A l'inverse, chez Sraffa, les salaires font partie, à côté du profit, du surplus : seules les consommations intermédiaires sont traitées comme nécessités techniques de la reproduction.

¹⁰⁰ Voir en particulier la sous-section 3.1.

¹⁰¹ Si les physiocrates n'apparaissent pas dans la citation de Seccarecia, la première partie de son article est bien consacrée à l'analyse de Quesnay. Par ailleurs, cette citation donne l'occasion de préciser que le sens donné dans ce texte à l'expression « théorie classique » ne s'arrête pas aux classiques anglais et Marx, présenté comme le dernier des classiques, mais inclura également les prolongements de Sraffa.

temps, organisent le lien au surplus monétaire (le PIB). Pour le dire autrement, l'unité retenue pour agréger et mesurer le surplus est la source de la valeur.

En définitive, l'objectif de ce chapitre est de réaliser un examen critique des théories néophysioocratique et classique¹⁰² de la croissance. En particulier, notre attention portera sur la manière dont ces théories font apparaître le rôle des contraintes naturelles (et plus particulièrement les lois de la thermodynamique) dans le processus de croissance. Dans la mesure où les théories de la valeur semblent structurantes pour comprendre ce rôle, une partie importante de ce chapitre discute de la robustesse de la théorie de la valeur-énergie et de la théorie de la valeur-travail.

Notre chapitre est structuré en deux grandes parties. La première partie présente la théorie physioocratique et ses prolongements contemporains (1) tandis que la seconde présentera les théories classiques et post-classique (2).

1. La théorie physioocratique : le surplus énergétique comme condition de la croissance économique

Cette section présente les travaux physioocratiques et leurs prolongements contemporains (les néo-physiocrates). Pour ces auteurs, l'unité pertinente pour agréger et parvenir à mesurer le surplus est l'énergie : blé dans le cas des physiocrates, flux d'énergie (fossile) dans le cas des néo-physiocrates. Les raisons qui conduisent à ce choix font l'objet de la première sous-section (1.1.). Ce surplus énergétique identifié, la deuxième section, présente les mécanismes par lesquels ces auteurs font un lien avec le surplus monétaire, le PIB. Bien que tous les auteurs ne s'en revendiquent pas explicitement, ce lien est assuré par la théorie de la valeur énergie dont nous menons un examen critique (1.2.).

¹⁰² Le sens donné dans ce texte à l'expression « théorie classique » ne s'arrête pas aux classiques anglais et Marx, présenté comme le dernier des classiques, mais inclura également les prolongements de Sraffa et de certains post-keynésiens, parfois qualifiés de synthèse post-classique (Lavoie, 1992)

1.1. La mesure du surplus : du produit net à l'énergie nette

Pour les physiocrates et leurs continuateurs, l'unité de mesure pertinente pour agréger et ainsi mesurer le surplus est l'énergie. A l'époque de François Quesnay, fondateur de cette école de pensée, l'énergie est essentiellement renouvelable puisqu'elle provient de la biomasse (forêts, cultures) ¹⁰³. Le surplus appelé alors *produit net* est ainsi mesuré en quantités de blé et trouve sa source dans le secteur agricole (1.1.1). Les prolongements plus récents de la théorie physiocratique (travaux néo-physiocratiques) analysent une économie dont l'essentiel (80%) de l'énergie est d'origine fossile. De ce fait, l'unité pertinente change : c'est désormais la tonne équivalent pétrole ou tout autre unité énergétique qui sera préférée (kilowattheure, joules, british thermal unit...). Le surplus prend alors le nom d'*énergie nette* (1.1.2.)

1.1.1. Les physiocrates : l'agriculture, source du produit net

Le courant physiocratique apparaît dans la seconde moitié du 18^{ème} siècle. Ses deux fondateurs sont François Quesnay, médecin de formation, et Victor Riquetti de Mirabeau, philosophe, qui se rencontrent à Versailles en 1757. L'œuvre fondatrice est le Tableau économique publié par Quesnay en 1758. Parmi les autres membres influents on compte notamment le banquier Richard Cantillon et le contrôleur général des finances de Louis XIV, Anne Robert Thurgot.

L'origine du produit net

Pour Quesnay, le surplus se mesure en blé et prend sa source dans le secteur agricole. Quesnay remarque après William Petty que l'agriculture est en mesure de générer plus de blé qu'elle n'en engage dans la production de blé. Le surplus de ce secteur est facilement observable car le problème de l'agrégation de ses inputs est a priori moins problématique :

¹⁰³ Le *Tableau économique* est publié en 1758. Nous ne disposons pas de séries d'énergie couvrant cette période. Cependant, en 1800, les séries mondiales de consommation d'énergie compilées par Court (2016) indiquent une part du charbon de 0,0011%. Cette part commence à être significative (>10%) aux alentours de 1840. Au niveau mondial, la consommation de charbon supplante celle de bois à partir de 1904.

schématiquement, les inputs consistent uniquement en grains de blé (les semences et la nourriture des travailleurs) tandis que l'output est également une certaine quantité de blé. Pour les autres secteurs, la création d'un surplus est moins évidente car inputs et outputs diffèrent qualitativement. Dans ce cas, apprécier le surplus de ces secteurs suppose de choisir une unité pour agréger ces différents inputs et les comparer à l'output.

Cependant, l'argument de Quesnay quant au fait que le produit net trouve son origine dans l'agriculture ne se résume pas à cette praticité apparente à agréger¹⁰⁴. Après tout, il est possible de choisir le blé comme numéraire pour exprimer tous les biens, ce qui reviendrait à calculer le blé incorporé dans les inputs (direct et indirect). Le fait que l'agriculture soit la source du surplus relève d'une adhésion à un argument physique repris à des contemporains comme Lavoisier : dans le monde physique, rien ne se crée, tout se transforme¹⁰⁵. La terre, par l'intermédiaire du travail agricole des laboureurs, met à disposition de la société une quantité nette de blé, un surplus physique appelé *produit net* :

*« Il faut cependant observer que le Laboureur fournissant à tous l'objet le plus important et le plus considérable de leur consommation ; (je veux dire, leurs aliments, et de plus la matière de presque tous les ouvrages) a l'avantage d'une plus grande indépendance. Son travail, dans l'ordre des travaux partagés entre les différents membres de la société, conserve la primauté [...]. Ce n'est pas ici une primauté d'honneur ou de dignité ; elle est **une nécessité physique** [...] C'est que son travail fait produire à la terre au-delà des besoins personnels, et l'unique fond des salaires que reçoivent les autres membres de la société en échange de leur travail. Ceux-ci, se servant du prix de cet échange, pour acheter à leur tour les denrées du laboureur, **ne lui rendent exactement que ce qu'ils en ont reçu**. C'est ici une différence essentielle entre ces deux genres de travaux [...] Dès que le travail du Laboureur produit au-delà de ses besoins, il peut, avec ce superflu que la nature lui accorde en pur don, au-delà du salaire de ses peines, acheter le travail des autres membres de la société. Ceux-ci en lui vendant, ne gagnent que leur vie ; **le Laboureur recueille, outre la subsistance, une richesse indépendante et disponible qu'il n'a point achetée et qu'il vend. Il est donc l'unique source de toutes les richesses qui, par leur circulation, animent tous les travaux de la société ; parce qu'il***

¹⁰⁴ En réalité, le secteur agricole utilise des biens industriels pour produire. Ses inputs ne se résument pas à une quantité de blé.

¹⁰⁵ La citation exacte de Lavoisier dans son *Traité de Chimie* est « rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications. » (Lavoisier, 1789).

*est le seul dont le travail produit au-delà du salaire du travail »
(Thurgot, 1766, p.10-14, mis en gras par l'auteur)*

Le surplus en blé va permettre de nourrir des travailleurs supplémentaires embauchés par l'industrie et fournir des matières premières à ce secteur. L'agriculture permet l'existence de l'industrie. D'un point de vue physique, l'industrie, appelée aussi classe stérile, n'ajoute rien, elle ne fait que dissiper le surplus agricole, lui donner une autre forme. La représentation de la société en différentes classes sociales en découle. Les physiocrates distinguent une classe productive, les laboureurs c'est-à-dire les travailleurs du secteur agricole, et une classe stérile formée par les travailleurs du secteur industriel :

*« Voilà donc toute la société partagée, par une nécessité fondée sur la nature des choses, en deux classes : toutes deux laborieuses. Mais dont l'une, par son travail produit ou plutôt tire de la terre des richesses continuellement renaissantes, qui fournissent à toute la société la subsistance et la matière de tous les besoins. L'autre occupée à donner aux matières produites les préparations et les formes qui les rendent propres à l'usage des hommes, vend à la première son travail, et en reçoit en échange la subsistance. La première peut s'appeler classe productive et la seconde classe stipendiée »
(Thurgot, 1766, p.15)*

Outre la classe productive et la classe stérile, une dernière classe est identifiée par les physiocrates : les propriétaires de la terre. Chacune des classes sociales a une fonction économique bien précise :

- **Les propriétaires du sol (l'aristocratie)** possèdent la terre, entendue au sens large de « nature ». Cela comprend les terres agricoles mais aussi les mines. Ces propriétaires reçoivent une partie de la production sous forme de rente foncière. Ils possèdent l'argent et sont à l'origine des avances monétaires. Ils consomment à la fois des biens agricoles et l'essentiel des biens industriels.
- **La classe productive** désigne l'ensemble des travailleurs du secteur agricole/minier. Cette classe produit des denrées agricoles et des matières premières qui seront transformées par les autres secteurs. Ces travailleurs consomment des biens agricoles pour reproduire leur force de travail. Ils achètent également des biens industriels nécessaires à la production agricole.

- **La classe infertile** désigne l'ensemble des travailleurs du secteur industriel. Ce secteur consomme et dissipe le surplus généré par la classe productive. En effet, les travailleurs de ce secteur consomment du blé tandis que les biens industriels produits résultent d'une transformation de matériaux naturels.

Le secteur agricole génère un surplus physique qui va circuler entre les différentes classes. Le tableau économique de Quesnay, première représentation macroéconomique¹⁰⁶, vise à saisir cette circulation.

La circulation du produit net entre les classes

Si on suit Pasinetti (1977), le modèle de Quesnay peut être représenté sous la forme d'une table input output (tableau 25). La consommation de la classe productive et de la classe stérile sont traitées ici comme des inputs tandis que la consommation finale est intégralement réalisée par la classe des propriétaires fonciers. Des valeurs fictives permettent d'illustrer le raisonnement. L'unité retenue pour compter la production est *l'unité de bien agricole*.

		Classe productive	Classe stérile	Propriétaires fonciers	Total
Classe productive (Agriculture)	Nourriture	1	1	1	5
	Matières premières	1	1	-	
Classe stérile (industrie)		1	-	1	2
Propriétaires fonciers		2	-	-	(2)
Total		5	2	(2)	7

Tableau 25. **Le tableau économique sous forme de table input-output.**
Source : auteur d'après Pasinetti (1977)

La classe productive produit 5 unités de biens agricoles qui sont réparties de la manière suivante : 2 sont autoconsommées (CI du secteur agricole), 2 sont consommées par

¹⁰⁶ Par exemple, Marx reconnaît cet apport en ces termes : « le système physiocrate est la première conception systématique de la production capitaliste » (cité par Poulon, 2015)).

la classe infertile (CI du secteur industriel) et 1 est consommée par les aristocrates (demande finale puisque ces derniers ne produisent rien).

La classe stérile produit des biens industriels qui comptent pour 2. Non pas parce que seulement deux biens industriels sont produits mais parce que ces biens incorporent 2 unités de biens agricoles qui sont, ici, notre unité de compte. Ces biens industriels sont consommés de la manière suivante : 1 fait son retour au secteur agricole sous forme de CI, l'autre va finir en consommation finale pour les aristocrates. D'un point de vue physique, ce secteur ne crée pas de surplus : il transforme des biens agricoles. Notons que les travailleurs, quel que soit le secteur, sont traités comme des inputs : la quantité de blé qu'il a fallu leur consacrer est considérée comme une nécessité technique du système de production.

Les propriétaires fonciers ne produisent rien, ils consomment. Ils captent la valeur ajoutée du secteur agricole, appelée *produit net* (5 unités agricoles produites – 2 consommées par le secteur agricole – des biens industriels incorporant 1 unité agricole = 2). Le surplus physique, généré par l'agriculture, est capté par cette classe aristocratique par le biais de la rente foncière.

Le surplus s'apprécie donc en termes physiques et provient en dernière instance du secteur agricole. Il est ici de 2 biens agricoles. Cela ne l'empêche pas en pratique de prendre une autre forme finale. En effet, dans notre exemple, la forme est celle d'un bien agricole et d'une certaine quantité de bien industriel (incorporant un bien agricole), tous deux consommés par les propriétaires du sol.

La productivité exclusive de l'agriculture en débat

Cette thèse a pu être jugée péjorativement au motif que les physiocrates considéreraient comme mineur le rôle de l'industrie. La théorie physiocratique serait d'ailleurs tombée en désuétude au motif qu'elle est incapable de penser la Révolution industrielle. Walras considère par exemple que l'hypothèse de stérilité de l'industrie est abusive (Poulon, 2015). Que penser de cette hypothèse de productivité exclusive de l'agriculture ?¹⁰⁷

¹⁰⁷ L'absence de profit est également une limite (Deleplace, 2018) que nous ne discutons pas ici.

L'industrie apparaît jouer un rôle dans la création de surplus par l'agriculture. En effet, la quantité de surplus peut augmenter dès lors que l'efficacité de la production du secteur agricole s'améliore grâce à des terres fertiles mais également du fait de nouvelles techniques culturales...). Or, dans ce cas le secteur industriel n'est pas étranger à ce processus. D'abord, le secteur industriel fournit les biens industriels permettant d'économiser du travail agricole qui représente une certaine quantité de blé. Ensuite, l'industrie réalise elle aussi des gains de productivité. Elle économise du travail de sorte que les biens qu'elle fournit représentent une quantité de blé plus faible qu'auparavant. Là encore, cela fait baisser la quantité de blé entrant dans le secteur agricole. Le secteur industriel participe donc indirectement à l'augmentation du surplus agricole en réduisant la consommation productive du secteur agricole, que cela soit par des économies en salaires versés ou en capital acheté. L'hypothèse de productivité exclusive paraît donc erronée puisque « c'est l'ensemble de l'économie qui est à l'origine de la création du vecteur de surproduit physique » (Deleplace, 2018, p.41).

Cette thèse, défendue notamment par Sraffa (1963) ou encore Cartelier (1991), évacue la question centrale de la nature physique de ce qui est produit. En effet, dans les termes de la thermodynamique¹⁰⁸, les biens agricoles sont de la basse entropie tandis que les biens industriels sont de la haute entropie. Schématiquement, la basse entropie est qualitativement supérieure : elle peut être utilisée par des machines ou un corps humain et dégradée en une forme, physiquement inférieure, inutilisable, la haute entropie¹⁰⁹. Dans une économie fondée sur la biomasse (produits agricoles et forestiers), un seul secteur peut générer une quantité nette de basse entropie : le secteur agricole. Dit autrement, le secteur agricole génère non seulement la basse entropie nécessaire à son fonctionnement, sa reproduction mais également celle nécessaire au fonctionnement du secteur industriel. En fournissant des biens susceptibles de produire des économies de basse entropie, le secteur industriel *contribue* à l'existence du surplus mais ce surplus continue, par définition, *d'apparaître* dans le secteur agricole. Il est donc possible de reconnaître la prééminence du secteur agricole, en tant que secteur énergétique, sans nier le rôle des autres secteurs.

¹⁰⁸ Les lois de la thermodynamique sont postérieures à la formulation de la doctrine physiocratique (Carnot, 1824). Sa mobilisation peut ainsi paraître anachronique. Toutefois, nous nous intéressons ici à la cohérence contemporaine de l'argument physiocratique. Il s'agit d'évaluer si rétrospectivement, à l'aune des connaissances actuelles, l'intuition des physiocrates est fondamentalement fautive.

¹⁰⁹ Pour une définition rigoureuse de ces concepts, nous renvoyons le lecteur au chapitre 2, section 2.1.

En résumé, le surplus, appelé *produit net*, trouve son origine dans le secteur agricole au sens où c'est le seul secteur où la quantité physique d'output est supérieure à celle des inputs. En effet, le secteur industriel ne fait que transformer des matières : par définition, l'output mesuré en blé ne saurait être supérieur à la quantité d'inputs entrante. Pour autant, le rôle du secteur industriel dans l'existence d'un produit net est loin d'être nul : des gains de productivité en son sein mais aussi au sein du secteur agricole (obtenus par l'utilisation de biens industriels) participent incontestablement à l'augmentation du produit net. Dans ce cas, le produit net augmente de manière intensive : une quantité donnée de terres fournit un surplus supérieur. Lorsque ces gains de productivité font défaut, la seule manière d'augmenter le produit net est la méthode extensive, c'est-à-dire la mise en culture de nouvelles terres.

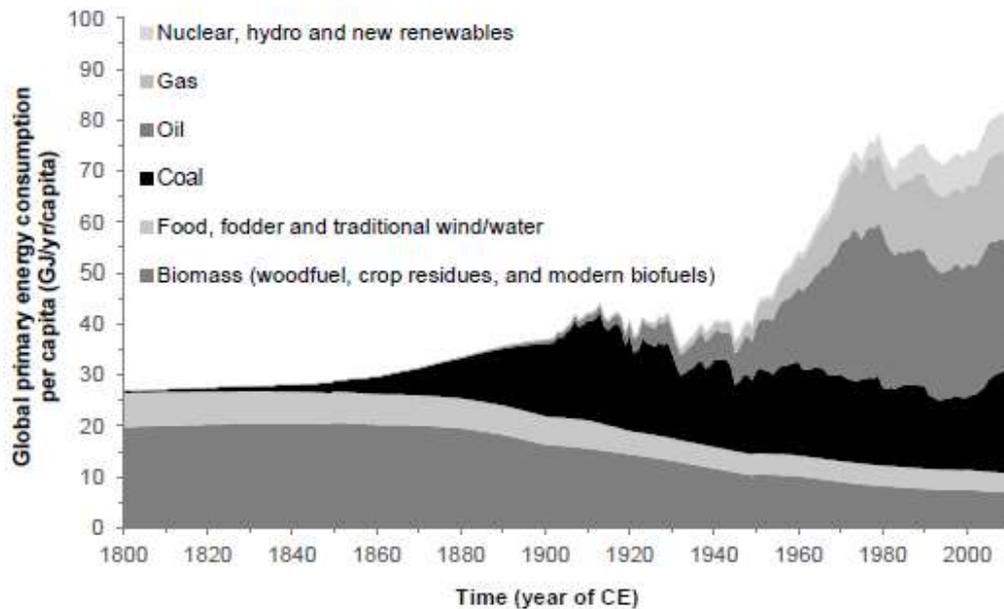
En définitive, la deuxième loi de la thermodynamique, celle de l'entropie, est le maillon qu'il manque aux physiocrates pour défendre pleinement leur conception de la production¹¹⁰. Sans elle, la thèse de la productivité exclusive de l'agriculture ressemble plus à une intuition. Ce ne sera pas le cas des prolongements contemporains, ultérieurs à la découverte des lois de la thermodynamique, que nous allons maintenant présenter.

1.1.2. Les néo-physiocrates : de l'énergie nette au EROI

Les physiocrates écrivent aux alentours de 1750. L'économie qu'ils observent est essentiellement fondée sur la biomasse. L'agriculture constitue le secteur énergétique par excellence puisqu'elle fournit les éléments de basse entropie qui seront dégradés. Progressivement à partir de la Révolution industrielle, les sources énergétiques vont connaître un profond bouleversement : les énergies fossiles vont progressivement s'imposer. Ce changement de métabolisme est bien documenté (voir par exemple Fischer-Kowalski, 1998). D'après Pomeranz (2000), l'Angleterre n'aurait pas pu poursuivre son développement économique sans les « shadow acres » [hectares fantômes] de charbon que renfermait son

¹¹⁰ La première loi de la thermodynamique, celle énoncée par Lavoisier, est insuffisante, pour justifier l'apparition d'un surplus.

sous-sol : la surface forestière aurait été incapable de fournir l'énergie suffisante. La biomasse ne disparaît pas pour autant, c'est son poids relatif qui décroît (voir figure 24).



Le surplus énergétique ne peut donc plus s'apprécier à partir des seules calories alimentaires nettes dégagées par le secteur agricole. Pour preuve, le secteur agricole est aujourd'hui déficitaire d'un point de vue énergétique : là où une calorie investie dans l'agriculture générerait 12,6 calories en 1826 en Angleterre, elle n'en génère plus que 0,64 en 2005 aux États-Unis (Allaire and Daviron, 2017, p.43). Le surplus provient désormais du secteur minier extractif, de sorte que le *produit net* des physiocrates devient l'*énergie nette* (Cleveland, 1999).

A la suite de Hornborg (2014), nous qualifions de néo-physiocrates la communauté scientifique identifiant l'énergie nette¹¹¹ comme un facteur décisif de la dynamique économique. Parmi les représentants de ce courant on peut signaler Charles Hall, ancien

¹¹¹ Ainsi que des concepts dérivés comme le EROI, présentés plus loin. Comme nous le verrons plus en détail au 1.2., ces auteurs ont également pour trait caractéristique d'adhérer à la théorie de la valeur-énergie. Un autre terme permettant de distinguer ce courant est celui de « Biophysical economics ».

professeur à l'université de New York et membre du comité éditorial de la revue *Ecological Economics*, l'écologue Howard Thomas Odum, l'économiste Robert Costanza, ou encore Cutler Cleveland¹¹².

Avant de voir de quelle manière l'énergie nette est déterminante pour le processus de croissance (1.2.), nous présentons plus en détail ce concept et la manière dont il s'articule avec le taux de retour énergétique (TRE ou EROI en anglais pour Energy Return on Investment).

Energie nette et EROI : définitions et interprétations

L'énergie nette représente l'énergie disponible pour les secteurs non énergétiques pour fonctionner. Celle-ci apparaît dès lors que le secteur énergétique parvient à produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ainsi l'énergie nette se calcule en faisant la différence entre la totalité de l'énergie produite et celle que le secteur énergétique a lui-même consommé :

Energie nette = Energie brute produite – énergie consommée par le secteur énergétique

Le concept d'énergie nette est régulièrement associé voire substitué par celui de EROI. Ce ratio sans unité a été initialement présenté par Charles Hall (1972). Il rapporte la quantité d'énergie totale à l'énergie entrante nécessaire au système énergétique pour la produire. En d'autres termes, plutôt que de soustraire l'input à l'output, on divise ici l'output par l'input.

$$EROI = \frac{\text{énergie brute produite}}{\text{énergie investie pour récupérer l'énergie brute produite}} \quad (1)$$

EROI et l'énergie nette sont liés comme en témoigne la formulation suivante :

$$\text{Energie nette} = \text{énergie brute produite} * \left(1 - \frac{1}{EROI}\right) \quad (2)$$

¹¹² Le titre d'un article de Cleveland est évocateur de la filiation que ces auteurs entretiennent avec les physiocrates : *Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics* (Cleveland, 1999).

L'énergie nette apparaît comme une fonction croissante du EROI. A quantité d'énergie brute produite donnée, lorsque le EROI s'améliore, l'énergie nette croît donc la possibilité de développer des activités non énergétiques.

Le EROI est donc une variable *intensive*. Il montre, dans le cadre d'un système énergétique donné, les conséquences pour les secteurs non énergétiques d'un durcissement (ou réciproquement, un allègement) de l'accessibilité d'une ressource énergétique. Cette accessibilité dépend à la fois des contraintes physiques (les sources fossiles tendent à être de plus en plus difficiles à extraire à mesure qu'elles s'épuisent) et des progrès technologiques (qui permettent, dans une certaine mesure, de repousser ces contraintes). Une baisse du EROI peut ainsi s'analyser comme une baisse de l'accessibilité des ressources énergétiques pour un état donné de la technologie.

La relation entre l'énergie nette et le EROI n'est pas linéaire. En effet, l'évolution du EROI n'a pas les mêmes effets sur la société selon le niveau en valeur absolue où l'on se situe. Dans le cas où le EROI passe de 100 :1 (100kWh d'énergie finale produit grâce à 1kWh d'énergie finale consommée par le secteur énergétique) à 50 :1, l'énergie nette passe de 99% à 98% du total. Dans cet exemple, une division par 2 du EROI conduit à une baisse de la part de l'énergie nette dans l'énergie totale de près de 1%. En revanche, lorsque le EROI passe de 10 :1 à 5 :1, une nouvelle division par 2, la part de l'énergie nette chute de 90% à 80% ; une baisse de 11,2%. En d'autres termes, plus la valeur du EROI est initialement faible, plus sa dégradation est dommageable en termes d'énergie nette, le secteur énergétique tendant à cannibaliser l'énergie produite. On parle de *falaise de l'énergie* (*energy cliff* en anglais) associée aux faibles niveaux de EROI.

Mesurer le EROI

Le calcul du EROI est sensible aux frontières que le chercheur retient du secteur énergétique. Schématiquement, plus le secteur énergétique est large, plus, à énergie brute produite donnée, le EROI mesuré sera faible. Par conséquent, pour être comparables les valeurs empiriques de EROI obtenues doivent retenir les mêmes frontières (Castro et Capellán-Pérez, 2020). Par exemple, le **EROI_{mm}** pour *mine mouth* (en sortie de puit) est la

définition la plus restrictive du secteur énergétique. Ce dernier se résume alors aux industries extractives, celles qui fournissent le pétrole brut, par exemple. Dans l'exemple donné en figure 25, le secteur énergétique extrait 100Mégajoules (MJ) de l'environnement qu'il met à disposition de la société. Pour s'acquitter de cette tâche il utilise 4MJ sous forme de produits raffinés et 1MJ sous forme d'équipement (énergie incorporée). Le $EROI_{mm}$ est alors de $100/5 = 20$.

Le $EROI_{pou}$ pour *point of use* (lieu d'utilisation du consommateur final) adopte une vision plus large puisqu'ici est pris en compte, non seulement le secteur extractif mais également la consommation des activités nécessaires pour raffiner et acheminer l'énergie jusqu'au consommateur final. Dans notre exemple, le secteur énergétique met 92MJ à disposition de la société sous forme de produits raffinés. En effet sur les 100MJ d'énergie brute, 8MJ ont été consommé par le secteur énergétique. Pour mettre à disposition ces 92MJ, le secteur énergétique a nécessité non seulement 8MJ d'énergie directe (4+4) mais également 6MJ sous forme de biens d'équipements (1+5). Par conséquent le $EROI_{pou}$ est de $92/14 = 6,1$.

Enfin, le $EROI_{ext}$ pour *extended* (étendu) rajoute à la définition précédente l'ensemble de l'énergie incorporé dans les infrastructures et biens nécessaires pour utiliser l'énergie comme les ponts, les autoroutes, les véhicules. Dans notre exemple, ces biens incorporent 10MJ, on les ajoute donc à l'input du secteur énergétique. Ainsi le $EROI_{ext}$ est de $92/24 = 3,8$.

Dans les trois cas, l'énergie entrante ne se résume pas à la seule consommation directe du secteur mais intègre également l'énergie incorporée dans les biens capitaux (consommation indirecte).

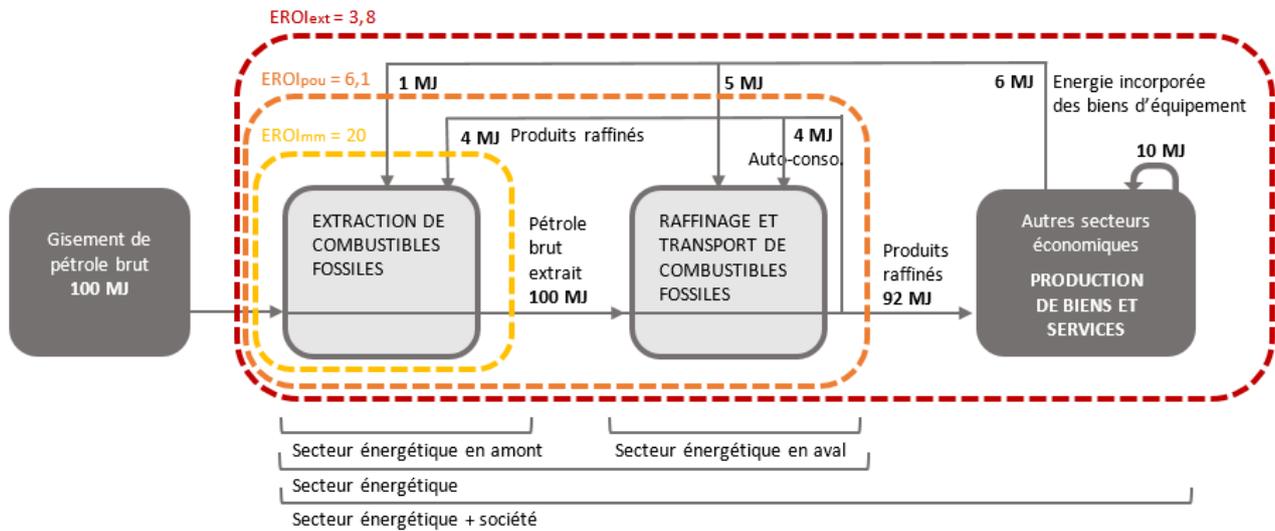


Figure 25. **Frontières de différents EROI associés à l'exemple de l'extraction et du raffinage de 100 MJ de pétrole brut.**

Source : auteur.

L'autre source de divergence des résultats est le stade de l'énergie retenu. Trois stades sont communément distingués : le stade primaire (énergie brute), le stade final (énergie achetée par les consommateurs finaux) et le stade utile (l'énergie mesurée en sortie de machines). L'énergie finale paraît a priori la plus intéressante puisque c'est l'énergie qui est consommée par les utilisateurs finaux. Les évaluations récentes de Brockway et al. (2019), par exemple, se font à ce stade. Ce $EROI_{final}$ est estimé à 6 :1 (6 kWh d'énergie finale pour 1 kWh investi dans le secteur énergétique), en 2010, en déclin de 10% par rapport à 1995. Pour ces auteurs, il est "credible that declining EROI ratios of fossil fuels will lead to constraints on the energy available to society in the not-so-distant future, and that these constraints might unfold in rapid and unexpected ways" (Brockway et al., 2019, p.9).

Cependant, d'autres travaux montrent l'intérêt de raisonner à un stade utile. Pour Jean-Claude Debeir et al. (2013), le passage du stade final au stade utile permet d'intégrer la question de l'efficacité de la conversion de l'énergie par les appareils. Or, cette dernière participe incontestablement à la quantité de surplus disponible : 1 litre de pétrole dans un moteur qui fait du 15L au 100km fournit moins de services énergétiques que le même litre dans un moteur qui fait du 5L au 100km. Si l'on apprécie l'énergie nette au stade final, elle est

la même dans les deux situations. En revanche, si l'énergie nette est mesurée au stade utile, elle sera trois fois supérieure dans le second cas.

Pour illustrer le propos (figure 26), Debeir et al. (2013) prennent l'exemple d'une économie agraire où l'énergie (primaire, noté P) mobilisée est d'origine solaire. Celle-ci est captée par l'intermédiaire des productions végétales (énergie finale, F) cultivées. Puis ces aliments sont consommés par les humains et les animaux, lesquels permettent une production de mouvement musculaire (énergie utile, U). Enfin, ce mouvement musculaire est employé pour produire des denrées agricoles (consommation productive, U_e) ou bien d'autres productions non agricoles (énergie nette ou surplus, noté U_{ne}). Le surplus s'apparente, comme chez les physiocrates, à l'énergie (au stade utile) non consommée par le secteur agricole (notée **U_{ne}**, pour énergie Utile pour des usages non énergétiques).

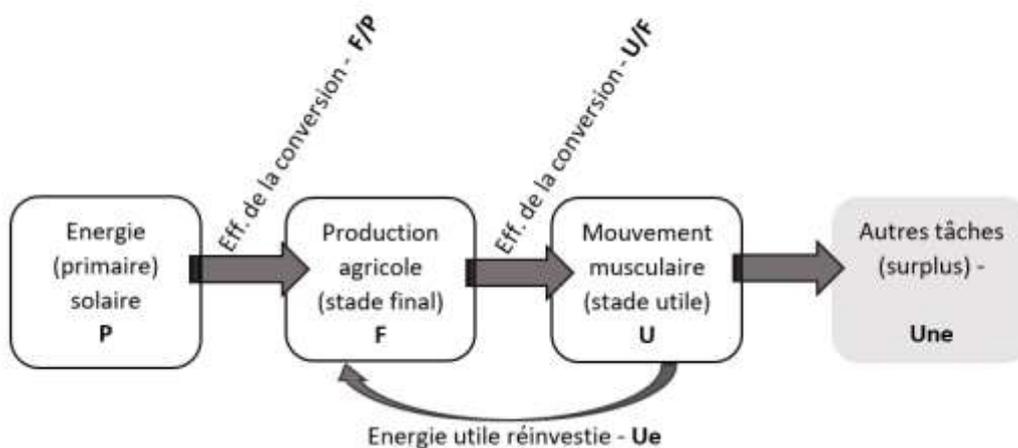


Figure 26. **Représentation du surplus au stade utile de l'énergie.**

Source : auteur à partir de Debeir et al. p.51-52.

L'intérêt de cette reformulation du surplus au stade utile est qu'elle permet de mettre en évidence deux paramètres clefs dans son existence :

- **L'efficacité énergétique** (notée U/F) désigne l'efficacité avec laquelle les convertisseurs animaux et humains transforment une quantité d'énergie finale (F) en une quantité totale d'énergie utile (U). Plus le processus est efficace, moins il y aura de pertes et U se rapprochera de la valeur de F, l'efficacité maximale étant 100% (aucune perte de conversion). Les anglophones parlent de *final to useful efficiency* qui peut être

rigoureusement mesurée pour chaque secteur à partir du ratio $\frac{U}{F}$. Toutes choses égales par ailleurs, le surplus est une fonction positive de l'amélioration de l'efficacité.

- **L'accessibilité de l'énergie finale** qui peut se mesurer à partir de la quantité de ressources qu'il faut consacrer pour extraire et mettre à disposition l'énergie au reste de la société. Cette contrainte peut être saisie en examinant la part du mouvement musculaire qui doit être engagée dans le secteur énergétique (notée **Ue** pour énergie Utile énergétique). Mais cette dépense n'a de sens que rapportée à l'énergie finale qu'on parvient à extraire (F). Ainsi l'accessibilité se mesure à partir du ratio $\frac{F}{Ue}$. Toutes choses égales par ailleurs, plus ce ratio augmente, plus le secteur énergétique tend à capter une part importante de l'énergie utile produite, plus le surplus va diminuer.

Le EROI au stade utile (EROI_{useful}) s'écrit donc $\frac{U}{Ue}$ et, en repartant de l'équation 2, on peut exprimer le surplus (**Une**) de cette manière :

$$Une = U * \left(1 - \frac{1}{\frac{U}{Ue}}\right) \quad (3)$$

Or, l'énergie utile (U) est une fonction de l'efficacité énergétique ($\frac{U}{F}$) : $U = F * \frac{U}{F}$

On peut donc écrire :

$$Une = F * \frac{U}{F} * \left(1 - \frac{1}{\frac{U}{Ue}}\right) \quad (4)$$

En simplifiant, on obtient :

$$Une = F * \left(\frac{U}{F} - \frac{Ue}{F}\right) \quad (5)$$

Le surplus énergétique apprécié au stade utile (« l'énergie utile nette ») est donc fonction de trois variables :

- Une variable extensive, la quantité d'énergie finale consommée (F),
- Deux variables intensives : l'efficacité énergétique ($\frac{U}{F}$) et l'accessibilité des ressources ($\frac{F}{Ue}$ appréciée ici à partir de son inverse, $\frac{Ue}{F}$).

Pour qu'il existe un surplus (énergie utile nette), l'efficacité énergétique doit être plus forte que l'inverse de l'accessibilité. A quantité d'énergie finale donnée, plus la différence entre $\frac{U}{F}$ et $\frac{Ue}{F}$ est importante, plus le surplus énergétique est élevé. Sur cette base, il est possible d'identifier un seuil minimal d'accessibilité des ressources au-delà duquel le surplus disparaît.

Tendances passées et conséquences sur le développement économique

Le EROI au stade utile ($\frac{U}{Ue}$) reste peu mesuré du fait du manque de données. En effet, si l'Agence Internationale de l'énergie produit bien des séries d'énergie finale depuis au moins 1971, les bases de données sur l'exergie utile sont encore en construction (une équipe de l'université de Leeds ainsi que du MIT de Lisbonne y travaillent). Cela n'empêche pas de mobiliser ces concepts dans des travaux empiriques. Par exemple, Court (2019) parvient à estimer empiriquement le niveau à partir duquel l'accessibilité des ressources (F/Ue) entraîne la disparition du surplus. En effet, dans la mesure où le surplus suppose que l'efficacité énergétique soit supérieure à l'inverse de l'accessibilité (Ue/F) et que, pour certains pays, on dispose de séries d'efficacité énergétique (U/F), il est possible d'en déduire une accessibilité minimale des ressources énergétiques (un Ue/F maximum à ne pas dépasser). Comme l'accessibilité se mesure à partir de F/Ue, on peut en déduire une valeur minimale de F/Ue en dessous de laquelle, pour un pays donné, le surplus disparaîtrait¹¹³.

D'après les données observées, le seuil minimal d'accessibilité des ressources observé a été réduit grâce aux progrès de l'efficacité énergétique. En effet, sur la période 1950-2010, le Ue/F minimal observé de 15 pays européens est plutôt à la baisse (voir figure 27). Mis à part

¹¹³ Si théoriquement un EROI>1 suffit pour avoir un surplus, certains travaux tentent d'estimer le EROI minimum permettant à nos sociétés complexe d'exister. Les fourchettes varient entre 5:1 et 14:1 pour Hall et al. (2009) et 15 à 25:1 d'après Lambert et al. (2014).

la France et le Luxembourg, les pays connaissent tous une baisse de cette valeur. Dit autrement, les progrès de l'efficacité énergétique sont tels que l'accessibilité minimale pour avoir un surplus est abaissée. Par exemple, dans le cas de l'Irlande, il faut qu'un kWh d'énergie utile investi dans le système énergétique en 1960 génère à minima 9,5kWh d'énergie finale. Si le système n'avait généré que 9 kWh d'énergie finale, il n'y aurait pas eu de surplus disponible pour les autres activités non énergétiques. En 2010, le chiffre n'est plus que de 7kWh. Ainsi, dans le cas où l'accessibilité des ressources énergétiques soit restée constante, le surplus irlandais a progressé. Pour les Etats-Unis, l'Autriche, le Japon et le Royaume-Uni, le raisonnement reste identique même si le stade de l'énergie primaire, notée P. L'efficacité énergétique s'apprécie à partir du ratio U/P et l'accessibilité par P/Ue. Les résultats sont proches de ceux observés pour les pays européens : le seuil minimal d'accessibilité des ressources énergétiques a considérablement diminué tout au long du XXe siècle, passant d'environ 22 :1 (22 kWh d'énergie primaire générés à partir de 1kWh d'énergie utile) en 1900 à 5 :1 en 2010.

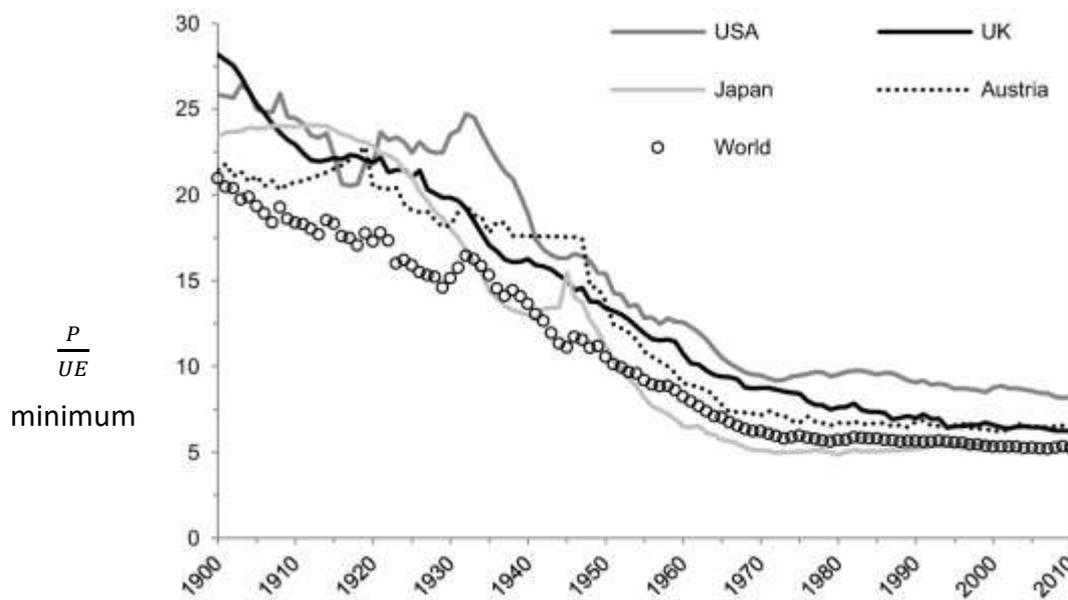


Figure 27. **Evolution du ratio d'accessibilité minimal (P/Ue) permettant d'obtenir un surplus (1900-2010).**

Source : Court, 2019, p.11

Afin de voir si les pays s'approchent ou non d'une situation où le surplus disparaît, il faut être capable d'estimer la valeur réelle de l'accessibilité des ressources (F/U_e). Les données sur l'accessibilité réelle au stade utile ne sont pas disponibles, en particulier c'est l'exergie utile consommée par le secteur énergétique qui fait défaut. Une simplification consiste à raisonner à partir du stade final (F/F_e au lieu de F/U_e). A partir de cet indicateur, les tendances historiques montrent une baisse de l'accessibilité réelle des différentes énergies fossiles à l'exception du charbon (figure 28).

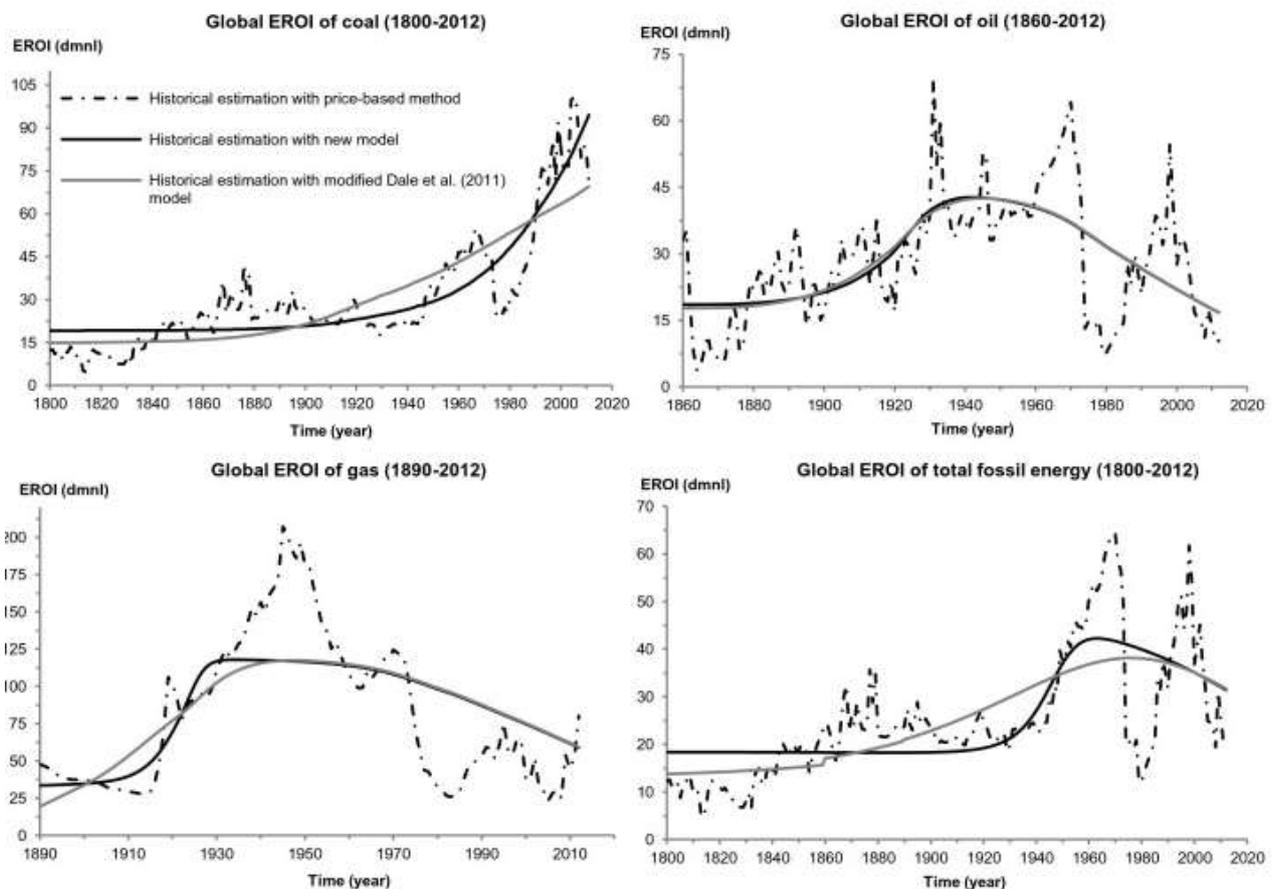


Figure 28. **Estimations du EROI global du charbon, du gaz, du pétrole et de l'ensemble des énergies fossiles.**

Source : Court et Fizaine, (2017, p.152)

L'efficacité énergétique a donc plus que compensé cette baisse, du moins pendant la période des trente glorieuses. Pour la plupart des pays présentés¹¹⁴, la période ouverte depuis 1980 se caractérise à l'inverse par un ralentissement des progrès de l'efficacité énergétique, ce qui s'accompagne d'une quasi-stagnation du seuil minimal d'accessibilité. Combiné à la baisse de l'accessibilité réelle des ressources énergétiques, le surplus en énergie utile tendrait à diminuer (figure 29).

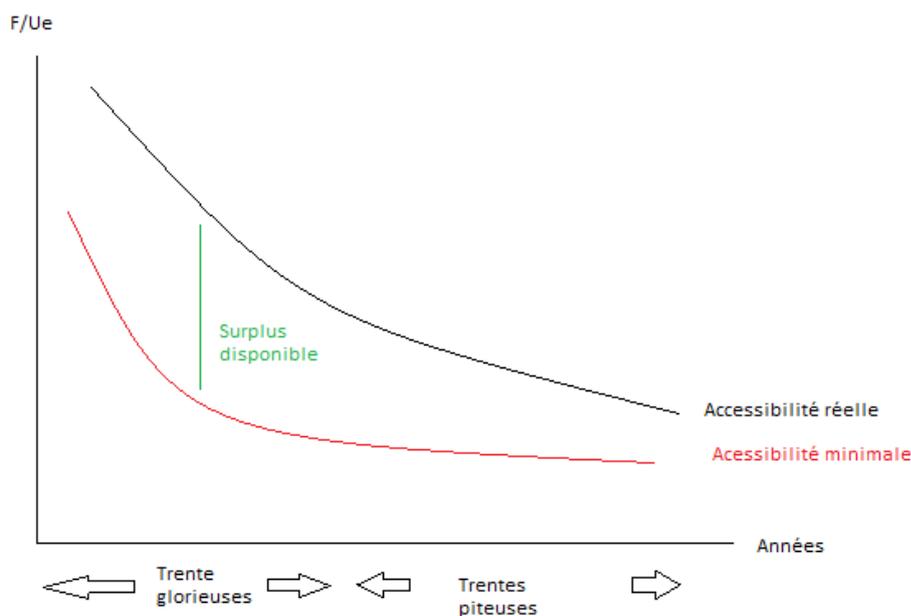


Figure 29. **Evolution du surplus et accessibilité de l'énergie.**
Source : auteur.

D'après Court, cette diminution du surplus énergétique depuis la fin des trente glorieuses serait responsable des rythmes de croissance économique plus faibles connus par les pays développés :

« Improvements in en/exergy conversion efficiency between the 1940s and the 1970s compensated for fossil energy system decreases in en/exergy surpluses, and allowed the global economy to grow at 3.0% per year between 1950 and 1970. [The fact that] that greater efficiencies in en/exergy conversion have been harder to get since the mid-1970s could

¹¹⁴ En Italie, Autriche et Allemagne, ce ralentissement semble opérer dès les années 60. La seule contre-tendance est le cas du Luxembourg qui connaît une augmentation de son seuil d'accessibilité depuis 1960, donc un recul en matière d'efficacité énergétique.

*account for this global economic slowdown »
(Court, 2019, p.11).*

Conclusion de la section 1.1.

Pour le courant physiocratique et les auteurs qui le prolongent, le surplus social s'apprécie avant tout en termes physiques puisqu'il consiste en l'ensemble de l'énergie nette, celle disponible pour des usages non énergétiques. Plus ce surplus devient conséquent et plus les activités sociales peuvent se complexifier et se développer. Si, historiquement, les progrès de l'efficacité ont permis d'augmenter de manière conséquente le surplus disponible, leur ralentissement depuis 1970, combiné à la diminution de l'accessibilité pour trois des quatre énergies fossiles, tendent à stabiliser voire faire diminuer le surplus disponible. « The decline in EROI among major fossil fuels suggests that in the race between technological advances and depletion, depletion is winning » résume Hall et al. (2014). Or, si l'on s'inscrit dans ces approches, il paraît raisonnable de formuler l'hypothèse d'un lien entre surplus énergétique (le « vrai » surplus) et le surplus monétaire (le PIB). En effet, sans croissance du surplus, il n'est pas possible de développer des activités supplémentaires, notamment les activités productives comptées monétairement :

*« If we try to pursue growth by using sources of energy of lower EROI,
perhaps by transitioning to unconventional fossil fuels, long-term economic
growth will become harder to achieve and come at an increasingly higher
financial, energetic and environmental cost »
(Murphy, 2014, p.1)*

C'est cette relation, évoquée à la fois par Court et Murphy, que nous allons maintenant préciser.

1.2. De l'énergie nette au PIB : l'analyse de la croissance économique

Quel lien entretiennent l'énergie nette et le PIB ? D'un côté, l'énergie nette est le surplus apprécié en unité d'énergie, de l'autre, le PIB est le surplus exprimé en monnaie. Répondre à cette question revient à préciser la manière dont les physiocrates et

néophysiocrates articulent dimension physique et dimension monétaire de la production. Dans la littérature, nous identifions deux manières de procéder. La première consiste à mobiliser un canal de transmission du EROI vers le prix de l'énergie et la croissance. La présentation de ce canal des prix de l'énergie et ses fondements empiriques font l'objet de la première sous-section (1.2.1). La seconde mobilise une théorie des prix, la théorie de la valeur-énergie : les biens et les services valent au prorata de la quantité d'énergie qu'ils incorporent, de sorte que la différence entre l'output et l'input, mesurée en énergie, est équivalente à celle mesurée en monnaie (1.2.2.). Dans les deux cas, la diminution de l'énergie nette cause un ralentissement de la croissance du PIB.

1.2.1. Le canal du prix de l'énergie : quand le EROI ralentit la croissance

Dans la section précédente, nous avons vu que le surplus pouvait s'analyser comme la résultante de deux variables : une variable extensive (les quantités d'énergie consommées) et une variable intensive, le EROI, qui conditionne la répartition de cette énergie entre secteurs énergétique et non énergétique. Cet EROI permet d'apprécier l'interaction entre contraintes naturelles et progrès technologiques quant à l'accès et à la mise à disposition de l'énergie. Aussi le EROI est une variable clef dans les travaux néo-physiocratiques consacrés à la croissance.

Le canal de transmission mobilisé par ces auteurs peut être qualifié de canal des prix et relie le EROI à la croissance économique. L'idée sous-jacente étant que les contraintes d'accessibilité mesurées par le EROI pèseraient sur le prix de l'énergie, augmentation qui, en retour, viendrait ralentir le processus de croissance. Par exemple, Murphy et Hall (2011) proposent un modèle théorique de croissance simplifié. Lorsque le EROI est élevé, le secteur énergétique dégage un surplus important, le prix de l'énergie est faible, les secteurs « dissipatifs »¹¹⁵ peuvent se développer sur cette base, ce qui rend possible une croissance économique soutenue. A l'inverse, lorsque l'EROI diminue, le secteur énergétique tend à nécessiter plus d'énergie qu'auparavant pour fournir la même énergie nette. Des ressources (énergie mais aussi travail et capital) doivent être réorientées vers le secteur

¹¹⁵ Le caractère dissipatif renvoie à la dimension physique : ces secteurs ne font que dégrader qualitativement l'énergie mise à disposition par le secteur énergétique. Ces expressions désignent les secteurs non énergétiques.

énergétique pour fournir un même montant d'énergie nette. De ce fait, le prix relatif de l'énergie grimpe et la dynamique économique se trouve enrayée puisque les secteurs dissipatifs voient leurs coûts de production augmenter.

Sur cette base, les auteurs distinguent deux régimes de croissance correspondant à deux moments historiques : l'ère pré-pic (avant pic du pétrole) et l'ère du pic. La différence entre les deux régimes tient au niveau de EROI des ressources énergétiques. Alors que, dans le régime pré-pic, l'énergie supplémentaire nécessaire à la croissance peut être extraite à un prix qui reste faible, ce qui soutient la croissance, dans le régime du pic, les nouvelles ressources coûtent plus cher, ce qui vient peser négativement sur la croissance.

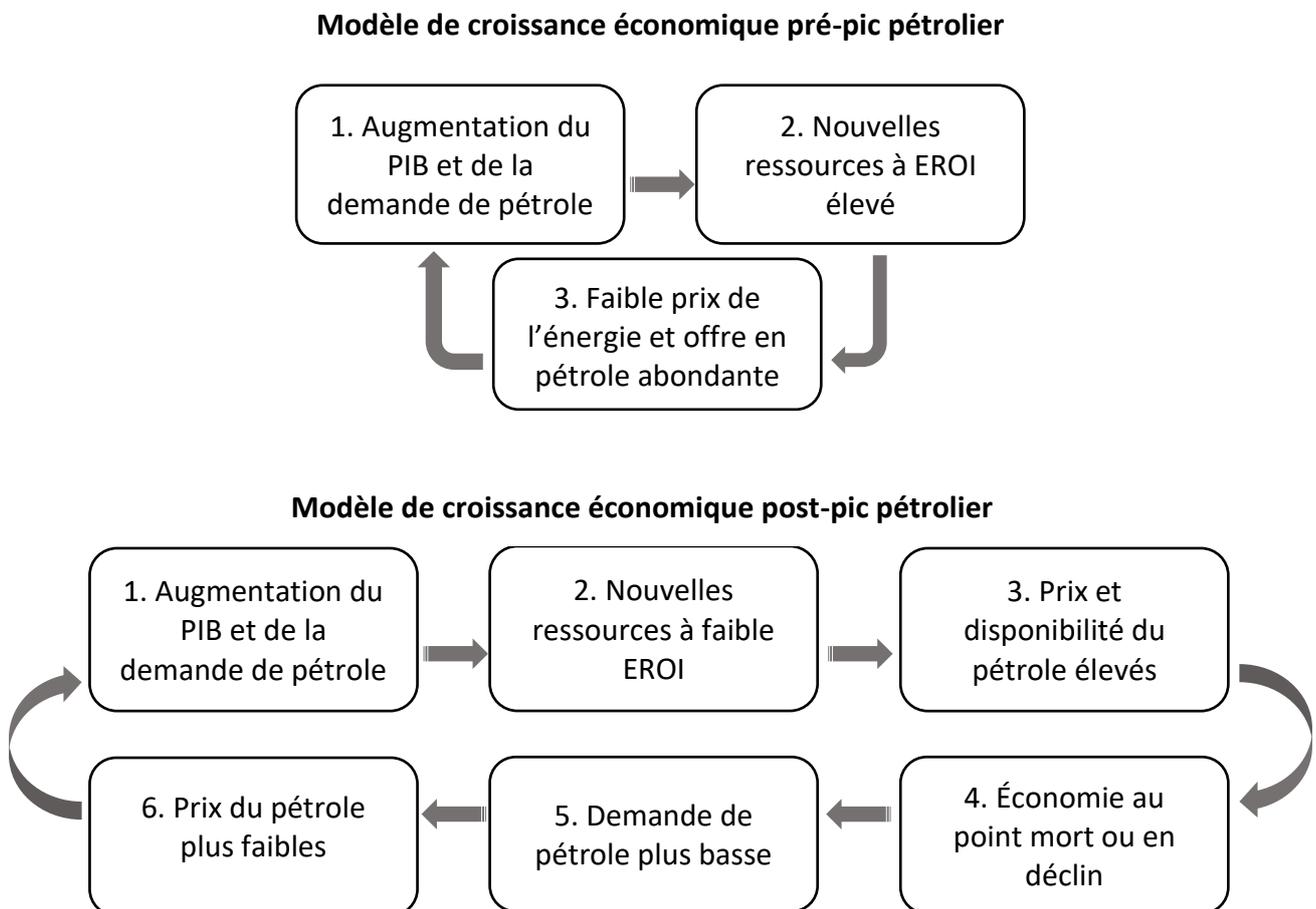


Figure 30. **Le modèle de croissance économique, du pré-pic pétrolier au post-pic pétrolier.**
Source : auteur à partir de Hall et Murphy (2011, p.70)

D'autres modèles mobilisent ces mécanismes comme par exemple celui de Jackson et Jackson (2021). Conformément à cette représentation, les néo-physiocrates utilisent deux séries de preuves économétriques pour étayer leur propos : le lien statistique entre niveau du EROI et prix de l'énergie, d'une part, celui plus connu entre prix de l'énergie et croissance économique, d'autre part.

Le EROI comme déterminant du prix de l'énergie

Cette première relation a été initialement explorée dans un article de King et Hall en 2011 (King et Hall, 2011). L'hypothèse des deux auteurs est que « the biophysical characteristics of producing available energy, namely the EROI of the energy production process, dictate a limit on the price and profit margin for a firm to engage in energy production and exploitation » (King et Hall, 2011, p.1813). Dit autrement, une dégradation du EROI affecterait la rentabilité des firmes du secteur énergétique qui, pour pouvoir continuer à opérer, aurait besoin d'un prix de production¹¹⁶ supérieur.

King et Hall montrent par une équation mathématique comment les différents termes clefs tels que le EROI, le MROI (Monetary Return on Investment) et le prix de production sont liés. La formule du EROI de l'équation 1 (cf.1.1.2.) est ainsi reconstruite en intégrant ces différentes variables. Alors que l'énergie sortante est une donnée relativement aisée à trouver (production énergétique en unités physiques), l'énergie entrante l'est moins. En effet, cette énergie entrante est à la fois directe (connue) et indirecte (à calculer). Pour Hall, cette énergie entrante (E_{in}) peut s'analyser comme le produit de l'argent investi par le secteur énergétique pour produire (M) multiplié par l'intensité énergétique des différents biens achetés par le secteur énergétique (EI) :

$$E_{in} = M * EI \quad (6)$$

Ensuite, cette somme investie dans le secteur énergétique (M) est le coût de production du secteur énergétique. Ce coût de production peut s'obtenir en divisant le chiffre d'affaires par le taux de profit du secteur, appelé MROI pour *Monetary Return on Investment*.

¹¹⁶ Ce prix se définit comme le prix de vente permettant au producteur de toucher un profit « normal ».

De plus, le chiffre d'affaires du secteur énergétique n'est autre que la quantité d'énergie produit (E_{out}) multiplié par le prix de l'énergie P . On peut donc exprimer M de la sorte :

$$M = \frac{P}{MROI} * E_{out} \quad (8)$$

En réarrangeant l'équation 8, on obtient :

$$EROI = \frac{MROI}{P * EI} \quad (9)$$

De sorte que :

$$P = \frac{MROI}{EROI * EI} \quad (10)$$

Le prix de l'énergie peut ainsi s'analyser comme le produit de trois variables, le EROI, (l'accessibilité physique mesuré en unité physiques), le MROI, la rentabilité économique du secteur énergétique, et l'intensité énergétique des biens et services mobilisés par le secteur énergétique. D'après cette équation, toutes choses égales par ailleurs, il existerait une relation inverse entre le EROI et le prix de l'énergie. A intensité énergétique et taux de rentabilité donnés, une dégradation du EROI (moins d'accessibilité des ressources) se traduirait par un prix de l'énergie plus élevé.

King et Hall en restent au stade de l'exploration empirique¹¹⁷. Le travail de Heun et de Wit va plus loin en proposant une évaluation économétrique de la relation entre ces deux variables. Heun et de Wit (2012) identifient différents canaux par lesquels prix de l'énergie et EROI sont reliés. Ces interactions sont de deux ordres. D'abord, les facilités et difficultés d'accessibilité de la ressource énergétique se traduisent par un besoin plus ou moins important en input énergétique pour le secteur énergétique (baisse du EROI), ce qui pèse sur ses coûts de production. En fonction du *mark-up*, le taux de marge cible, ces modifications

¹¹⁷ Dans l'article, les auteurs utilisent ensuite des valeurs historiques de EROI, MROI ainsi que d'intensité énergétique pour explorer les prix de l'énergie obtenus.

viennent renchérir le prix de l'énergie. Sur la base de ce raisonnement, il est possible de faire l'hypothèse que le prix de l'énergie est négativement influencé par le EROI.

Cependant, il existe aussi une relation de causalité qui va des prix vers le EROI. En effet, un climat de prix élevé pousse le secteur énergétique à augmenter la prospection, d'où une hausse de l'énergie investie dans le système énergétique. Dans la mesure où la production d'énergie finale ne suit pas immédiatement, cela se traduit par un déclin, temporaire, du EROI. Dans ce cas, c'est le prix de l'énergie qui influence négativement le EROI.

Dans les deux cas, ces raisonnements conduisent à faire l'hypothèse d'une relation inverse entre EROI et prix de l'énergie, laquelle serait médiée par la profitabilité du secteur énergétique (le mark-up).

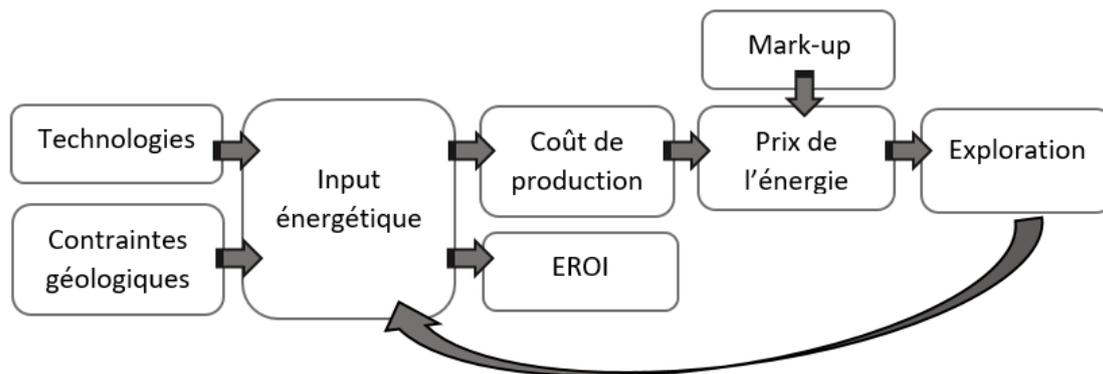


Figure 31. **Les relations entre EROI et prix de l'énergie.**
Source : auteur à partir de Heun et de Wit (2012)

A partir de ces relations théoriquement identifiées, Heun et de Wit mènent un travail statistique. Ils modélisent la relation entre le EROI et le prix de l'énergie (p) à partir de séries de EROI de pétrole brut US et de prix des producteurs de pétrole nord-américain sur la période 1954-1996. Quatre modèles statistiques sont testés, chacun d'eux utilisant un estimateur non linéaire (tableau 26). Ces quatre modèles se distinguent en croisant deux critères. Le premier critère est le fait que le modèle autorise ou non un prix de l'énergie de zéro lorsque le EROI est élevé (forte accessibilité). Pour interdire un tel niveau de prix, il est possible d'ajouter un paramètre c (une constante). Le second critère est le fait d'utiliser comme forme fonctionnelle

une loi de puissance ou une exponentielle, deux modalités possibles pour décrire une relation non linéaire¹¹⁸.

Prix de production de zéro est possible quand EROI élevé				
	Oui	R ²	Non	R ²
Loi de puissance	$p = aEROI^{-b}$ (1)	0,811	$p = aEROI^{-b} + c$ (4)	0,849
Exponentielle	$p = a^{-b EROI}$ (3)	0,737	$p = ae^{-b EROI} + c$ (2)	0,848

Tableau 26. **Modèles estimés pour régression non linéaire du prix du pétrole par rapport au EROI.**
Source auteur à partir de Heun et De Wit (2012)

Pour tous les modèles (numérotés entre parenthèses dans le tableau 26), les paramètres sont significatifs ($p < 0,01$) mis à part le paramètre a pour le modèle 2 ($p < 0,05$) et le modèle 4 ($p > 0,05$), ce qui conduit à écarter ce dernier modèle. Parmi les trois modèles restants, le modèle 2 est retenu car il est celui assurant la meilleure prédictibilité du prix (R^2 0,84). La relation obtenue entre le prix de l'énergie et le EROI correspond aux hypothèses, elle est non linéaire et décroissante et prend la forme suivante :

$$p = 466,6e^{-0,355EROI} + 12,72$$

Avec p le prix du pétrole en dollars de 2010

Un EROI de 7,5 environ donne un prix de production (incluant le mark-up du producteur) autour de 50\$ (en \$ de 2010) tandis qu'un EROI autour de 17,5 conduit à un prix de production autour de 15\$. La non-linéarité de la relation observée conduit à l'identification de seuil à partir duquel l'élasticité du prix au EROI augmente considérablement : « Lorsque le EROI descend en dessous de 10, d'importants mouvements dans les prix du pétrole sont observés » (Heun et De Wit, 2012, p.154).

¹¹⁸ Théoriquement cette relation non linéaire peut se voir comme une traduction, dans le monde monétaire, du phénomène de « falaise de l'énergie présenté au 1.1.2.

L'objectif initial de l'étude de la relation entre le EROI et le prix de l'énergie est de comprendre par quel canal les éléments du monde physique (la raréfaction relative) tendent à impacter le monde monétaire. Cela suppose d'avoir un indicateur qui soit véritablement physique. Cependant, cela n'est le cas du EROI, ou du moins de certaines estimations du EROI. En effet, l'équation 9 peut être utilisée comme méthode pour estimer le niveau de EROI (Court et Fizaine, 2017). Dans ce cas, les valeurs du EROI obtenues dépendent par construction des prix de l'énergie. Utiliser les séries de EROI résultant de cette méthodologie pour ensuite mesurer l'impact du EROI conduit à un raisonnement circulaire.

La relation entre les prix de l'énergie et la croissance économique

La seconde partie de la démonstration consiste à lier le prix de l'énergie à la dynamique économique. L'attention pour cette relation a été exacerbée par le choc pétrolier de 1973-1974. D'après Hamilton, 90% des récessions états-uniennes ont été précédées par une hausse significative du prix du pétrole (Hamilton, 2011). L'effet des prix de l'énergie seraient donc conséquent.

D'après Lutz (2008), le principal canal de diffusion du prix de l'énergie vers le PIB est la demande : « most US firms perceive energy price shocks as shocks to the demand for their products rather than shocks to the cost of producing these products » (Lutz, 2008, p.880). Dans le cas du pétrole, si on s'intéresse à la consommation des ménages, ce canal de la demande peut être décomposé en plusieurs effets :

- *L'effet revenu discrétionnaire* : dans la mesure où l'énergie est faiblement substituable, l'augmentation du budget alloué à l'énergie se traduit par une compression du revenu disponible pour les autres dépenses qui sont ainsi réduites. Cet effet sera d'autant plus fort que la consommation d'énergie est inélastique. Il reste toutefois borné par le poids des dépenses énergétiques dans le revenu.
- *L'effet incertitude* : l'augmentation du prix de l'énergie crée une incertitude et conduit les consommateurs à reporter certains achats, principalement les biens durables (élasticité prix de -0,47) et, de manière plus marquée, ceux en lien avec l'énergie. Les automobiles, par exemple, ont une élasticité prix importante de -0,84 : quand le prix

de l'énergie augmente de 10%, les achats de véhicules sont réduits de 8,4%. Cet effet s'accompagne également d'une augmentation de l'épargne de précaution.

- *L'effet sur les coûts de fonctionnement* : dans ce cas, les consommateurs préfèrent utiliser des biens moins intensifs en énergie dès que cela est possible. Par exemple, l'usage d'une petite voiture plutôt qu'une grosse voiture. Cela ne se traduit pas par une baisse du nombre de voitures vendues mais, étant donné que les petites voitures valent moins chères, il y a bien diminution du PIB.

A cela peuvent s'ajouter des effets indirects qui peuvent être plus forts que les effets directs précités. En effet, en présence d'imperfections sur les marchés du travail et du capital, les baisses de demande identifiées préalablement, et les réallocations de demande entre secteurs, peuvent se traduire par des licenciements qui vont amplifier la baisse de la demande. Par exemple, le capital va délaisser la production automobile, de même de l'emploi qui sera réduit (Davis et Haltiwanger, 2001 ; Lee, Ni et Ratti, 1995)

Au-delà de la consommation, la hausse des prix de l'énergie est susceptible d'affecter l'investissement. Tout d'abord, la réduction de la consommation des ménages mise en évidence va venir affecter l'investissement des entreprises selon un canal proprement keynésien. En effet, l'investissement dépend de la demande anticipée et de la capacité d'utilisation du capital. Les prix de l'énergie créent un climat d'incertitude qui incite les entreprises à reporter leurs investissements irréversibles (Bernanke, Gertler et Watson, 2004 ; Pindyck, 1990). L'investissement est également réduit du fait de la hausse du coût marginal induite par la hausse des prix de l'énergie. D'un point de vue empirique, ces canaux ne sont toutefois pas considérés comme significatifs. La seule composante de l'investissement ayant une élasticité-prix (de l'énergie) significative (-1,02) concerne l'investissement résidentiel (Lutz, 2008). Aussi, pour Lutz, « les chocs de prix énergétiques se font principalement sentir à travers la réduction de la demande de voitures et de nouvelles maisons » (Lutz, 2008, p.889).

Du prix de l'énergie au poids de la facture énergétique dans le PIB

Plutôt que les prix de l'énergie, d'autres auteurs (Bashmakov, 2007 ; Court et Fizaine, 2017 ; Heun et de Wit, 2012) mentionnent l'importance de s'intéresser à la facture

énergétique¹¹⁹. L'avantage de cet indicateur par rapport aux seuls prix est de prendre en compte la quantité d'énergie consommée puisque la facture s'obtient en multipliant le prix de l'énergie par ces quantités. En effet, la consommation d'énergie, et avec elle l'intensité énergétique du PIB, est variable d'un pays à un autre, de sorte qu'une variation du prix de l'énergie ne va pas les affecter de la même manière. L'alourdissement de la facture s'interprète comme une situation où le coût de l'énergie progresse plus rapidement que les revenus versés. De plus, cet indicateur fait clairement référence à un mécanisme proche de l'effet revenu discrétionnaire mentionné précédemment : toutes choses égales par ailleurs, lorsque le prix de l'énergie augmente, les dépenses énergétiques augmentent. Il faut dépenser plus pour obtenir les mêmes quantités d'énergie. Si les agents économiques ne reçoivent pas plus de monnaie sous forme de revenus ou de prêts, certaines dépenses non énergétiques finiront par être réaffectées vers le secteur énergétique, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur le PIB. Lorsque le ratio dépenses énergétiques/PIB augmente, les dépenses énergétiques augmentent plus rapidement que le PIB. Les revenus ne peuvent pas suivre et la consommation et l'investissement discrétionnaires sont réduits (King et Hall, 2011).

En utilisant les dépenses d'énergie finale, Bashmakov (2007) montre qu'il existe une relative stabilité du ratio coût de l'énergie par rapport au PIB tant pour les États-Unis (1949-2007) que pour l'OCDE (1978-2007). La plupart du temps, ce coût oscille autour de 8-10% pour les États-Unis et 9-11% pour l'OCDE. Parfois, ce coût atteint des niveaux jugés « insoutenables » (plus de 11%) au-delà desquels le PIB est affecté négativement. La relation entre le coût de l'énergie et la croissance économique n'est pas linéaire : il y a absence de corrélation entre taux de croissance et facture énergétique lorsque la facture est inférieure à 11%, mais il y a corrélation négative lorsque la facture dépasse ce seuil. Par exemple, lorsque la facture passe de 11 à 14% du PIB, le taux de croissance passe de 4 à environ 1,5%¹²⁰. Bien qu'ils raisonnent au stade de l'énergie primaire, d'autres travaux aboutissent à des conclusions similaires. A partir de données états-uniennes entre 1970 et 2007, Murphy et Hall (2011) identifient que les récessions majeures surviennent lorsque les dépenses pétrolières dépassent 5,5% du PIB. Lambert et al. (2014) estiment ce seuil critique à de 10% lorsqu'on

¹¹⁹ Celle-ci se mesure en rapportant les dépenses énergétiques effectuées par les agents résidents au PIB. Il s'agit donc plus exactement du poids des dépenses énergétiques dans le revenu national.

¹²⁰ Précisons ici qu'il s'agit de simples statistiques descriptives, pas d'analyse économétrique sur le caractère significatif ou non de la facture énergétique.

prend en compte toutes les énergies, là encore pour le cas états-unien. Enfin, Fizaine et Court (2016) indiquent que sur le long terme (1850-2012), pour les Etats-Unis comme pour l'économie mondiale, les périodes de fortes dépenses énergétiques sont associées à des taux de croissance faibles, alors que les périodes de faibles dépenses énergétiques sont associées à des taux de croissance élevés (Fizaine et Court, 2016). Ces travaux restent au stade de l'analyse descriptive.

Le travail de Court et Fizaine (2016) dépasse toutefois ces limites en engageant une analyse économétrique pour les Etats-Unis entre 1960 et 2010. Les deux variables principales sont le PIB et la facture énergétique, mais trois définitions différentes sont testées : la facture pétrolière, la facture toutes énergies fossiles confondues et la facture toutes énergies confondues (fossiles et non fossiles). Cinq modèles statistiques sont estimés à partir de l'estimateur des moindres carrés. Différentes variables de contrôle sont ajoutées afin de prendre en compte d'autres facteurs susceptibles d'avoir un rôle sur la croissance : l'investissement, la population et le taux de chômage. L'inspiration théorique justifiant ce choix est néoclassique puisque ces deux variables servent de proxy aux deux facteurs de production identifiés par le modèle de Solow. L'investissement permet de saisir l'évolution du parc de machines tandis que la croissance de la population permet de suivre l'évolution de la force de travail. Egalement, dans un des modèles des années sont contrôlées (1974, 19779, 1986, 2009) dans la mesure où ce sont des valeurs extrêmes.

Quel que soit le modèle retenu, les variables sont significatives ($p < 0,01$ excepté pour le taux de chômage $p < 0,05$). Le modèle 4 est privilégié, non pas que son R^2 soit le plus élevé (0,49 contre 0,50 et 0,51 pour les modèles 2 et 3) mais l'agrégat de facture énergétique retenu est le plus large et permet des interprétations plus généralistes.

L'équation estimée étant de type :

$$\frac{GDP}{GDP} = \alpha + \theta_1 \frac{\text{Facture énergétique}}{PIB} + \theta_2 \frac{\text{investissement}}{PIB} + \theta_3 \Delta \text{population} + \varepsilon \quad (11)$$

Pour obtenir, la facture énergétique maximale réduisant la croissance économique à 0%, on pose $\frac{GDP}{GDP} = 0$. En réarrangeant l'expression la facture énergétique maximum s'écrit :

$$\text{Max} \frac{\text{facture}}{\text{PIB}} = \frac{-a - \theta 2 \frac{\text{investissement}}{\text{PIB}} - \theta 3 \Delta \text{population}}{\theta 1}$$

En utilisant les valeurs de paramètres obtenus avec le modèle 4, Fizaine et Court (2016) trouvent une valeur de 11%. Des tests de Granger sont également utilisés pour identifier une causalité unidirectionnelle des dépenses énergétiques vers la croissance du PIB. D'après ce travail, dans le cas états-unien, lorsque la facture énergétique dépasse les 11%, le PIB réel cesse d'augmenter. Le prix de l'énergie apparaît ainsi comme un facteur limitant.

Pour finir, les deux auteurs en déduisent un EROI minimum en deçà duquel la croissance états-unienne ne peut avoir lieu. En repartant de l'équation 9 qui relie EROI et prix de l'énergie, le terme au dénominateur correspond à la facture énergétique. A partir d'une valeur du MROI (monetary return on investment) et la valeur obtenue de la facture énergétique maximale, le EROI minimum est 11 :1.

Une des limites de ce travail concerne la méthode et plus précisément les variables de contrôle utilisées (capita et travail) dans la régression. Tout d'abord, l'article ne présente pas de modèle sans variable de contrôle permettant d'observer la relation entre la facture énergétique et le PIB avant leur ajout. Ensuite, le capital et le travail sont en effet des facteurs de croissance économique bien connus, tirés du modèle de Solow. Il semble a priori logique de les prendre en compte puisqu'ils peuvent « expliquer » une partie de la croissance du PIB. Ce raisonnement est problématique pour deux raisons. D'abord, les agrégats retenus reproduisent la confusion entre agrégat monétaire et physique¹²¹. La quantité de capital ne peut pas être saisie à partir des dépenses d'investissement (qui par ailleurs sont un flux). Ensuite, ces facteurs ne sont pertinents que si l'on raisonne du côté de l'offre. Or, l'hypothèse censée être testée ici est clairement orientée « demande » : le coût de l'énergie est réputé affecter la consommation discrétionnaire et l'investissement, donc la demande intérieure et, par ce biais, le PIB¹²². Ainsi, pour être cohérent et mesurer de quelle manière la demande intérieure est affectée par la croissance des dépenses énergétiques, les variables de contrôle

¹²¹ Une discussion plus approfondie de l'importance de ces distinctions fait l'objet de la section 3 du chapitre 2.

¹²² Les deux auteurs citent Murphy et Hall comme point de départ de leur analyse : « "when energy prices increase, expenditures are re-allocated from a reas that had previously added to GDP, mainly discretionary investment and consumption, towards simply paying for more expensive energy" » (p.174).

devraient être entretenir un lien avec la consommation et l'investissement. On pense par exemple à la propension à épargner, à la propension à importer le taux d'intérêt ou le taux de profit pour ce qui est l'investissement. On ne peut pas mesurer l'effet d'une croissance des dépenses énergétiques sur l'investissement (et la demande) en contrôlant cette variable. Ces remarques révèlent que l'équation économétrique proposée ne teste pas l'hypothèse théorique annoncée.

En résumé, pour les néo-physiocrates, le surplus monétaire (mesuré par le PIB) dépend de l'existence d'un surplus physique : l'énergie nette. Au-delà de la quantité d'énergie injectée dans le secteur énergétique (variable extensive), ce surplus énergétique dépend d'une variable intensive, le EROI. Si l'existence même d'un surplus suppose un EROI supérieur à 1, les sociétés modernes ont atteint un niveau de surplus élevé supposant un EROI minimum bien supérieur afin d'assurer les différentes fonctions sociales (santé, éducation, loisirs...) L'estimation de ce EROI minimum varie entre 5:1 et 14:1 pour Hall et al. (2009) et entre 15 à 25:1 pour Lambert et al. (2014). Pour Court et Fizaine (2016), une croissance nulle supposerait, dans le cas états-unien présenté plus en détail, un EROI de 11 :1. En effet, en deçà d'un certain niveau de EROI, le prix de l'énergie augmente et alourdit le poids de la facture énergétique, ce qui conduit à stabiliser, voire à faire chuter le PIB. Le processus de croissance apparaît contraint par des limites physiques, en particulier l'accessibilité de l'énergie. Une autre manière d'articuler les dimensions physiques et monétaires consiste à recourir à une théorie de la valeur. La sous-section suivante présente la théorie de la valeur-énergie.

1.2.2. La théorie de la valeur-énergie

D'après la théorie de la valeur énergie, les prix relatifs des biens et services sont déterminés par l'énergie qu'ils incorporent. Cette théorie n'est pas introduite par les physiocrates qui ne formulent pas de véritable théorie de la valeur ou de « théorie explicite des prix » (Deleplace, 2018)¹²³. Son développement, plus tardif, est effectué par les néo-physiocrates, en particulier Robert Costanza à partir des années 1980. Avant de présenter

¹²³ Plus exactement, d'après Deleplace (2018), « les exemples numériques sont choisis pour assurer la cohérence du Tableau, mais ils ne traduisent pas une loi gouvernant la formation du prix des marchandises » (p.37).

leurs travaux, on peut toutefois noter que, sous certaines hypothèses, le modèle de Quesnay nous offre un système de prix correspondant au blé incorporé.

Quand les prix relatifs chez Quesnay correspondent au blé incorporé

Bien que, pour eux, la source de la richesse soit le secteur agricole, les physiocrates ne négligent pas les dimensions monétaires. Le secteur industriel ne crée rien au sens physique du terme, mais cela ne l'empêche pas de générer de la valeur qui lui permet en retour d'acheter les intrants nécessaires au secteur agricole. De même, les rentiers perçoivent un revenu par le biais de la rente. Ainsi, en parallèle de la circulation matérielle (création du produit net par l'agriculture, transformation/consommation de ce produit par les autres secteurs), il existe une sphère monétaire qui rend possible cette circulation du surplus. Quesnay est d'ailleurs reconnu pour être l'un des premiers circuitistes (Passarella, 2017). Médecin de formation, il voit la monnaie comme un fluide permettant l'approvisionnement des différents organes (secteurs) constituant le système économique. Avec l'unité de compte, ce sont les prix relatifs entre secteur agricole et secteur industriel qui organisent cette circulation du produit net auprès des différentes classes.

Nous avons fait ici le choix de présenter le raisonnement à partir des bilans comptables des différentes classes identifiées chez Quesnay. L'usage des bilans est fréquent dans la pensée circuitiste dans la mesure où toute variation des stocks résulte d'un flux. Précisons également que cette présentation est une reconstruction au sens où nous introduisons une création monétaire par les banques. L'objectif de l'exercice est de voir le type de prix relatifs compatibles avec une reproduction de l'économie telle que schématisée par Quesnay. Ici nous faisons abstraction du taux d'intérêt pour simplifier les écritures (le crédit se fait à taux 0).

Dans cette situation fictive, le secteur agricole produit 100kg de blé, dont 50kg sont prélevés pour reconstituer les intrants (25kg de semences et 25 kilos au titre de la subsistance des cultivateurs). Le produit net est ici de 50kg, disponible pour la consommation finale directe (par exemple, par les propriétaires fonciers) ou bien indirectement dès lors que ce blé sert à

produire des biens finaux industriels¹²⁴. Admettons ici que le produit net soit utilisé par le secteur industriel de la sorte : 25kg sont absorbés par les travailleurs de ce secteur pour leur subsistance et 25kg sont utilisés comme matière première afin de produire deux unités de bien industriel. On peut alors se demander quels prix relatifs permettent la reproduction de ce système économique fictif. Pour répondre à cette question, considérons que le (kilo de) blé, le numéraire utilisé pour mesurer le surplus, vaut 1€.

- 1) En début de période, le secteur agricole est riche des semences de l'année précédente mises en réserve pour replanter (25kg à 25€). Le secteur agricole s'endette à hauteur de 50€, somme avec laquelle il achète de la force de travail pour 25€ et des semences pour 25€.

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
Force de L -25	Dette -50	Liquidités -25	RN -25			Crédit agricole -50	Compte secteur agricole -50		
Semences 25	R.N - 25								
Liquidités 25									

- 2) Le secteur agricole utilise la force de travail et les semences et parvient à produire 100kg de blé, dégageant ainsi une richesse nette (RN) supplémentaire de 50€ (la R.N passe de 25 à 75€).

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
100kg de blé -100	Dette -50	Liquidités 25	RN -25			Crédit agricole -50	Compte secteur agricole -50		
Liquidités -25	R.N -75								

¹²⁴ On fait ici l'hypothèse que l'agriculture n'utilise que ses propres inputs : l'industrie ne fournit pas de consommations intermédiaires ni de biens capitaux à l'agriculture et se contente de produire des biens destinés à la consommation finale.

- 3) Les salariés agricoles dépensent leurs salaires pour acheter les 25kg de blé tandis que 25kg sont mis en réserve pour les semences de l'année suivante. Les semences sont évacuées du tableau pour plus de lisibilité car leur rôle intervient plus dans la suite de l'explication. Il reste alors 50kilos de blé, c'est-à-dire le produit net, pour l'instant détenu par le secteur agricole.

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
50kg de blé 50	Dette 50	25 blé	RN 25			Crédit agricole 50	Compte secteur agricole 50		
Semences année prochaine 25	R.N 50								
Liquidités 50	Provision semence 25								

- 4) Le secteur industriel s'est lui aussi endetté pour produire deux biens industriels : il a en effet besoin d'acheter de la force de travail (25€) et des matières premières agricoles (25€).

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
25kg de blé 50	Dette 50	25 blé	RN 50	Force de L 25	Dette 50	Crédit agricole 50	Compte secteur agricole 50		
Liquidités 75	R.N 50	25 Liquidités		Blé 25		Crédit indus 50	Indus 50		

5) A son tour, ce secteur transforme les matières premières grâce à l'activité des travailleurs pour produire deux biens industriels. Le secteur agricole récupère 25€ pour la vente de la matière première et 25€ de blé pour la vente aux salariés du secteur industriel.

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
Liquidités 100	Dette 50 R.N 50	50 blé	RN 50	2 biens indus	Dette 50	Crédit agricole 50 Crédit indus 50	Compte secteur agricole 100 Indus 0		

6) Le secteur agricole verse sa richesse nette aux rentiers du sol. Avec la rente foncière, ces derniers peuvent acheter les deux biens industriels (50€). Le secteur industriel peut ainsi rembourser sa dette, de même du secteur agricole avec les 50€ de liquidités qu'il lui restait après versement de la rente.

Secteur agricole		Salariés		Secteur industriel		Banques		Rentiers	
Liquidités 50	Dette 50	50 blé	RN 50	2 biens indus	Dette 50	Crédit agricole 50 Crédit indus 50	Compte secteur agricole 50 Indus 50	Liquidités 50	RN 50

Au terme de cet exemple, la valeur ajoutée a été captée par les rentiers. Le cycle de production peut se reproduire pour la période suivante car les ouvriers ont été nourris et les avances en semence reconstituées. Cette situation a été rendue possible par un prix relatif spécifique où 1 bien industriel = 25 kilos de blé. On constate que ces prix relatifs correspondent à la quantité de blé incorporée. Ce constat n'est toutefois vrai que si l'on traite la subsistance des travailleurs comme un input, comme une nécessité technico-matérielle, de la même manière qu'il faut du fourrage pour nourrir les animaux. Dans cette perspective, les salariés n'ont pas le droit au surplus : le surplus va être approprié par les propriétaires du sol par le biais de la rente. C'est cette contrainte qui produit le système de prix relatifs. La

reproduction ici n'est donc pas seulement matérielle, elle est également *sociale*. A l'inverse, si on considère que la rente n'est pas une nécessité et que le surplus peut revenir aux travailleurs du secteur industriel, les prix relatifs pourront être différents.

Si une telle théorie de la valeur blé n'est pas explicitement développée par les physiocrates, ce pas sera franchi par leurs successeurs avec la théorie de la valeur énergie.

Costanza et la théorie de la valeur énergie

L'ambition d'une théorie de la valeur énergie est de mettre en son cœur les coûts de production qui, en dernière instance, dériveraient de l'énergie solaire dépensée : « [the energy theory of value] is really a cost of production theory with all costs carried back to the solar energy necessary directly and indirectly to produce them" (Costanza, 1980, p. 1224). Cette focalisation sur l'input énergétique est justifiée selon un principe de hiérarchie : l'énergie disponible serait le seul facteur de production primaire, celui à la base de tous les autres inputs.

*« An energy theory of value posits that, at least at the global scale, free or available energy from the sun (plus past solar energy stored as fossil fuels and residual heat from the earth's core) are the only 'primary' inputs to the system. Labor, manufactured capital and natural capital are 'intermediate inputs'. Thus, one could base a theory of value on the use in production of available energy that avoids the problems the classical economists encountered when trying to explain exchange values in economic systems »
(Farber et al., 2002, p.383)*

A l'instar du travail des classiques, pour les néo-physiocrates le prix d'un bien (ou d'un service) serait proportionnel à l'énergie incorporée dans ce bien, que celle-ci soit directe ou indirecte (celle contenue dans les inputs intermédiaires). Par exemple, les machines utilisées seront comptabilisées à la hauteur de l'énergie qu'elles ont nécessitée pour être produites. L'un des principaux enjeux tient aux modalités de calcul de cette énergie indirectement consommée.

Costanza propose une méthode pour tester la validité de la théorie de la valeur énergie. A partir d'un tableau entrées-sorties, il calcule l'intensité énergétique de 90 secteurs

de l'économie états-unienne pour l'année 1967. Il propose plusieurs scénarii quant aux frontières à retenir en termes d'énergie incorporée. Dans le premier, le scénario de base (A), seule l'énergie des 90 secteurs « productifs » est prise en compte, c'est-à-dire les différentes branches disponibles à ce niveau de désagrégation par les tables input-output. Dans le deuxième scénario (B), Costanza ajoute une estimation de l'énergie solaire (gratuite) consommée par ces différents secteurs, que cela soit sous forme d'utilisation des terres (apport de la photosynthèse) ou d'eau. Dans le troisième scénario (C), le scénario de base est enrichi de l'énergie contenue dans les services gouvernementaux ainsi que « dans » la force de travail. En effet, dans la mesure où il faut de l'énergie pour produire le travail et les services gouvernementaux, leur exclusion de l'analyse serait une « distortions of energy cost calculations since labor and government provide services to the economy whose energy costs would be ignored » (Costanza and Herendeen, 1984, p.132).

Deux nouveaux secteurs sont ainsi ajoutés, le secteur des activités gouvernementales et le secteur des ménages, portant leur nombre à 92. Tous deux achètent des inputs aux autres secteurs (dépenses de consommation pour les ménages, dépenses gouvernementales) et reçoivent des paiements pour leur contribution productive (salaires et revenus de la propriété pour les ménages, impôts et taxes pour le gouvernement). Leur consommation d'énergie directe et indirecte est calculée selon la même méthode que les autres secteurs de production. Enfin, le quatrième scénario (D) croise les scénarii 2 et 3. Le tableau 27 montre l'effet de ces différents découpages sur l'intensité en énergie incorporée des différents secteurs. Par énergie incorporée il faut entendre l'énergie directe consommée par le secteur et celle qu'il utilise par les produits qu'il achète à d'autres. Dans la mesure où la théorie de la valeur énergie conclut que l'énergie est proportionnelle à la valeur créée, la validité de cette théorie devrait donner une intensité énergétique proche voire identique pour les différents secteurs considérés.

Secteur	Intensité en énergie incorporée (Quantité d'énergie fossile en BTU par dollar)			
	A	B	C	D
1. Extraction de charbon (7)	5 143 600	5 172 000	5 455 600	5 807 500
2. Pétrole brut et gaz naturel (8)	2 920 300	2 929 200	3 188 600	3 469 050
4. Production électrique (68.01)	505 500	513 900	796 220	1 099 950
6. Autres produits agricoles (2)	81 567	775 090	381 090	1 385 400
10. Extraction de minerais de fer (5)	65 904	99 605	406 060	800 800
14. Construction (11)	54 804	230 245	389 770	913 950
21. Habillement (18)	38 845	295 135	371 107	974 600
33. Peintures et produits associés (30)	107 100	160 680	425 290	809 300
73. Transport aérien (65,05)	122 630	143 910	452 230	814 700
75. Transportation services (65,07)	5 672	11 615	346 970	706 750
79. Commerce de gros et de détail (69)	29 302	43 265	411 490	814 350
91. Gouvernement			717 160	1 393 050
92. Ménages			358 350	738 050

Tableau 27. **Intensité en énergie incorporée pour chaque secteur selon les 4 scénarii.**

Source : auteur à partir de Constanza, 1980, p.1221

A partir de ces données de panel pour l'année 1967, Costanza procède à une régression permettant de mettre en évidence une relation significative entre la valeur ajoutée produite et l'énergie incorporée¹²⁵.

Plus précisément, un scénario se détache des autres : celui où le travail est inclus (tableau 28). Dans ce cas, la corrélation entre la valeur ajoutée en dollars et l'énergie incorporée est presque parfaite si l'on ne considère que les secteurs non énergétiques ($R^2=0.9907$). Pour Costanza, cette exception proviendrait du fait que les secteurs énergétiques mettent le surplus à disposition des autres secteurs et doivent nécessairement supporter un échange écologiquement inégal : « L'interprétation possible est que l'intensité énergétique pour ces secteurs est plus élevée car ils représentent le point d'entrée de l'énergie disponible dans l'économie ». (p.1122).

	Avec les secteurs énergétiques 1 à 7			Sans les secteurs énergétiques 1 à 7		
	R ²	F	p-value	R ²	F	p-value
A	0,0210	1,89	0,1729	0,5539	100,57	0,0001
B	0,0629	5,90	0,1710	0,2042	20,78	0,0001
C	0,7809	313,73	0,0001	0,9907	8633,95	0,0001
D	0,8535	512,84	0,0001	0,9454	1401,31	0,0001

Tableau 28. **Résultat des régressions entre la valeur économique et l'énergie incorporée pour les 4 scenarii.**
Source : auteur à partir de Costanza, 1980, p.1223

A noter que ce genre d'exercice serait, d'après Costanza, d'autant plus concluant que l'on utilise une mesure qualitative de l'énergie. Dit autrement, si les données le permettent, il faut pouvoir agréger l'énergie en prenant en compte les différences de qualité. Nous avons vu, au chapitre 2, que certains auteurs se tournaient vers l'exergie utile pour cette raison. Dans

¹²⁵ Cette étude est répliquée quelques années plus tard en compagnie de Herendeen (Costanza et Herendeen, 1984), toujours pour les Etats-Unis pour les années 1963, 1967 et 1972. Les résultats présentés dans cette section sont confirmés.

ce travail, Costanza raisonne au stade final, ce qui est moins précis qu'une estimation à partir du stade utile puisque l'efficacité des appareils n'est pas considérée.

L'auteur s'interroge sur la pertinence de l'énergie incorporée en se demandant si le travail incorporé (ou encore les services gouvernementaux incorporés) ne pourrait pas être d'autres candidats à l'explication des prix relatifs (p.1224). Ces autres inputs sont écartés au motif que seule l'énergie est le véritable input net : « We must look to physical reality to determine which factors are net inputs and which are internal transactions. No one would seriously suggest that labor creates sunlight » (p.1224) Le travail dépend de l'énergie et ne saurait être premier, raison pour laquelle c'est l'énergie qui est considérée comme la source ultime de la valeur.

Costanza reconnaît par ailleurs que des déviations entre prix et énergie incorporée sont possibles. En effet, sa théorie ne serait valable qu'en présence de marchés parfaitement concurrentiels et d'un système de prix complets, c'est-à-dire une situation où il existe un marché pour chacun des éléments de la nature.

« I see large bodies of transactions (in ecological systems) where markets are non existent or incomplete. In these systems embodied energy obviously diverges from market price. It is just these points of divergence that are almost interesting, since embodied energy may be useful in correcting for imperfect ownership and other market imperfections »
(Costanza, 1981, p.189-190)

On voit ici que la théorie opère une sorte de glissement. Elle se veut, d'une part, positive : elle pose qu'en régime concurrentiel et de marchés complets, les prix relatifs correspondent à l'énergie incorporée dans les biens. Mais elle a également un versant normatif : ces prix relatifs seraient les « bons prix » et, face à une divergence, l'intervention de l'Etat devrait faire en sorte de les atteindre. Cette seconde dimension n'est pas sans rappeler le projet du mouvement technocratique américain¹²⁶ (Berndt, 1982). Déplorant la faillite du système des prix de marché lors de la grande crise de 1929, ce mouvement préconisait que les biens et services produits puissent être évalués en unités d'énergie et que la monnaie soit remplacée par des certificats d'énergie distribués de manière équitable. En

¹²⁶ Ou encore les débats sur la valorisation de la nature pour pouvoir l'intégrer dans le procédure d'internalisation des externalités.

pratique, cela revient à instaurer un système de prix correspondant à l'énergie incorporée (Elsner, 1967).

Pour notre propos, la théorie de la valeur-énergie peut être mobilisée pour discuter de la relation entre l'énergie et le PIB. Si la quantité d'énergie incorporée et la valeur créée évoluent de pair, alors le découplage apparaît compromis : « The most important implication is that the physical dimensions of economic activity are not separable from limitations of energy supply. The universally appealing notion of unlimited economic growth with reduced energy consumption must be put firmly to rest beside the equally appealing but impossible idea of perpetual motion » (Costanza, 1980, p.1224). Costanza ne nie pas qu'au niveau national ou sectoriel un tel découplage pourrait s'observer mais cela ne vaut pas au niveau global¹²⁷.

Dans le cadre de la valeur-énergie, le EROI permet d'obtenir le prix de l'énergie. En effet, le EROI rapporte l'énergie nécessaire (directe et indirecte) à l'output du secteur énergétique (la quantité d'énergie totale). Le EROI calcule en définitive l'énergie incorporée à la quantité d'énergie. Une baisse du EROI signifie qu'une unité énergétique incorpore plus d'énergie qu'auparavant donc, en application de la théorie, aura un prix plus élevé. Dans la mesure où l'énergie est très massivement une consommation intermédiaire (sauf cas d'un pays exportateur), toutes choses égales par ailleurs, la valeur ajoutée créée par les autres secteurs va être réduite, donc le PIB. Le canal identifié est donc relativement similaire à celui des travaux présentés au 1.2.1. Les travaux empiriques sur le lien EROI-prix de l'énergie peuvent être analysés comme une évaluation empirique de la théorie de la valeur énergie appliquée au cas des biens énergétiques¹²⁸.

Les limites à la théorie de la valeur énergie

Au niveau empirique, les bons résultats de Costanza dépendent de deux ajustements importants : l'ajout de deux secteurs qui ne sont d'habitude pas comptés, les ménages et le gouvernement, et l'exclusion des secteurs énergétiques. C'est le premier ajustement qui a le

¹²⁷ Voir sur ce point la section 1 du chapitre 1.

¹²⁸ En effet, il s'agit bien dans ces travaux de voir si l'énergie incorporée à une unité d'énergie détermine le prix de l'énergie.

plus grand impact sur les résultats et qui a fait l'objet des plus vives critiques. Par exemple, pour Huettner (1982), le calcul d'une valeur ajoutée du secteur des ménages à partir des salaires reçus est admissible mais le calcul d'une énergie incorporée sur cette base est considérée comme « the most debatable aspect of Costanza's argument and the most important » (Huettner, 1982, p.1141). En cause, cette méthode conduirait Costanza à compter deux fois certaines consommations d'énergie.

Au niveau théorique, pour Hornborg (2014), la théorie de la valeur énergie présente deux limites : elle serait substantialiste et réductionniste. Le caractère substantialiste provient du fait que cette théorie fait de la valeur une substance (l'énergie), ce qui reviendrait à négliger le caractère social de la valeur. Ce caractère social peut en premier lieu renvoyer au fait que la valeur s'exprime en monnaie, or celle-ci n'existe qu'en vertu d'un rapport social situé historiquement : le rapport marchand. Choisir une substance reviendrait donc à négliger le rôle de l'échange marchand dans le processus de valorisation (Orléan, 2011a)¹²⁹, à faire comme si ce moment fondamental dans nos économies n'était pas déterminant. Ce caractère social renvoie également à l'idée que les préférences culturelles ne seraient pas prises en compte (Hornborg, 2014). Les humains valoriseraient les biens et services d'une manière différente d'une société à l'autre, ce qui apparaît inconciliable avec le fait que la valeur dépend d'une substance ahistorique, ici l'énergie. Cela reviendrait à nier tout rôle aux désirs des individus puisque seul le coût physique de production serait déterminant.

Cette première critique ne nous semble pas toujours pertinente. En effet, la représentation de Costanza ressemble par certains aspects à celle des classiques anglais : il y a un prix naturel, déterminé par les conditions de production (l'énergie incorporée) et un prix de marché qui peut s'en écarter selon les déséquilibres en offre et demande. Le prix naturel sert d'ancrage autour duquel gravitent les prix de marché. L'échange marchand est donc bien présent. Par ailleurs, ce cadre n'est pas incompatible avec la prise en compte des préférences culturelles. D'après Costanza, la théorie de la valeur énergie est une « cost-of-production theory » qui n'entretient « no inherent conflict [with] value theories based on utility » (p.1224). En effet, si on reprend le raisonnement des classiques, les biens et services n'ont une

¹²⁹ Orléan ne s'intéresse pas directement à la théorie de la valeur énergie mais critique à la fois marxistes (théorie de la valeur travail) et néoclassiques (théorie de la valeur utilité) pour avoir négligé ce moment de l'échange marchand. Ses thèses sont développées au 2.3.

valeur économique (valeur d'échange) que s'ils sont par ailleurs utiles (valeur d'usage). De plus, si, à un moment donné, les préférences culturelles se modifient, faisant augmenter la demande d'un bien, cette augmentation au-delà du prix naturel n'est pas durable. En régime concurrentiel, les capitaux désertent progressivement les autres branches de la production. Une théorie de la valeur substance semble être en mesure de reconnaître le rôle de l'échange.

Le caractère réductionniste renvoie au choix de l'étalon, ici l'énergie, pour comptabiliser la production. Or, pour Georgescu-Roegen (GR) et Daly, la production ne saurait se résumer à la question de l'énergie : « matter matters too » écrit, en effet, le premier. Tout d'abord, il est impossible de créer de la matière à partir de l'énergie, ou dans des cas très spécifiques (Georgescu-Roegen, 1979). Ensuite, la matière est, comme l'énergie, soumise à l'entropie : elle a donc des spécificités physiques qui interdisent sa disparition de l'analyse.

Pour GR, le processus économique consiste en la transformation de *matière-énergie* de basse entropie en haute entropie¹³⁰. De plus, ces différentes sources sont qualitativement différentes : elles répondent à des usages différents et ne sont donc pas substituables, ni comparables à partir d'une même unité (Daly, 1991). Pour ne prendre qu'un exemple, le pétrole excelle dans le domaine des transports du fait de ses caractéristiques physiques (stockable, concentré, liquide) contrairement au charbon. Enfin, à côté de cette matière-énergie, le travail doit être intégré à l'analyse dans la mesure où son apport ne se limite pas à une dépense de force musculaire. Pour toutes ces raisons, le flux de production ne saurait se réduire à une seule unité physique, l'énergie. Pour GR, ce flux d'output se compose d'éléments disparates dont le seul point commun est « la joie de vivre ». Cette joie de vivre est “an immaterial flux for which low-entropy matter energy and purposeful human labor are fundamental preconditions” (Georgescu-Roegen, 1973, p.53). C'est pourquoi, selon ce dernier, une théorie de la valeur énergie est à proscrire :

« It would be a great mistake to think that [production] may be represented by a vast system of thermodynamic equations. [...] The entropic process moves through an intricate web of anthropomorphic categories, of utility and labor, above all »
(Georgescu-Roegen, 1979)

¹³⁰ Voir sur ce point la section 2.1. du chapitre 2.

Une autre manière de discuter de l'aspect réductionniste est de repartir de la distinction faite par les classiques entre richesse et valeur et que Costanza semble négliger. Rappelons que la richesse est la somme des différentes valeurs d'usage produites pour laquelle les classiques identifient deux sources : le travail et la nature. Cette richesse est difficilement mesurable à partir d'un seul agrégat puisque, par définition, il s'agit de différents besoins qui vont être satisfaits. En revanche, la valeur est calculable car elle est représentée/exprimée par une unité homogène : la monnaie. Ainsi, pour Costanza, l'énergie (notamment solaire) est une valeur d'usage fondamentale (c'est la seule véritable puisque les autres sont des inputs intermédiaires) à la production des marchandises et, ce faisant, déterminerait la valeur. Or, pour les classiques et Marx, richesse et valeur admettent des sources différentes. Si la richesse provient de la Nature et du Travail, la valeur provient du seul travail. En son temps, Marx reprochait déjà aux physiocrates l'erreur de voir la valeur non pas comme une « modalité sociale d'existence de l'activité humaine (le travail) mais comme un ensemble des choses matérielles (terre, nature et les différentes transformations de ces choses matérielles » (p.46)¹³¹.

Conclusion de la première section

A la suite des physiocrates, les néo-physiocrates considèrent que seul le secteur énergétique génère un surplus appelé énergie nette. En baisse pour le pétrole et le gaz à l'inverse du charbon, le EROI indique l'efficacité avec laquelle le secteur énergétique assure cette tâche. Plus le EROI est élevé, plus, à production d'énergie donnée, l'énergie nette sera élevée. Sans énergie nette, les autres activités non énergétiques ne peuvent pas se développer ni même exister. Compte tenu du caractère indispensable de l'énergie mis en évidence par la thermodynamique, le EROI contraint la production physique de biens et services. La production mesurée en volume (PIB réel) suivrait nécessairement la même tendance.

Cette thèse est testée empiriquement de deux manières. La première manière est la mesure d'un canal EROI-prix de l'énergie-facture énergétique-PIB. Les rares travaux portant sur le canal EROI-prix de l'énergie confirment cette thèse mais leurs résultats demanderaient

¹³¹ Nous traduisons : "not a [as] definite social mode of existence of human activity (labour) but [as] material things—land, nature, and the various modifications of these material things" (cité par Burkett, 2006, p30)

à être répliqués pour d'autres économies et d'autres énergies que le pétrole états-unien. L'existence d'un canal prix de l'énergie-PIB est bien établie car documentée et explorée depuis plus longtemps. Enfin, ceux sur la facture énergétique restent majoritairement descriptifs et les rares travaux économétriques, bien que validant l'hypothèse d'une relation inverse entre facture énergétique et PIB, souffrent de quelques difficultés méthodologiques¹³².

La deuxième manière, plus ancienne mais aussi plus délaissée, est la théorie de la valeur énergie. Pourtant, ce cadre conduit à des conclusions similaires, le EROI pouvant s'interpréter comme une mesure de l'énergie incorporée à la production d'énergie. Aussi nous rejoignons la conclusion de Pirgmaier (2021) que les « physiciens de l'énergie qui expliquent la croissance (une forme de valeur économique) en termes énergétiques adoptent implicitement une théorie de la valeur énergie »¹³³ (p.4). Outre la faible quantité d'évaluations empiriques et les controverses méthodologiques quant à la validité des résultats obtenus, cette théorie est également discutable quant à l'articulation qu'elle propose entre monde physique et monétaire. Une distinction fondamentale mise en évidence au chapitre précédent est négligée, celle entre richesse et valeur. En effet, le domaine de validité de la thermodynamique est celui de la production de richesse : pour produire des valeurs d'usage ayant une existence matérielle, il faut nécessairement dégrader de l'énergie. Cependant, la contribution fondamentale de l'énergie à la production de richesse ne peut pas permettre pas de préjuger de son rôle de la création de valeur¹³⁴. En ce sens, les critiques qu'adressait Marx, en son temps, aux physiocrates continuent de s'appliquer aux néo-physiocrates : ces derniers confondent la « valeur avec la substance matérielle, ou plutôt croient en son équivalence avec la valeur »¹³⁵ (Marx, [1863], p.60). Pour dépasser cette objection, l'étude de la production de valeur économique pour elle-même doit être menée. Les néo-physiocrates s'y refusent et continuent de renvoyer à la théorie de la valeur utilité¹³⁶. Les classiques et Marx offrent-ils une alternative ? Leurs théories de la valeur travail apportent-elles une analyse du monde monétaire plus robuste que celle des néophysiocrates sans négliger les apports de la

¹³² En particulier, les variables de contrôle retenues paraissent discutables.

¹³³ Nous traduisons : « energy physicists who explain growth (a form of economic value) in energy terms implicitly adopt an energy theory of value »

¹³⁴ Voir sur ce point la conclusion du chapitre 2

¹³⁵ Traduction de « value with material substance, or rather the equating of value with it ».

¹³⁶ Voir en particulier la position de Costanza au 1.2.3. La validité de la théorie de la valeur utilité est également défendue par Hornborg (voir le 3.3. du chapitre 2).

thermodynamique ? Dans la section suivante, nous examinons l'articulation entre dimensions physiques et monétaires de la production développée par ce paradigme.

2. Le paradigme classique : le rôle déterminant de l'énergie dans la formation du taux de profit et la dynamique d'accumulation du capital

Au terme de la section précédente, nous avons montré que la théorie de la valeur-énergie était structurante du paradigme néo-physiocratique. L'objectif de cette section est de voir si la théorie de la valeur-travail permet de dépasser certaines limites identifiées à la section précédente. Et si, sur cette base, elle peut servir de fondement à une modélisation du processus de croissance qui fait apparaître le rôle de l'énergie. Cette section est structurée en quatre points.

Dans un premier temps, nous montrons que la distinction entre richesse et valeur permet aux classiques et Marx de ne pas confondre les dimensions monétaires et physiques de la production (2.1.). Ces deux dimensions présentées, la seconde sous-section présente l'articulation entre le monde monétaire et le monde physique opérée par la théorie de la valeur travail. En effet, pour les classiques et Marx, le temps de travail incorporé structure la valeur relative des marchandises. A partir de l'interprétation roubinienne de la théorie de la valeur de Marx, nous présentons une démonstration hypothético-déductive de cette thèse. Sur cette base, nous discutons la critique pour substantialisme portée par une partie de l'économie écologique (Hornborg, 2014) mais aussi de l'hétérodoxie française (Orléan, 2011a). Dans un troisième temps, nous examinons la validité de la valeur travail. Après avoir examiné les critiques relatives à la transformation des valeurs en prix de production, nous présentons la manière dont les travaux empiriques proposent d'y répondre (2.3.). Sur cette base, nous montrons comment cette théorie des prix relatifs peut être mobilisée pour identifier des canaux par lesquels l'énergie affecte la dynamique d'accumulation (2.4.).

2.1. Une distinction rigoureuse entre monde physique et monde monétaire : de l'importance des concepts de valeur et de richesse

Pour les classiques et Marx, les biens et services que nous consommons ont une double dimension : ils sont utiles, satisfont un besoin, en ce sens, ce sont des valeurs d'usage qui ont une existence matérielle. Cependant, certains de ces biens et services ont également une valeur économique (ou valeur d'échange) puisqu'ils ont une expression monétaire.

Dans un premier temps, nous montrons que, chez les classiques, le monde physique est bien présent. L'étude de la production de richesses en témoigne : il existe bien des « lois naturelles » qui contraignent la production des valeurs d'usage. L'utilisation du temps de travail comme étalon pour mesurer l'importance de ces contraintes ne doit pas amener à conclure que seul le facteur travail crée la richesse (2.1.1.).

Dans un second temps, nous spécifions l'origine du monde monétaire. En effet, l'existence de l'espace de la valeur est un préalable à la compréhension de la formation des prix. L'un des apports de Marx est d'avoir montré que le monde monétaire résulte d'un rapport social historiquement situé, l'économie marchande, ce qui n'est pas le cas des classiques anglais qui naturalisent cette structure économique (2.1.2).

2.1.1. Le monde physique : le travail et la nature comme sources de la richesse matérielle

Pour Marx, les deux sources de la richesse sont le travail et la nature. Les valeurs d'usage ne sauraient provenir de la seule dépense en travail. Une production sans ressources naturelles est tout simplement impossible puisque le travail ne fait que transformer de la matière et de l'énergie qu'il a captées dans l'environnement. Marx utilise le concept de procès de travail pour décrire cette relation au cours de laquelle le travailleur mobilise les ressources naturelles et utilise gratuitement les services écosystémiques que les humains n'ont pas eu à produire. De même que la nature est indispensable, le travail l'est tout autant, car la plupart des valeurs d'usage exigent un minimum de travail humain.

« Toile ou habit, n'importe quel élément de la richesse matérielle non fourni par la nature, a toujours dû son existence à un travail productif spécial »

*ayant pour but d'approprier des matières naturelles à des besoins humains.
En tant qu'il produit des valeurs d'usage, qu'il est utile, le travail,
indépendamment de toute forme de société, est la condition indispensable
de l'existence de l'homme, une nécessité éternelle, le médiateur de la
circulation matérielle entre la nature et l'homme »
(Marx, [1867], p.16).*

Le travail n'est donc pas la seule source de la richesse, la nature est tout aussi importante. Marx est très clair sur ce point et avait dû, en son temps, corriger des erreurs au sein de son propre camp : « Le travail n'est pas la source de toute richesse. La nature est tout autant la source des valeurs d'usage (qui sont bien, tout de même, la richesse réelle !) que le travail, qui n'est lui-même que l'expression d'une force naturelle, la force de travail de l'homme » (Marx, 1875).

Une source de confusion tient au fait que les classiques considèrent, par ailleurs, que les différentes valeurs d'usage peuvent être agrégées à partir d'une unité : le temps de travail. Dans cette perspective, les machines et les ressources naturelles ne disparaissent pas de l'analyse mais sont comptabilisées à partir du temps de travail qu'elles ont nécessité. Les éléments comme le rayonnement solaire, la fertilité des sols, le captage du CO₂ par les arbres, par exemple, bien qu'indispensables au système de production, ne requièrent aucun travail humain. A l'inverse, bien que l'énergie comme le pétrole ait été produite gratuitement par la nature, sa mise à disposition suppose du travail humain (extraction, raffinage). Elle nécessite du travail, de même des machines qui ne nous sont pas données gratuitement. Énergie et machines peuvent donc être comptées comme du travail : elles incorporent une certaine quantité de travail dépensée par le passé. Pourquoi retenir un tel étalon de mesure ?

Une justification possible consiste à dire que le temps de travail dépensé mesure la difficulté à produire une marchandise du point de vue des sociétés humaines. Pour les théoriciens de la valeur travail, le temps de travail ne doit pas être envisagé (seulement) comme un facteur de production mais comme une *métrique* : certains biens incorporent une quantité de travail supérieure à d'autres, en ce sens, ils sont plus coûteux aux sociétés humaines. Les inventions techniques et la captation des forces physiques de la nature permettent d'augmenter la puissance productive du travail humain. Que ce soit la division du travail chez Smith, ou le machinisme chez Marx, les hommes parviennent à trouver des

méthodes de production plus économes en travail. Ils parviennent progressivement à réduire les contraintes naturelles et augmentent la quantité de valeurs d'usage à leur disposition.

Ainsi, dire que les valeurs d'usage représentent une certaine quantité de travail ne revient pas à conclure que seul du travail humain a participé à la création de ces valeurs d'usage. Il y a là un contresens important. Dans cette comptabilité, la nature n'est comptée que lorsque sa mise à disposition nécessite du travail humain. La question fondamentale est alors de savoir si cette comptabilité en unité physique permet de dire quelque chose sur le niveau des prix relatifs (section 2.2.). Avant d'aborder cette question, voyons comment les classiques et Marx analysent le monde monétaire.

2.1.2. Le monde monétaire : la valeur comme produit des rapports sociaux marchands

L'absence d'analyse du monde monétaire est une des fragilités des travaux néo-physiocratiques identifiées dans la section précédente. Plus précisément, les raisons pour lesquelles les biens et services prennent une expression en monnaie ne sont pas analysées. Pourquoi les différentes valeurs d'usage ont-elles une valeur d'échange ? La réponse à cette question conduit à distinguer Marx des classiques anglais.

Pour Smith et Ricardo, l'existence d'un espace de la valeur (l'unité monétaire) découle de la fable du troc. La division du travail et la spécialisation conduiraient à une difficulté croissante à échanger les produits. Le passage à un bien faisant office d'unité de compte résoudrait le problème de la double coïncidence des désirs. Cette thèse ne résiste toutefois pas aux faits : des économies de troc n'ont jamais pu être observées (Graeber, 2016). On doit notamment à Marx d'avoir montré que la forme monétaire provient de rapports sociaux spécifiques : les rapports marchands.

En effet, chez Marx, l'économie marchande n'est pas un invariant historique qui découle du penchant naturel des hommes à trafiquer (Smith, 1776), mais une construction socio-historique particulière. Les producteurs y sont séparés les uns des autres au sens où chacun d'eux décide souverainement ce qu'il produit et comment. Cette indépendance est toute relative puisque, du fait de la division du travail, ils doivent se procurer auprès des autres

les valeurs d'usage qu'ils ne produisent pas. La singularité de cette forme sociale tient au fait que ces échanges impliquent *la monnaie*.

Cette spécificité provient de la coordination des activités productives qui n'est pas réalisée en amont mais, a posteriori, lors de l'échange. Là où, dans une famille ou toute autre organisation, on décide d'abord collectivement des valeurs d'usage à produire puis, dans un second temps, de comment produire et répartir, en économie marchande le cheminement est inverse : chacun produit « dans son coin » puis les valeurs d'usage sont mises sur le marché et trouveront, éventuellement, preneur. La validation sociale de ce qui est produit a lieu après l'acte de production. Par leurs arbitrages et leurs actes d'achat, les individus jugeront utiles ou non ce qui a été produit. Pour reprendre la terminologie marxiste, c'est lors de l'échange que le travail concret privé des producteurs, déjà dépensé, devient du travail social, reconnu comme ayant de la valeur. L'économie marchande tire sa spécificité de sa manière décentralisée de valider ce qui est produit.

Pour exister, cette organisation sociale nécessite la monnaie. Pour paraphraser André Orléan et Michel Aglietta, « il n'est d'économie marchande que monétaire » (Aglietta et Orléan, 2002, p.35). En effet, sans unité de compte communément admise, des biens et services, qualitativement différents, ne peuvent être rendus quantitativement commensurables. Sans cet espace de commensurabilité institué par la monnaie, l'expression des préférences individuelles ne saurait se déployer pour valider socialement la production réalisée. Comme le résume Roubine ([1928]) :

« Tous les modes de répartition du travail social ne donnent pas au produit du travail la forme valeur ; le seul à le faire est ce mode où la répartition du travail n'est pas organisée directement par la société, où la régulation se fait de façon indirecte par l'intermédiaire du marché et de l'échange des objets »
(Ibid, p. 60).

La monnaie est indispensable à la coordination marchande, raison pour laquelle une économie marchande développée de troc n'a jamais pu être observée. Les épisodes de troc en Russie, observés dans les années 1990 par exemple, n'ont rien à voir avec le troc théorique de la fable smithienne puisque « le rouble [reste] l'unité de compte socialement reconnue en laquelle s'expriment ces marchandises » (Ould-Ahmed, 2008, p.161) . David Graeber fait une

observation similaire lorsqu'il explique qu'au « Moyen Âge par exemple, tout le monde continuait à estimer la valeur des outils et du bétail dans la vieille monnaie romaine, même si les pièces avaient cessé de circuler » (Graeber, 2016, p.57). Ce qu'on appelle valeur économique est donc un nouvel espace de mesure, créé par l'unité de compte et s'accommode très bien d'une diversité d'instruments de paiement. L'existence de la monnaie en économie marchande ne résulte donc pas d'une fonction instrumentale visant à « rendre plus aisée les transactions » (Orléan, 2008, p.62) mais du fait que le marché ne peut fonctionner sans unité de compte.

En résumé, Marx et les classiques identifient bien deux mondes distincts. D'un côté, le monde physique où le travail, en interaction avec la nature, produit des valeurs d'usage. La nature impose ses contraintes aux sociétés humaines qui peuvent parvenir à les alléger avec l'usage de la technique. Ces contraintes naturelles peuvent être appréciées à partir du temps de travail nécessaire (direct et indirect) à la production d'un bien. De l'autre, un monde monétaire (ou monde marchand) où les marchandises vont nécessairement, du fait du type de coordination à l'œuvre dans cette organisation sociale, prendre une forme monétaire. Cette dualité est explicite chez Marx :

*« Il va de soi que la forme déterminée de la production sociale ne supprime nullement cette nécessité de la répartition du travail social en proportions déterminées : c'est la façon dont elle se manifeste qui peut seule être modifiée. Des lois naturelles ne peuvent pas être supprimées absolument »
(Marx cité par Roubine, 1928, p.117).*

Le monde physique et ses contraintes sont donc plus que présents. Le fait que 10 heures de travail physiologique soient nécessaires pour produire une paire de chaussures est une vérité, que l'on soit en économie marchande ou planifiée. La différence tient à ce que, dans la forme sociale organisée, l'échange des 10 heures de cordonnier avec celle de x heures d'un boucher sera le fruit d'une règle à priori, là où, en économie marchande, cette mise en équivalence sera réalisée lors de l'échange. Le marché viendra reconnaître la valeur du travail dépensé par le producteur à un certain prix par rapport à celui des autres.

Il reste donc à savoir à quel niveau le marché valide le travail des uns et des autres. Se poser cette question implique de passer de la question de la valeur (l'existence de la forme prix, laquelle découle du *rapport marchand*) à celle de sa grandeur (le niveau des prix relatifs).

2.2. L'articulation entre monde physique et monde monétaire : le travail incorporé comme déterminant du prix relatif des marchandises

Alors que le point précédent a permis de voir que la valeur était toujours exprimée en monnaie, il reste à comprendre de quelle manière quantité de travail incorporée et quantité de monnaie sont liées. Pour les théoriciens de la valeur travail, la valeur d'une marchandise est déterminée par le travail incorporé lors de sa production¹³⁷. Comment les classiques et Marx parviennent-ils à cette conclusion ? Est-ce que cette théorie vient nier le rôle de l'échange marchand ?

Adam Smith est le premier à envisager la valeur comme étant liée à la quantité de travail. Au chapitre 6 de la *Richesse des Nations* (Smith, 1776), il explique que :

« Dans ce premier état informe de la société, qui précède l'accumulation des capitaux et l'appropriation du sol, la seule circonstance qui puisse fournir quelque règle pour les échanges, c'est, à ce qu'il semble, la quantité de travail nécessaire pour acquérir les différents objets d'échange. Par exemple, chez un peuple de chasseurs, s'il en coûte habituellement deux fois **plus de peine** pour tuer un castor que pour tuer un daim, naturellement un castor s'échangera contre deux daims ou vaudra deux daims. Il est naturel que ce qui est ordinairement le produit de deux jours ou de deux heures de travail, vaille le double de ce qui est ordinairement le produit d'un jour ou d'une heure de travail. »
(Smith, 1776, p.65, mis en gras par l'auteur)

Dans la citation, la motivation de Smith à sélectionner le travail comme unité de compte pertinente est explicite : cette unité rend compte de *la peine* qu'ont les humains à produire des biens et des services dans le monde physique (cf. 2.1.1.). Plus cette peine sera importante, plus la valeur sera importante, nous dit Smith. La valeur travail peut ainsi s'analyser comme une hypothèse selon laquelle la difficulté à produire, du point de vue des

¹³⁷ A ce stade de l'analyse nous faisons abstraction des différences entre Smith, Ricardo et Marx.

humains, est déterminante dans la valeur respective des objets produits. On aurait ici une sorte de théorie *pure* des coûts de production, au sens de « ce qu'il en coûte » comme effort pour les humains¹³⁸. Le raisonnement de Smith est ici purement spéculatif et se passe, à l'instar de la fable du troc, de toute forme de démonstration empirique. De plus, ce postulat revient à faire de la valeur une substance préexistant aux échanges¹³⁹.

Une autre manière d'aboutir à ce résultat est l'usage de la méthode hypothético-déductive. Dans ce cas, le chercheur formule un idéal-type de l'économie marchande¹⁴⁰ et, sous la base de certaines hypothèses, tente de déduire un niveau des prix relatifs. C'est la démarche retenue par Isaak Roubine¹⁴¹ (1928) dont nous présentons l'interprétation de la théorie de la valeur de Marx. La démonstration de Roubine se déroule en deux temps. Dans un premier temps, Roubine montre comment le travail physiologique (la quantité de travail incorporée) est validé lors de l'échange. L'échange donne la valeur monétaire à ce travail qui devient, selon les termes de Marx, « abstrait¹⁴² » (2.2.1.). Dans un second temps, Roubine montre un autre mouvement : les producteurs vont allouer le travail entre les branches sur la base des prix. C'est ce second mouvement qui permet d'envisager une certaine régularité entre quantité de travail incorporé et valeur d'une marchandise sans tomber dans le substantialisme (2.2.2.). Cette interprétation nous permet de discuter les accusations de substantialisme dont la théorie de la valeur fait l'objet, que ce soit par l'économie écologique (Hornborg, 2014) ou de l'hétérodoxie française (Orléan, 2011a).

¹³⁸ Le coût pour les éco-systèmes n'a ici aucune forme de pertinence : ce qui compte est la peine des hommes. En ce sens, cette théorie peut être qualifiée d'anthropocentrée.

¹³⁹ Une théorie est dite de substantialiste dès lors qu'elle considère une certaine substance (ici le temps de travail mais cela peut être l'énergie, cf. supra) comme étant la source de la valeur économique. Elle présenterait ainsi le défaut de nier les relations d'échange sur le marché (la valeur pourrait être « dite » avant même le déroulement de l'échange), au point de pouvoir se passer de l'analyse du rapport monétaire.

¹⁴⁰ De la même manière que les néoclassiques utilisent un idéaltype du marché concurrentiel, la concurrence pure et parfaite, pour aboutir à la conclusion que les prix correspondent à la productivité marginale.

¹⁴¹ Isaak Roubine (1886-1937) était un économiste russe spécialiste de la théorie de la valeur. Voir en particulier son *Essai sur la théorie de la valeur* (1928) réédité en français, en 2009, par les éditions Sillepse.

¹⁴² Le travail est abstrait de ses spécificités concrètes et, de ce fait, rendu comparable, commensurable aux autres travaux concrets dans une unité commune : la monnaie.

2.2.1. L'abstraction du travail abstrait lors de l'échange

Chez Ricardo, tout travail dépensé est créateur de valeur, il est donc correct de parler de substantialisme : le travail incorporé dans les marchandises nous donne les prix relatifs. La valeur est déterminée par une substance qui préexiste aux échanges (Orléan, 2011a) de sorte que cette théorie paraît impropre à décrire une économie marchande où le rôle des marchés dans l'établissement des prix est central :

*« Pour les classiques ou les néo-classiques, mais aussi pour Marx, la valeur précède logiquement la monnaie. Leur démarche est la suivante : penser la commensurabilité comme l'effet d'une substance commune à toutes les marchandises – soit le travail, soit l'utilité – à partir de quoi il est possible de déterminer dans quels rapports quantitatifs les marchandises s'échangent les unes contre les autres, cette analyse de la valeur ayant pour caractéristique d'être menée hors de toute présence monétaire »
(Entretien d'A.Orléan par Benquet et Sobel, 2019, p.22)*

Pour Orléan, mais également Hornborg ou encore Røpke (2021), Marx ne serait qu'un continuateur de Ricardo et sa théorie tomberait sous le coup de la même critique. Par exemple, dans une réponse à Pirgmaier (2021) qui tentait de réhabiliter la valeur travail de Marx au sein de l'économie écologique, Røpke explique :

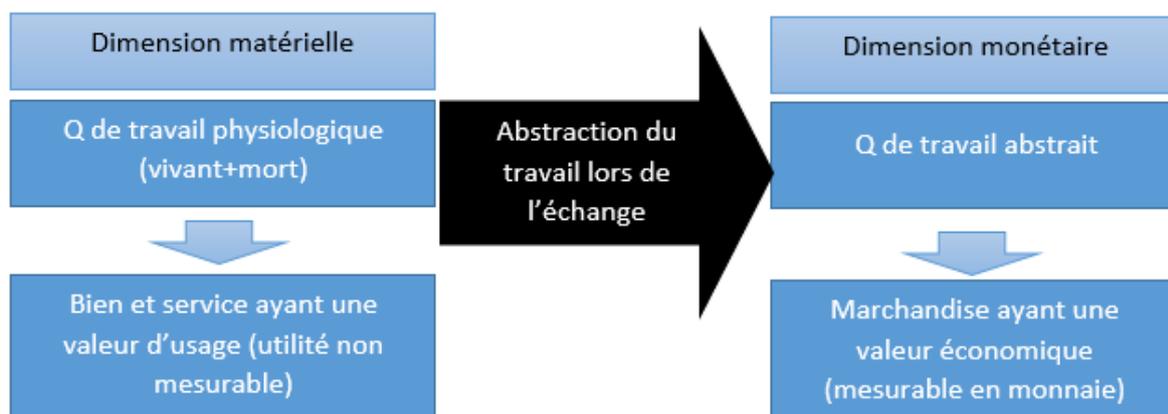
*« I find no reason why commodities should need any common element or quality to be exchanged on markets. It can be observed empirically that goods are bought and sold in markets and that relative prices are formed, but it is far from obvious that the formation of these prices, directly or indirectly, depends on any shared essence, substance, or quality. The only thing they share is the fact that they are exchanged on markets and, therefore, are assigned prices. »
(Røpke , 2021, p.2)*

Cependant, pour Marx, le travail d'une marchandise n'est pas spontanément créateur de valeur. Il n'y a pas de substance qui conférerait de la valeur indépendamment du marché. En témoigne sa métaphore du « saut périlleux » (Marx, [1867], p.44) de la marchandise qui montre que la validation du travail dépensé n'est jamais garantie (Harribey, 2013). Non seulement la marchandise peut ne pas trouver preneur (prix nul) mais, même si cela était le cas, rien ne garantit que cette validation soit proportionnelle au temps de travail

physiologique qui a été engagé. C'est la raison pour laquelle Marx forge le concept de travail abstrait que « la majorité des auteurs ont compris de façon simpliste [...] en le ramenant à un travail physiologique » (Roubine, [1928], p.183). Cette notion mérite donc d'être explicitée car elle est au cœur des confusions.

Marx prend soin de distinguer la dimension technico-matérielle du processus de production et sa dimension sociale. La production au sens matériel dépend du développement des forces productives qui permet de consacrer plus ou moins de travail physiologique par marchandise. Ce travail est également concret car il admet certaines spécificités selon la branche dans laquelle il est dépensé. Par exemple, le travail vivant du boucher est qualitativement différent de celui du cordonnier, de même du travail mort (pas les mêmes équipements) que chacun d'eux mobilise. Lors de la vente sur le marché, toutefois, ces produits acquièrent une valeur monétaire et sont mis en équivalence et ainsi le travail engagé. Le travail abstrait désigne la quantité de travail qui est validée.

Prenons un exemple. Admettons qu'un cordonnier ait mobilisé 5 heures de travail pour produire 1 paire de chaussures et qu'il en va de même pour le boucher pour produire 10 steaks. Si on suit une interprétation mécanique de la valeur-travail, on devrait avoir un prix relatif tel que 1 paire de chaussures = 10steaks puisque les prix découlent du travail incorporé. Mais si on suit Marx, on peut tout à fait avoir 1 paire de chaussures = 20steaks, ce qui en l'espèce signifie que 1h de travail engagé dans la production de chaussures a été deux fois mieux valorisée que l'heure engagée dans l'activité bouchère. On dira alors qu'une paire de chaussures et 20 steaks représentent une quantité de travail abstrait identique, ou encore que l'heure de travail de cordonnier représente deux fois plus de travail abstrait que celle du boulanger. Le concept de travail abstrait est donc clef et ne saurait être confondu avec le travail physiologique engagé. Il n'y a pas de divergence entre valeur monétaire et travail abstrait puisque le travail abstrait est validé par l'acte d'échange. En revanche, il peut y avoir divergence entre quantité de travail abstrait et quantité de travail physiologique (figure 32).

Figure 32. **Le processus d'abstraction du travail concret.**

Source : auteur.

2.2.2. Des régularités dans la quantité de travail abstrait

Une question surgit nécessairement s'il n'y a pas de lien direct entre la quantité de travail physiologique dépensée et la valeur : pourquoi parler de travail abstrait ? Quelle est l'utilité d'un tel concept ? « Pourquoi est-ce du travail abstrait plutôt que de l'utilité abstraite ou toute autre abstraction ? » (Orléan, 2011b). Orléan ajoute qu'on ne peut pas à la fois reconnaître le rôle de l'échange dans la formation des prix et en même temps défendre le travail incorporé. Entre l'échange et le travail, il faudrait choisir. Pour répondre à Orléan, il importe donc de montrer deux choses :

- Montrer qu'il existe une régularité entre quantité de travail physiologique engagé et travail abstrait validé
- Montrer que cette régularité ne conduit pas à nier l'importance du cadre marchand et l'acte d'échange

C'est précisément à ces deux objections que répond le travail de Roubine :

« En économie marchande, l'égalité sociale de deux dépenses de travail, ou leur égalité sous la forme de travail abstrait, s'accomplit par l'intermédiaire du procès d'échange. Mais cela ne nous empêche pas de mettre en évidence une série de propriétés quantitatives qui caractérisent le travail sous ses aspects matériel-technique et physiologique, et qui influencent de façon causale la détermination quantitative du travail abstrait avant l'acte d'échange et indépendamment de celui-ci. [...] Les plus importantes de ces

propriétés sont : 1) la durée de la dépense de travail, ou la quantité de temps de travail ; 2) l'intensité du travail ; 3) la qualification du travail ; et 4) la quantité de produits fabriquée par unité de temps »
(Roubine, 1928, p.206).

Pour Roubine, opposer le travail physiologique et l'échange comme deux sources irréconciliables de la valeur serait incorrect. D'après lui, le fonctionnement marchand conduit à une certaine régularité entre travail incorporé (le travail physiologique effectivement dépensé) et travail abstrait (la quantité de valeur à laquelle se travail donne droit). Prenons chacune des caractéristiques mentionnées par Roubine pour s'en convaincre :

1) *La durée du travail.* D'après Roubine, un travail concret long est réputé créer plus de valeur qu'un autre travail concret d'une durée plus courte. Cette affirmation ne vaut pas adhésion au substantialisme car on peut aussi l'envisager comme une régularité résultant des rapports sociaux marchands. En effet, dans une économie marchande, si deux produits différents nécessitent le même temps de travail (admettons produire 1 kilo de froment et 1 kilo de fer) et que les prix diffèrent (10€ pour le premier, 5€ pour l'autre), il est raisonnable de penser que du travail sera réalloué. En effet, aucun producteur n'accepterait de continuer à produire du fer, s'il est en mesure de valoriser deux fois mieux son travail en le réallouant dans la production de froment. Du travail est donc déplacé de la production de froment vers celle de fer jusqu'à ce que les prix relatifs correspondent au contenu relatif en travail. En effet, ce n'est qu'à ce niveau que les producteurs deviennent indifférents entre produire du fer ou du froment. Bien entendu, ce mécanisme suppose que le producteur en question puisse réallouer son travail d'un secteur à un autre, ce qui n'est pas toujours le cas (barrières à l'entrée, temps et coût de la formation). Mais si l'on fait abstraction de ces imperfections, une durée de travail concret plus longue s'accompagnera d'une quantité de travail abstrait plus importante. Ainsi, tendanciellement, en économie marchande, la valeur unitaire diminue à mesure que la productivité physique du travail progresse.

2) *L'intensité du travail.* « Le travail plus intensif est reconnu égal au travail plus prolongé » (Roubine, 1928, p.207). Là où la durée du travail était une variable

extensive, l'intensité du travail est sa version intensive. Cette convention sociale n'est pas décrétée par le chercheur en sciences sociales mais est une conséquence de la coordination marchande. Si l'intensité n'était pas valorisée par le marché, il n'y aurait aucune incitation marchande à intensifier le travail. Les producteurs qui fournissent un travail plus intensif ne se fatigueraient pas dans les branches intensives, ils réalloueraient leur travail vers les branches moins intensives pour percevoir la même valeur.

- 3) *La qualification du travail.* Une quantité d'heures de travail qualifié est réputée créer plus de valeur qu'une même quantité d'heures de travail peu qualifié. Nous avons vu précédemment que deux travaux concrets de même durée tendent à recevoir la même valeur, sinon du travail serait réalloué. Cependant, cette réallocation suppose que le travail soit redéployable, ce qui est plus facilement vérifié pour un travail dit simple. Ce raisonnement n'est toutefois pas valable lorsque des qualifications spécifiques sont en jeu. Le fait que les heures de travail qualifié créent plus de valeur est, là encore, lié à la manière d'allouer le travail dans le cadre marchand.
- 4) *La quantité de produits fabriquée par unité de temps.* Alors que, dans les trois cas précédents, les travaux considérés appartenaient à des branches différentes, ce dernier cas concerne le travail engagé au sein d'une même branche. Dans une branche donnée, une durée plus longue de travail n'est pas réputée créer plus de valeur car il existe une norme de productivité. Le cordonnier qui met 10 heures à faire la chaussure ne crée pas deux fois plus de valeur que celui qui en met 5. Si la majorité des cordonniers de cette branche parviennent à produire en 5 heures, alors les 10 heures de travail du cordonnier peu productif seront valorisées de la même manière que les 5 heures des autres cordonniers. Ses heures de travail vaudront deux fois moins de travail abstrait que celles des autres. Là encore, la coordination marchande est à l'origine de ce résultat : si le marché ne valorisait pas le travail des cordonniers de la sorte, il n'y aurait aucune incitation à améliorer la productivité physique du travail.

Ainsi l'objection d'André Orléan, consistant à dire que « la théorie de la valeur-travail marxiste ne peut être considérée comme établissant un lien entre prix et conditions de production [...] qu'à la condition qu'on sache passer du travail concret au travail abstrait – ce qui n'est pas le cas car c'est l'échange seul qui opère cette réduction » (Orléan, 2017, p.14), paraît exagéré. La lecture roubinienne que nous venons de présenter montre précisément l'inverse. Une quantité de travail concret est rendue abstraite lors de l'échange (figure 32) mais il ne faut pas oublier un deuxième mouvement (figure 33) : les producteurs décident d'allouer le travail sur la base des prix actuels et anticipés¹⁴³. En effet, en économie marchande, les producteurs comparent en permanence la valorisation de leur travail sur le marché (le travail abstrait) aux conditions techniques (le travail physiologique qu'ils doivent engager). C'est ce comportement¹⁴⁴, produit des structures de l'économie marchande, qui conduit à une égalisation tendancielle du ratio entre $\frac{\text{travail abstrait}}{\text{travail physiologique}}$ entre les branches. Il paraît à ce titre délicat de soutenir comme Orléan que l'analyse de la valeur se fait « en dehors de toute présence monétaire » puisque l'arbitrage mis en évidence suppose de connaître la quantité de travail abstrait, donc d'utiliser une unité de compte, la monnaie. Les producteurs comparent, en définitive, le taux horaire (€/h) qu'ils peuvent obtenir dans les différentes branches de la production.

Par exemple, lorsque la productivité du travail d'une branche s'améliore, toutes choses égales par ailleurs, l'heure de travail dépensée dans cette branche se retrouve soudainement mieux valorisée (le ratio $\frac{\text{travail abstrait}}{\text{travail physiologique}}$ augmente). Les producteurs des autres branches repèrent progressivement cette différence et réallouent leur travail en conséquence : du travail arrive dans cette branche et quitte les autres. Cette réallocation produit un mouvement des prix relatifs qui cesse lorsque la valorisation du travail entre les différentes branches est redevenue égale (même ratio travail abstrait/travail physiologique). Par ce mécanisme, quantité de travail physiologique et quantité de travail abstrait tendent à évoluer dans le même sens. Dans cette forme stylisée de l'économie marchande, les conditions techniques de

¹⁴³ Il paraît à ce titre délicat de soutenir comme Orléan que l'analyse de la valeur se fait « en dehors de toute présence monétaire » puisque cet arbitrage suppose de connaître la quantité de travail abstrait, donc d'utiliser une unité de compte, la monnaie. Les producteurs comparent, en définitive, le taux horaire (€/h) qu'ils peuvent obtenir dans les différentes branches de la production.

¹⁴⁴ Couplées aux hypothèses de mobilité parfaite entre les branches, d'absence d'imperfection dans la possibilité de se former.

la production, et à travers elles le monde physique, sont un déterminant des prix relatifs. Pour le dire autrement, les valeurs travail représentent une situation où les prix relatifs sont l'expression pure des conditions techniques.

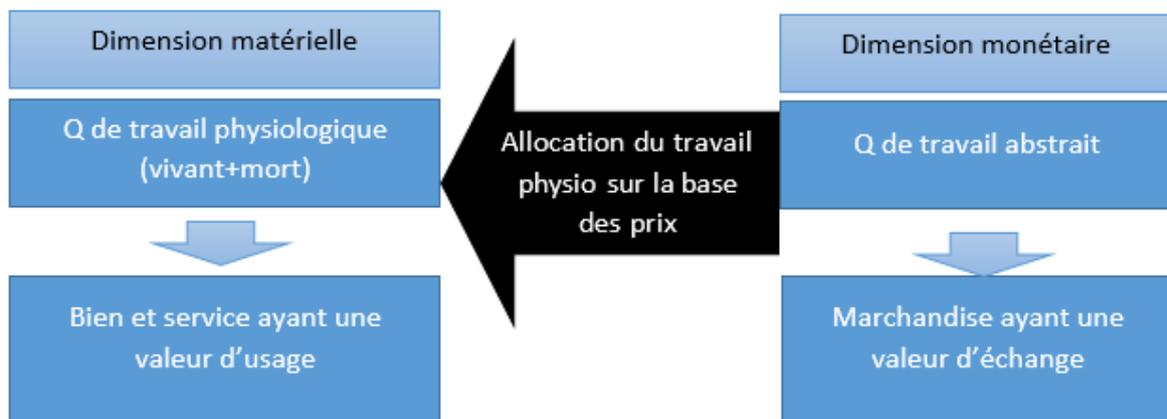


Figure 33. **La valeur : un processus d'allocation du travail entre les branches.**
Source : auteur.

Cette « loi de la valeur » n'est que tendancielle. Les conditions techniques ne sont l'unique déterminant des prix que dans un modèle abstrait où la mobilité du travail entre les branches est parfaite, instantanée, où les producteurs ont accès à l'information, à la technologie, aux différentes compétences de manière égale et sans délais. Cette situation est un idéal-type, au sens wébérien (Weber, 1922), où les rapports de pouvoir sont neutralisés par la concurrence entre producteurs directs. De fait, ce modèle n'est jamais observé dans sa pureté : certains acteurs ont une avancée technologique dans une branche, certains monopolisent certaines compétences, les réallocations entre les branches prennent du temps. Toutes ces situations font que les prix relatifs n'ont pas de raison de correspondre exactement à la quantité de travail incorporée. Certains producteurs peuvent ainsi acquérir un droit de prélèvement sur le travail total supérieur à celui qu'ils ont engagé (ratio $\frac{\text{travail abstrait}}{\text{travail physiologique}}$ supérieur aux autres branches) mais, nécessairement et symétriquement, d'autres reçoivent

moins que ce qu'ils ont dépensé (ratio $\frac{\text{travail abstrait}}{\text{travail physiologique}}$ inférieur). On parle alors « d'échange inégal »¹⁴⁵, phénomène normal qui renvoie aux rapports de force.

Il est donc possible de reconnaître que, tendanciellement, la quantité de travail physiologique détermine le prix des marchandises, sans pour autant être taxé de substantialisme. Une interprétation non mécaniste mais sociologique¹⁴⁶ de la relation entre contenu en travail et valeur est ainsi possible. Prenons à titre de comparaison la relation entre origine et destinée sociales chez Bourdieu et Passeron (1970). L'origine sociale n'est pas officiellement instituée comme critère de la réussite scolaire, et pourtant, tout se passe « comme si » elle causait la trajectoire scolaire. De même, chez Roubine, le travail n'est pas officiellement institué comme source de la valeur et pourtant, tout se passe « comme si » il causait la quantité de valeur réalisée. La reproduction sociale est une régularité statistique, fruit des rapports sociaux, et l'on sait que tous les fils d'ouvriers ne deviennent pas systématiquement ouvriers. De même dans le raisonnement de Roubine, la relation entre contenu en travail et prix relatifs provient du rapport marchand (concurrentiel) et n'est perçue que comme tendancielle¹⁴⁷.

En résumé, l'interprétation roubinienne permet de penser à la fois l'existence de la valeur (la forme monétaire) et la quantité de valeur (la valeur d'échange des marchandises) grâce au concept de travail abstrait. Elle se prémunit ainsi de l'écueil ricardien d'une substance sans forme et, symétriquement, de l'écueil orléanien d'une forme sans substance¹⁴⁸ (Lipietz, 1983 ; Salama et Tran, 1992). Là où le substantialisme fait l'impasse sur la spécificité des rapports sociaux marchands (l'économie marchande est perçue comme naturelle), le formalisme tend à exclure le monde matériel (l'étalon se suffit à lui-même). Par exemple, le formalisme n'a rien à dire sur « pourquoi les tomates en grappe valent [...] 4,50 euros le kilo,

¹⁴⁵ Toute une littérature marxiste développe ce concept pour analyser les échanges internationaux et les sous-développements (Amin, 1988 ; Emmanuel, 1969).

¹⁴⁶ Sociologique fait ici référence à la méthode développée notamment par Marx et qui consiste à interpréter les phénomènes sociaux comme le produit de structures sociales (ici le rapport marchand) historiquement données.

¹⁴⁷ Cette analogie néglige un élément, la théorie de Bourdieu et Passeron se fonde sur le constat d'une régularité constatée statistiquement qui, jusqu'à présent dans notre thèse, n'a pas été présenté. Ces éléments sont discutés en section 2.3.

¹⁴⁸ Ainsi Lordon et Orléan expliquent : « Paraphrasant Marx, nous pouvons écrire : « Nous connaissons maintenant la substance de la valeur : c'est la monnaie. Nous connaissons maintenant la mesure de sa quantité : c'est la quantité de monnaie » (Lordon et Orléan, 2007).

et pourquoi un sac à main de luxe vaut-il 600 euros ? »¹⁴⁹ (Cordonnier, 2012). La référence au travail offre un début de réponse car elle tente de définir ce que seraient des prix purement techniques (ou « prix naturels » dans la taxinomie classique) qui servent d'*ancrage* aux prix de marché, et autour desquels ces derniers gravitent. Ainsi, la dimension monétaire de la production et la dimension physique (contraintes naturelles et développement technologique) sont bien articulées par ce cadre de pensée.

Ces prix naturels pourront être par la suite utilisés dans des modèles théoriques¹⁵⁰ (afin d'analyser le processus de croissance économique) pour étudier la manière dont l'énergie peut être un facteur limitant (cf. 2.4). A l'inverse, l'abandon de la théorie de la valeur travail par l'école de la régulation¹⁵¹ présente le risque de négliger que « les conditions de production déterminent largement les rapports des prix [...], et que la formation des prix relatifs influence les modalités d'accumulation du capital » conclut Montalban (2012, p.19).

Avant d'en venir à la modélisation, deux difficultés doivent être prises en compte. Tout d'abord, le résultat – prix correspondants aux valeurs travail – a été obtenu pour un idéaltype d'économie marchande constituée de producteurs indépendants. Par définition, ce cadre a fait abstraction d'un autre rapport de production fondamental : le salariat ou rapport capital-travail. Par ailleurs, la validité empirique de la théorie de la valeur travail doit être discutée.

2.3. La validité de la valeur travail en débat : prix de production et estimations empiriques

Dans un idéal-type où le rapport salarial est intégré à l'analyse, un profit capitaliste apparaît. On appelle prix de production le prix de vente d'une marchandise intégrant un profit capitaliste normal. Dans la première partie de cette sous-section, nous rappelons que prix de production et valeurs travail¹⁵² sont nécessairement divergents du fait de l'égalisation des

¹⁵⁰ Par exemple, les conclusions de Ricardo quant à l'état stationnaire sont déduites d'un modèle faisant usage de la théorie de la valeur incorporé. Voir section 2.4.

¹⁵¹ Illustré par le choix d'Aglietta de développer l'approche monétaire avec Orléan à partir de 1982 (Aglietta et Orléan, 1982).

¹⁵² C'est-à-dire un prix qui correspond exactement au travail incorporé dans la marchandise considérée.

taux de profit (2.3.1.) Dans un second temps, nous suivons Anwar Shaikh pour considérer que l'appréciation de cette divergence est une question d'ordre empirique, ce qui nous conduit à examiner les travaux ayant une dimension empirique (2.3.2.).

2.3.1. Des valeurs travail aux prix de production : le problème de la transformation

Comme détaillé dans la section précédente, pour les classiques et Marx, les valeurs travail sont perçues comme les prix naturels autour desquels gravitent les prix de marché. Cependant, ces conclusions théoriques valent dans le cadre d'un idéal-type d'économie marchande où les travailleurs réallouent directement le travail entre les différentes branches de la production. Or, l'économie capitaliste se caractérise par un second rapport social : le salariat. Ce ne sont plus les travailleurs directs qui décident de l'allocation du travail entre les différentes branches de la production, mais des capitalistes qui ne travaillent pas. De plus, ces capitalistes reçoivent une partie de la valeur créée sous la forme de profit que Marx caractérise d'exploitation du travailleur (voir encadré).

Encadré 2 : l'exploitation du travailleur chez Marx

Si on admet la théorie de la valeur travail, une énigme persiste : le capitaliste avance une certaine quantité de travail, il achète des matières premières et des machines qui représentent une certaine quantité de travail passée (travail mort), il emploie des salariés dont la rémunération représente une certaine quantité de travail (incorporée dans les biens de subsistance). Cependant, après le processus de production, il y a apparition d'un surplus en travail (le profit). D'où vient ce travail supplémentaire qui s'ajoute au travail nécessaire ? Cela ne peut pas venir des machines qui représentent déjà une quantité de travail passée. Les heures de travail qu'elles incorporent sont donc intégrées au produit final. En revanche, la force de travail présente une caractéristique singulière : elle nécessite une quantité de travail pour assurer sa reproduction matérielle (qu'il faudra nécessairement lui fournir via le salaire sous peine de l'épuiser) et, en même temps, elle travaille une certaine quantité d'heures pendant la journée. Or, il n'y a aucune raison que ces deux valeurs soient équivalentes. Au contraire, pour Marx, le capitalisme repose précisément sur l'inégalité

entre le travail incorporé dans la force de travail (le salaire ou travail nécessaire) et le travail que le travailleur incorpore dans de nouveaux produits (le temps de travail). Ainsi, une divergence existe entre valeur de la force de travail et valeur créée par la force de travail : c'est le surtravail ou survaleur captée par les capitalistes.

Dans cette nouvelle configuration, les niveaux de prix tendent à être différents. En effet, les capitalistes allouent le capital entre les différentes branches jusqu'à ce que les taux de profit entre ces branches soit le même¹⁵³. Une branche qui dégagerait un taux de profit supérieur ne manquerait pas d'attirer les capitaux conduisant à un ajustement des prix relatifs. Parce qu'ils suivent une autre logique de formation, ces prix relatifs ont de fortes chances de ne pas correspondre aux valeurs travail (résultat du modèle précédent). On appellera par la suite *prix de production* ces prix qui incorporent ce taux de profit moyen de l'économie.

Illustrons le propos à partir d'un exemple cité par Roubine. L'économie est composée de trois branches dont chacune a une composition organique du capital (COC) différente. La COC désigne le rapport entre le travail vivant (les salaires) et le travail mort (la valeur des moyens de production et des matières premières). La valeur des capitaux est exprimée en temps de travail. Par exemple, dans la branche 1 le capital technique incorpore 80h de travail contre 20h dans les biens salariaux nécessaires pour payer le travail. Le taux d'exploitation rapporte la plus-value (le temps sur-travaillé) au salaire (le temps correspondant à la production des salaires). Le taux de profit rapporte la plus-value (le profit en valeur) au montant des capitaux engagés.

¹⁵³ C'est du moins l'hypothèse retenue dans cette modélisation de l'économie marchande capitaliste que l'on retrouve également chez Ricardo. Marx justifie : « Il n'y a pas de doute que, dans la réalité, il n'existe pas et il ne saurait exister de différence dans les taux moyens de profit entre les différentes branches de la production sans que tout le système de la production capitaliste en soit supprimé » (Marx, III, 1867, p.170)

Secteur	Capitaux	Taux d'exploitation	Valeur-travail (1)	Plus-value	Taux de profit	Prix de production (2)	Ecart entre (1) et (2)
1	80c + 20v	100%	120	20	30%	130	+10
2	70c + 30v	100%	130	30	30%	130	0
3	60c + 40v	100%	140	40	30%	130	-10
TOTAL	210c+ 90v	100%	390	90	30%	390	0

Tableau 29. **Ecart à la valeur travail en présence de compositions organiques différentes.**

Source : auteur à partir de Roubine (1928)

Admettons que le secteur 1 a une COC élevée (80/20), le secteur 3 a une COC faible (60/40), le secteur 2 reproduit la composition organique moyenne de l'économie (70/30). Cet exemple numérique simple montre que des prix relatifs qui correspondraient au travail incorporé (la « valeur-travail ») ne sont pas possibles. En effet, dans une telle situation, le secteur 1 vendrait à 120€ avec un coût de production de 100, donc un taux de profit inférieur (20/100) à celui du secteur 3 (40/100). Dans ce cas, les capitaux ne manqueraient pas de se réallouer du secteur 1 vers secteur 3, faisant varier les prix relatifs (hausse du prix dans le secteur 1 de 120 à 130, baisse dans celui du secteur 3 de 140 à 120) permettant une égalisation du taux de profit (30%). A un tel niveau, le secteur 1 reçoit un prix supérieur à la valeur-travail (+10) tandis que le secteur 3 reçoit un prix inférieur à la valeur-travail (-10). Bien que cette démonstration soit incomplète (Marx reconnaît avoir négligé d'exprimer le capital engagé en prix de production¹⁵⁴), elle permet de mettre en évidence l'incompatibilité entre valeur travail et égalisation des taux de profit dans le cas où les COC des différents secteurs varient. Par ce mécanisme, les valeurs travail sont transformées en prix de production :

¹⁵⁴ Les matières continuent en effet d'être achetées à leur valeur travail donc n'incorporent pas le taux de profit moyen de l'économie. Marx est conscient de cette limite mais considère que cela n'est pas déterminant pour la démonstration (Shaikh, 2021).

« Mais c'est un fait que le capital abandonne une sphère au taux de profit peu élevé et se précipite sur celle qui comporte un taux de profit plus important. Par ce va-et-vient perpétuel, par la façon dont il se répartit entre les différentes sphères suivant que le taux de profit baisse par-ci et augmente par-là, le capital provoque un rapport entre l'offre et la demande tel qu'il entraîne l'égalité du taux de profit moyen dans les différentes sphères de production, d'où la transformation des valeurs en prix de production ».

(Marx, [1894], III, p.210)

Une autre manière de présenter la divergence entre valeur travail et prix de production est donnée par Pierro Sraffa. D'après Bellofiore (2008), Sraffa est « l'un des rares à clairement voir dans Marx ce que Roubine appelle la méthode de la comparaison » (p.13). « Au moins dans la période 1940-42 ; il pense qu'une situation de prix proportionnels aux valeurs [travail] a théoriquement du sens ». A la différence de Roubine toutefois, Sraffa considère que les valeurs travail peuvent être directement envisagées comme un cas limite d'une économie capitaliste où la lutte des classes conduit les salariés à s'approprier la totalité du surplus social. Dans ce cas, le taux de profit est nul ($r=0$) et le travail nécessaire (temps de travail incorporé dans les biens salariaux) est égal au travail vivant (temps de travail effectué). Dans cette situation, les prix naturels correspondent effectivement aux valeurs travail, comme le montre Roubine (cf. supra).

Par une expérience de pensée, Sraffa montre que la baisse du salaire (travail nécessaire) induit un mouvement des prix relatifs qui nous éloigne des valeurs travail, tandis qu'un profit apparaît. On retrouve ici un élément clef de la pensée cambridgienne : les prix relatifs ne sont pas indépendants de la répartition. De manière symétrique, en partant d'une situation avec profit positif (donc en prix de production avec $r>0$), et en simulant une réduction progressive de la durée du travail à salaire donné (baisse de l'exploitation), on peut observer une modification des prix relatifs : plus la durée du travail vivant diminue et se rapproche du travail nécessaire et plus les prix relatifs se rapprochent des valeurs travail. En résumé, pour Sraffa, le niveau du taux de profit vient modifier les prix relatifs de l'économie. Seul un profit nul conduit aux valeurs travail. Ce constat va amener les auteurs à prendre deux positions différentes.

Pour une première série d'auteurs, cette divergence conduit à rejeter la référence à la valeur travail pour penser les prix naturels. Par exemple, du côté de l'hétérodoxie française,

Montalban (2012) estime que la référence au travail a été progressivement écartée par les économistes régulationnistes au motif qu'elle ne servait plus qu'à « prouver l'exploitation » et n'avait rien à dire sur le niveau des prix relatifs¹⁵⁵. De même du côté de l'orthodoxie, ces difficultés autour de la transformation servent d'argument pour abandonner la référence aux valeurs travail :

*« En résumé, la "transformation" des valeurs en prix peut être décrite logiquement par le biais de la procédure suivante : (1) Écrire les relations en valeurs ; (2) prendre une gomme et les effacer ; (3) écrire les relations en prix – c'est ainsi que procède la soi-disant transformation »
(Samuelson, 1970, p.425).*

Pour d'autres comme Shaikh (1998), cette difficulté n'est pas suffisante pour écarter la référence au travail : les valeurs-travail resteraient pertinentes pour analyser la dynamique des prix relatifs. Pour Shaikh, les prix de marché oscilleraient certes autour des prix de production (les prix naturels), mais les valeurs travail seraient absolument structurantes des prix de production :

*« Prices of production are important because in a competitive system they directly regulate market prices; and labour values are important because they serve both as the foundation of prices of production and as their dominant components over time. This last aspect is particularly important, because over time technical change alters relative labour values and hence relative prices of production »
(Shaikh, 1998, p.242)*

On retrouve ici une idée énoncée précédemment : les valeurs travail sont des prix techniques, c'est-à-dire des prix qui sont la pure expression de l'interaction entre la technologie et les contraintes naturelles. Il est normal que dans un système où le taux de profit extrait par la classe capitaliste devient structurant des décisions productives, les conditions productives ne soient pas l'unique déterminant des prix. Néanmoins, et en raison de la concurrence, les capitalistes ne peuvent pas faire abstraction des conditions techniques de

¹⁵⁵ Ce reproche cible les approches plus macroéconomiques de la valeur travail comme la Nouvelle Interprétation (Foley, 1982 ; Lipietz, 1983). L'équivalence entre travail et valeur vaut au niveau macroéconomique (la valeur ajoutée étant l'équivalent monétaire du travail vivant) mais n'est plus considérée comme structurant du niveau microéconomique (les prix relatifs).

production. Ainsi, si les prix de production diffèrent selon le taux de profit en vigueur, ils ne sauraient être totalement déconnectés de ces fondamentaux (figure 34).

Conscient de ces difficultés, Ricardo estimait que la déviation entre valeur et prix de production restait faible et n'excédait pas 7%¹⁵⁶. Les valeurs travail seraient une bonne approximation de la dynamique des prix relatifs même en régime capitaliste.

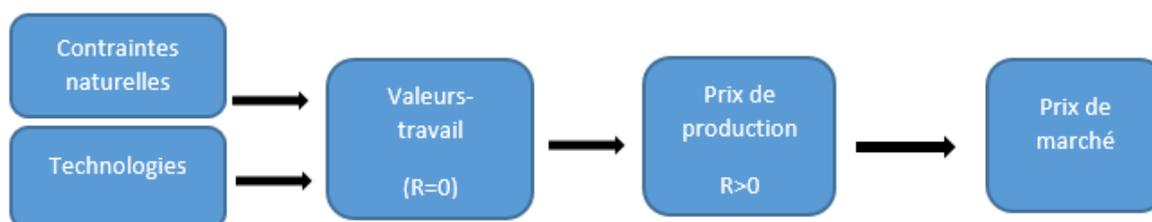


Figure 34. **Articulation entre dimensions monétaires et techniques chez Shaikh.**
Source : auteur.

Face à ces incertitudes, un programme de recherche démarré par Shaikh (1984) va confronter la théorie de la valeur travail aux données empiriques.

2.3.2. Tester la valeur travail : évaluations empiriques de la divergence entre prix et valeurs travail

A la suite de Shaikh (1984), une partie de la littérature consacrée à la théorie de la valeur entreprend de mesurer le degré de corrélation entre quantité de travail incorporé et prix (Cockshott, Cottrell et Michaelson, 1995 ; Cockshott et Cottrell, 2005 ; Ochoa, 1989 ; Petrović, 1987 ; Shaikh, 1998 ; Tsoulfidis, 2008 ; Tsoulfidis et Maniatis, 2002 ; Zachariah, 2006). Ces travaux ressemblent par certains aspects à ceux portant sur la valeur énergie présentés au 1.2.3. En effet, le calcul du travail incorporé suppose également de passer par des tables inputs-outputs (I-O). En effet, ces auteurs calculent un vecteur de travail incorporé à l'output (L) qui prend la forme suivante :

¹⁵⁶ D'après Ricardo, une chute de 1% des profits induit un changement de 1% dans les prix relatifs (Sraffa, 1953). Considérant que les variations des profits n'excède pas 7%, Ricardo aboutit à la « 93% labour theory of value » (Stigler, 1958). Outre la distribution salaire profit, les autres paramètres susceptibles de produire un tel écart sont : les différentes de durée de vie du capital.

$$L = (I - A)^{-1} l$$

Avec I la matrice identité, A la matrice des coefficients techniques et l le vecteur en quantité de travail direct. Ce vecteur de travail incorporé est ensuite multiplié par l'output monétaire du secteur. Les données mobilisées sont en coupe, c'est-à-dire que le travail incorporé par branche est comparé à la valeur monétaire reçue par le secteur pour chacune des années retenues. Si les prix correspondent aux valeurs travail, l'output du secteur apparaît corrélé à la quantité de travail incorporé par ce secteur. En effet, la théorie de la valeur travail considère que les prix relatifs sont expliqués par la quantité de travail incorporé. Au niveau sectoriel, le rapport des outputs monétaires (O) des secteurs 1 et 2 est donc égal au rapport du travail incorporé (L) dans ces secteurs. Par conséquent, si la théorie de la valeur travail est vérifiée, on peut écrire :

$$\frac{O1}{L1} = \frac{O2}{L2} \Leftrightarrow \frac{O1}{O2} = \frac{L1}{L2}$$

Autrement dit, si la théorie de la valeur travail est vérifiée, plus un secteur a un output monétaire élevé, plus la quantité de travail incorporée est élevée. Il faut une relation linéaire pour que ces ratios soient vérifiés. Conformément à la représentation de Shaikh (figure 34), les valeurs travail sont également comparées aux prix de production, eux aussi calculés par les auteurs, à partir des taux de profit. Les déviations, appréciées à partir du MAD (Mean Absolute Deviation), sont observées à chaque fois pour une année donnée.

Les différences entre ces études portent sur le type de modèle input-output utilisé pour calculer la quantité de travail incorporé. Notamment, un modèle de capital circulant ne prend en compte que les consommations intermédiaires et l'amortissement tandis qu'un modèle de capital fixe prend en compte le travail incorporé dans les biens de production. Le tableau 30 présente les résultats des principaux travaux.

Globalement, cette littérature conforte la thèse de Shaikh : hormis Kliman (2002) et, dans une moindre mesure, Steedman et Tomkins (1998), les résultats sont convergents et indiquent une forte corrélation entre prix de marché et valeurs. « Since replicable empirical regularities are rather rare in economics, the strong evidence these studies offer for a widespread coherence between embodied labor coefficients, prices of production, and

market prices is of indubitable scientific interest” résume Foley (2000, p.19). Le problème de la transformation serait ainsi purement théorique, empiriquement les déviations sont faibles et n'invalident pas l'usage des valeurs travail, par exemple pour modéliser.

Auteur et année	Pays et période	Résultats
Shaikh (1984)	Etats-Unis (1947-1967)	Ecart valeur/prix de production : 17-19% Ecart valeur/prix de marché : 20-25%
Petrovic (1987)	Yougoslavie (1976-1978) 47 secteurs	“We end up with a '90% labour theory of value” (p.204)
Ochoa (1989)	Etats-Unis (1947-1972) 71 secteurs	MAD valeur/prix de production : 17% MAD valeur/prix de marché : 12,2% MAD prix de production/prix de marché : 13,6%
Cockshott, Cottrell et Michaelson (1995)	Royaume-Uni (1984)	“The regressions with labour content as independent variable show an excellent fit (with R^2 in the range of 96 to 98 per cent)”
Shaikh (1998)	Etats-Unis (1947-1987)	“Prices of production are within 8.2 per cent of market prices, labour values are within 9.2 per cent of market prices and 4.4 per cent of prices of production” (p.226)
Steedman et Tomkins (1998)	Royaume-Uni (1990), Irlande (1985), Australie (1973-74)	“price-value deviations can be both quite large and quite different from case to case [...] many of our 123 values for the MAD measure were in the area of 28%” (p.385)
Kliman (2002)	Etats-Unis (1977-1997)	“Further analysis of the data has disclosed that, once spurious correlation is eliminated, any influence of values on prices is quite small and statistically insignificant” (Kliman,2002, p.300)
Tsoufidis et Maniatis (2002)	Grèce (1970)	MAD valeur/prix de production : 14,3% MAD valeur/prix de marché : 23,1% MAD prix de production/prix de marché : 18,7%
Zachariah (2006)	OCDE, 18 pays (1968-2000)	“In 52 out of 55 data sets the obtained correlation coefficients were above 0.900. The exceptions for labour values were Greece 1994, Norway 1997 and Poland

<i>1995, for production prices the two first countries and West Germany 1978.” (Zacharia, 2006, p.8)</i>		
Tsoulfidis (2008)	Japon (1970-1990), 33 secteurs	MAD valeur/prix de production : 8-11,5% MAD valeur/prix de marché : 12,7-27% MAD prix de production/prix de marché : 11,3-26,8%

Tableau 30. **Principaux résultats de l'évaluation de la divergence entre prix et valeurs travail.**

Source : auteur

Ces travaux ne sont toutefois pas exempts de limites méthodologiques. Tout d'abord, les modèles inputs outputs retenus n'utilisent pas toujours d'estimation du capital fixe (par exemple Shaikh, 1984) de sorte que les valeurs travail ne prennent en compte que le travail direct et le travail incorporé dans les consommations intermédiaires. Pour Tsoufidis (2008), par exemple, les résultats de Steedman et Tomkins (1998) sont biaisés par l'absence de prise en compte de l'amortissement dans le calcul du travail incorporé. Par ailleurs, quand le capital fixe est pris en compte, il est nécessaire de considérer la durée sur laquelle ce capital va être amorti, ce que certains travaux négligent de faire (Foley, 2000).

Un autre point potentiellement problématique tient au type de données disponibles pour calculer le travail incorporé. Pour certaines tables inputs-outputs, il n'existe pas de table physique associée avec les quantités physiques de travail (en heures) employées. C'est pourquoi certains travaux utilisent les rémunérations salariales pour en déduire un nombre d'heures. Ainsi, Cockshott, Cottrell et Michaelson (1995) expliquent dans le cas du Royaume-Uni que : “In the input-output tables, labour input is given in £s. This amounts to measuring the price of the labour power used rather than being a direct measure of the labour used” (p.107). Dans ce cas, le calcul d'une quantité d'heures de travail par secteur suppose de diviser les rémunérations par le salaire horaire moyen. Cela fragilise la dimension physique de l'hypothèse testée.

Plus problématique pour les résultats est l'accusation portée par Kliman (2002) de corrélation fallacieuse. En effet, pour Kliman, “correlations between the aggregates are spurious, mere artefacts of the trivial fact that the price and value of aggregate output are

both large in large industries and small in small industries” (Kliman, 2005, p.317). En ajoutant la taille des secteurs comme variable de contrôle dans la régression, Kliman montre que la corrélation disparaît et que les valeurs travail ne sont plus significatives. Cependant, Kliman utilise le coût de production sectoriel pour contrôler la taille du secteur, ce qui est discutable. Utilisant d'autres variables comme proxy de la taille d'une industrie, Dias et Osuna (2005) montrent à partir du cas espagnol (1986-1994) la sensibilité du R^2 aux choix effectués. Quand la variable de contrôle des coûts de production utilisée se résume aux coûts non salariaux, le R^2 est de 40%, quand la variable utilisée est le capital fixe du secteur, le R^2 revient à des niveaux proches de 90%. Même d'un point de vue théorique, la démarche de Kliman est problématique : dans la mesure où la théorie de la valeur travail est une théorie pure des coûts de production (cf.2.2.), contrôler les coûts de production empêche précisément de tester cette hypothèse.

Finalement, ces discussions pointent les difficultés à discuter empiriquement de cette théorie à un niveau qui reste relativement agrégé, celui de la branche, là où la théorie de la valeur travail, du moins l'interprétation qui nous intéresse ici, est une théorie des prix relatifs (donc unitaires). Le calcul de prix unitaires de branches n'est pas possible puisque l'output (monétaire) du secteur regroupe des éléments qualitativement différents. Il n'est pas possible de calculer une quantité physique de marchandises. Une solution serait de privilégier les tests sur des secteurs où les biens sont relativement homogènes et standardisés comme le secteur énergétique, combiné à l'utilisation de tables inputs-outputs très désagrégées¹⁵⁷.

Au-delà des difficultés méthodologiques, l'interprétation des résultats fait débat. Si on suit le raisonnement de Cockshott, Cottrell Michaelson (1995), plus les coefficients de corrélation sont élevés, plus la théorie de la valeur-travail serait valide :

« The regressions with labour content as independent variable show an excellent fit (with R^2 in the range of 96 to 98 per cent), and a close approximation to the 'ideal' result, from the standpoint of the labour theory of value, of a zero intercept and unit slope »
(p.108)

¹⁵⁷ Par exemple, les tableaux entrée-sortie les plus fins produits par l'INSEE considèrent 139 branches.

Cette définition de la validité est toutefois discutable, comme le remarque Foley sous forme de questionnement :

« Suppose, for example, that the correlations between embodied labor coefficients and market prices had turned out to be much lower, or to fall over time, or to be low in certain capitalist economies. Are we to conclude that the labor theory of value does not hold, or is weakening over time, or holds only in some capitalist economies? »
(Foley, 2000, p.20)

Comme mis en évidence au 2.2., les valeurs travail¹⁵⁸ sont le résultat d'un idéal-type de monde parfaitement concurrentiel où les relations de pouvoir sont neutralisées. Pour preuve, dans cette situation le profit est de 0 (Sraffa) ou absence de rapport salarial (Roubine) : dans les deux cas, cela revient à neutraliser le pouvoir des capitalistes sur les salariés. De plus, dans cette configuration, tous les travailleurs directs qui engagent du travail dans la production (travail incorporé) parviennent à acquérir un droit équivalent sur la production (travail commandé). Là encore, les rapports de pouvoir qui naissent d'une différence de qualification, d'une avance technologique, sont totalement neutralisés par les hypothèses (cf. 2.2.2.). Dans ce cadre de cet idéal-type, les prix relatifs sont l'expression pure des contraintes technico-matérielles.

Dans le monde réel, cet idéaltype n'est pas observé dans sa pureté, précisément du fait de l'existence des relations de pouvoir. Les déviations aux valeurs travail sont donc légion car les relations de pouvoir font nécessairement apparaître des échanges inégaux. Dans ce cas, certains acteurs reçoivent plus de travail (le travail commandé par leur revenu) que celui qu'ils ont engagé (travail incorporé). De ce point de vue, les capitalistes assurent un prélèvement net sans n'avoir engagé aucun travail¹⁵⁹. Ainsi, l'écart entre valeurs travail et prix de marché ne vient pas à proprement parler invalider la théorie de la valeur travail. Dans l'interprétation proposée, un fort éloignement entre les prix relatifs et les valeurs travail signifie l'importance d'autres déterminants que les conditions techniques.

¹⁵⁸ Des prix relatifs correspondant au travail incorporé relatif.

¹⁵⁹ Le capitalisme s'analyse ainsi comme un système de relations structuré par une inégalité de pouvoir fondamentale (le contrôle des moyens de production) donnant lieu à des échanges inégaux (l'exploitation) en faveur des non-travailleurs.

Pour le dire autrement, la théorie de la valeur travail n'a pas besoin d'être une théorie qui décrit avec exactitude les prix de marché observé qu'il conviendrait d'abandonner dès lors que sa capacité prédictive décroît. Elle peut alternativement s'analyser comme un outil dans le cadre d'une démarche comparative. En mesurant l'écart entre prix relatifs et valeurs travail, on mesure la prégnance des conditions techniques dans la détermination des prix. De ce point de vue, les résultats de la littérature présentée indiquent que les conditions techniques de production sont bien un déterminant important des prix relatifs dans les différents pays étudiés.

Si on accepte cette signification des valeurs travail, alors celles-ci apparaissent pertinentes pour un usage dans le cadre de la modélisation du rôle de l'énergie dans le processus de croissance. En effet, que cela soit pour appréhender le rôle que les contraintes naturelles font peser sur le prix de l'énergie, ou encore, la manière dont l'incorporation d'énergie au sein du processus de production économise du travail, une théorie des prix est nécessaire. En tant que théorie des prix relatifs, la théorie de la valeur travail permet d'apprécier ces conséquences dans le monde monétaire.

2.4. Modéliser le rôle de l'énergie dans la croissance à partir des valeurs travail

L'utilisation de la théorie de la valeur travail pour modéliser l'apparition de contraintes physiques n'est pas nouvelle : on la retrouve déjà chez Ricardo et son modèle de l'état stationnaire. En 1815, à l'initiative des propriétaires fonciers, une loi sur les blés est votée en Grande-Bretagne. Cette loi protège les propriétaires de la concurrence étrangère en limitant les importations de blé. Ricardo s'interroge sur l'effet d'une telle mesure et propose un modèle pour en explorer les conséquences (Deleplace, 2018).

Pour Ricardo, la production de blé est assurée par des travailleurs payés au salaire de subsistance. Par conséquent, ce salaire est directement influencé par le prix du blé. Le prix du blé est déterminé conformément à la théorie de la valeur travail : il dépend du temps de travail nécessaire, que celui-ci soit direct ou indirect. La production génère un profit capitaliste, lequel est intégralement réinvesti dans de la production supplémentaire (embauches de nouveaux travailleurs). Le moteur de l'accumulation du capital est le taux de profit. Enfin, la

production agricole suppose également de rémunérer des propriétaires fonciers qui perçoivent une rente (absolue), d'autant plus importante que leur terre est productive (rente différentielle).

Dans le cas où les blés ne peuvent être importés, l'augmentation de la production agricole suppose de mettre en culture de nouvelles terres. Or, Ricardo fait l'hypothèse de rendements marginaux décroissants de la terre : les terres mises en culture seront moins productives que celles qui sont déjà exploitées. Le travail nécessaire à la production du blé sur ces terres est donc plus élevé. L'augmentation de la production de blé ne peut se faire qu'au prix d'une augmentation du prix du blé. Cependant, cette hausse du prix de blé conduit à une augmentation du salaire de subsistance. En effet, comme les salaires correspondent à une quantité de blé incompressible (salaire de subsistance), les salaires monétaires se doivent également d'augmenter. L'augmentation des salaires réduit le profit monétaire, lequel est le moteur de l'accumulation. A partir du moment où celui-ci diminue, la motivation des capitalistes à produire est réduite, l'accumulation du capital cesse et, avec elle, la croissance économique.

La valeur travail permet donc de penser le rôle des contraintes naturelles. Dans l'exemple de Ricardo, une moindre accessibilité de l'énergie chimique (ici, la nourriture via le blé) produit une augmentation du travail nécessaire. De plus, le caractère limitant de l'énergie passe par son prix. Cependant, le canal de transmission n'est pas la demande, comme chez les néo-physiocrates (cf. 1.2.1.), mais la réduction du profit des capitalistes.

La composition organique du capital comme déterminant de la profitabilité chez Marx

Marx envisage lui aussi la possibilité d'une chute du taux de profit (loi de la baisse tendancielle du taux de profit) conduisant à un ralentissement de l'accumulation. Cependant, chez Marx, la baisse du taux de profit provient de l'augmentation (tendancielle) de la composition organique du capital. Présentons le mécanisme plus en détail pour voir en quoi cela peut nous permettre d'intégrer le rôle de l'énergie.

Pour Marx, le taux de profit (R) se calcule en rapportant le profit monétaire (ou plus-value, noté PV) à la valeur des capitaux engagés (le capital constant, soit les machines et les

matières premières, noté C, et capital variable, c'est-à-dire la force de travail, noté V). On peut donc écrire :

$$R = \frac{PV}{C + V}$$

En divisant les termes par V, on peut réécrire l'équation avec une nouvelle variable,

$\frac{PV}{V}$, qui désigne le taux d'exploitation (E)

$$R = \frac{E}{\frac{C}{V} + 1}$$

Le taux de profit dépend donc de deux variables : le taux d'exploitation de la force de travail et la composition organique du capital ($\frac{C}{V}$). Notons que la COC est une composition *en valeur* et se distingue de la *composition technique du capital* (CTC), c'est-à-dire l'intensité capitaliste du processus de production. Pour Marx, le développement des forces productives se traduit par une substitution du travail vivant par du travail mort, conduisant à une augmentation de la composition technique. Pour autant, cela ne préjuge pas de l'évolution de cette composition organique. En effet, l'augmentation de la composition technique affecte également la valeur des équipements (le temps de travail nécessaire à leur production est réduit) ce qui va impacter la COC :

*« La même évolution qui fait s'accroître la masse du capital constant par rapport au capital variable fait baisser la valeur de ses éléments par suite de l'accroissement de la productivité du travail, et empêche ainsi que la valeur du capital constant, qui pourtant s'accroît sans cesse, n'augmente dans la même proportion que son volume matériel. **Dans tel ou tel cas, la masse des éléments du capital constant peut même augmenter, tandis que sa valeur reste inchangée ou même diminuer** ». Ainsi « les mêmes causes qui engendrent la tendance à la baisse du taux de profit modèrent également la réalisation de cette tendance »
(Marx, III, 1867, p.248-249)*

L'augmentation de la composition technique a donc deux effets contradictoires : un effet volume (la quantité de machines augmente relativement au nombre de travailleurs) et

un effet prix (la baisse du prix des marchandises). Malgré la mise en évidence de cette contretendance, Marx considérait que, tendanciellement, ce second facteur n'était pas suffisant pour contrarier durablement l'augmentation de la composition technique. De même, l'augmentation du taux d'exploitation, au numérateur, n'était pas susceptible de compenser durablement l'augmentation de la COC. Le taux de profit était donc amené à baisser tendanciellement sur le long terme.

Outre la baisse de la valeur des éléments du capital constant, l'augmentation de la composition organique peut être modérée par l'augmentation des salaires¹⁶⁰. Historiquement, c'est bien ce qui a pu être observé : les gains de productivité ont non seulement touché de manière importante la section produisant les biens d'équipement (la valeur de C) mais, dans le même temps, une partie de ces gains a été captée sous forme de hausse de salaires (hausse de V). L'évolution de la COC paraît donc indéterminée (tableau 31).

	Tendance historique
Volume de capital constant	Hausse
Volume de capital variable	Baisse voire stabilité ¹⁶¹
Composition technique (CTC)	Hausse
Valeur unitaire du capital constant	Baisse
Valeur unitaire du capital variable	Hausse
Composition organique (COC)	?

Tableau 31. **Composition technique et composition organique.**
Source : auteur.

Si on en croit Husson (Husson, 2010a), cette décomposition binaire n'est pas satisfaisante. Les deux variables retenues ne sont pas indépendantes puisque chacune d'elles

¹⁶⁰ A condition que la progression des salaires ne soit pas supérieur à la productivité. Autrement, le taux d'exploitation baisserait et avec lui le taux de profit.

¹⁶¹ A titre d'exemple, d'après l'INSEE, le volume d'emploi en France était, en 2017, 3% plus faible qu'en 1950.

est influencée par une troisième variable : la productivité du travail. En effet, la productivité du travail (le travail nécessaire) vient affecter la valeur de C, mais aussi celle de V. Par conséquent, cette variable agit à la fois sur le taux d'exploitation (PV/V) en même temps que la composition organique du capital (C/V). C'est la raison pour laquelle Husson préfère une décomposition ternaire où la productivité physique du travail (Q/N) apparaît à côté du salaire réel (w/p) et de l'efficacité du capital (K/Q, appelée aussi parfois le rapport entre le capital et la production). En effet, avec R, le taux de profit, Q la quantité d'output réel, N l'emploi, W le salaire nominal et K la quantité physique de capital, on peut écrire :

$$R = \frac{p \cdot Q - W \cdot N}{p \cdot K}$$

$$R = \frac{1 - \frac{W \cdot N}{p \cdot Q}}{\frac{p \cdot K}{p \cdot Q}}$$

$$R = \frac{1 - \frac{W/p}{Q/N}}{\frac{K/N}{Q \cdot N}}$$

$$R = \frac{1 - \frac{W/p}{Q/N}}{\frac{K}{Q}}$$

En réalité, dans cette reformulation, les termes ne sont pas totalement indépendants les uns des autres. En effet, la productivité du travail Q/N ne saurait, par construction¹⁶², être indépendante de l'efficacité du capital (K/Q) puisque la productivité physique du travail (Q/N) dépend du niveau de capital par tête (K/N). De plus, la formulation binaire nous semble préférable dans la mesure où elle ne repose pas sur des agrégats contestables (quantité réelle

¹⁶² Q/N = Q/K * K/N

de capital, quantité réelle d'output) dont nous avons présenté les apories au chapitre 2. A l'inverse, la formule de Marx ne mobilise que des variables purement monétaires.

En résumé, chez Marx, la croissance économique apparaît comme un résultat de l'accumulation de capital qui dépend du taux de profit. Or, le taux de profit est le produit de *variables de répartition* (taux d'exploitation donc du partage du surplus entre travailleurs et capitalistes) mais également de *variables technico-matérielles* (la composition technique du capital et la productivité physique du travail). C'est donc par le biais de la COC que l'on peut envisager l'intégration du rôle de l'énergie au cadre classique :

- 1) A mesure que le développement des forces productives a lieu, le capital par tête augmente donc la quantité d'énergie mobilisée (**la CTC augmente**). Toutes choses égales par ailleurs, la **COC augmente**.
- 2) Cette mobilisation d'énergie permet de réduire le temps de travail nécessaire à la production des marchandises, donc de faire baisser la valeur des biens d'équipement (**la COC baisse**).
- 3) Ces gains de productivité ont également lieu dans le secteur de production des biens salariaux, réduisant la valeur de la force de travail (**hausse de COC**), mais les salariés peuvent prétendre à une partie de ces gains de productivité sous forme de hausse de salaires (**baisse de COC**).

Prix relatif de l'énergie et composition organique du capital

L'énergie peut devenir un facteur limitant lorsque les contraintes naturelles la rendent moins accessible. Dans ce cas, le travail nécessaire à la production d'énergie augmente sur la dernière unité de production (hausse de la rente différentielle). En premier lieu, les secteurs les plus intensifs en énergie (à composition technique élevée) seront touchés : leur COC augmente plus fortement que dans les autres secteurs, il y a donc baisse relative de leur taux de profit. Par construction, le taux de profit moyen de l'économie est réduit.

Cette situation est instable car certains secteurs touchent plus que cette moyenne, d'autres moins. Dans le cadre marxiste, il y a nécessairement un processus de réallocation des capitaux permettant de ré-égaliser les taux de profit. Les capitaux des secteurs intensifs

s'orientent vers les secteurs moins intensifs en capitaux. Ces mouvements produisent un changement dans les prix relatifs : le prix dans les secteurs intensifs augmente relativement à celui dans les secteurs peu intensifs. Ou pour le dire autrement, pour que les capitaux ne fuient pas, les prix relatifs doivent évoluer.

Il en résulte un niveau de prix de production plus faible qu'auparavant dans les secteurs intensifs conduisant à une baisse du taux de profit par rapport à celui du début de période. Dit autrement, par le mouvement des prix relatifs, la baisse du taux de profit a été *étalée sur l'ensemble des secteurs*. Par la suite, la baisse du taux de profit macroéconomique entraîne le taux d'accumulation¹⁶³ avec lui (figure 35).

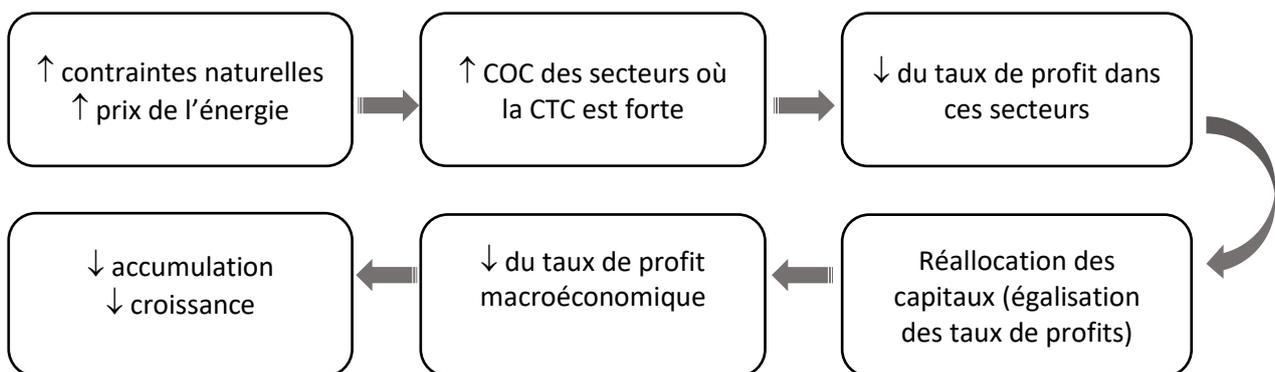


Figure 35. **L'énergie comme facteur limitant dans un modèle classique.**

Source : auteur.

Dans cette représentation, le prix de l'énergie joue donc un rôle important dans la formation du taux de profit macroéconomique. A l'inverse, cela signifie que des progrès technologiques dans le secteur énergétique permettent de diminuer le temps de travail nécessaire à la production d'énergie, donc son prix, d'où une baisse de la COC pour les secteurs les plus intensifs et une hausse générale du taux de profit. Il est donc possible d'envisager un modèle cyclique de croissance, à la manière de celui de Hall présenté au 1.2., qui lie l'accessibilité des ressources et la croissance économique mais avec des fondements classiques qui, à nos yeux, sont plus robustes quant aux relations entre les variables.

¹⁶³ Le taux d'accumulation rapporte l'investissement au stock de capital fixe.

Conclusion de la deuxième section.

Au terme du précédent chapitre, nous avons conclu que pour penser le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB réel, il fallait être capable d'articuler deux dimensions de la production : la dimension physique dans laquelle l'usage de l'énergie s'inscrit et la dimension monétaire dans laquelle le PIB s'exprime. Cette section a montré que la théorie de la valeur travail propose une articulation robuste. Pourtant, au sein de l'économie écologique, cette théorie a suscité peu d'adhésion de sorte qu'il est tentant de penser avec Pirgmaier qu'elle est « largement rejetée mais peu comprise »¹⁶⁴ (Pirgmaier, 2021, p.2). Rappelons ici les trois principaux résultats de ce chapitre qui, à nos yeux, participent à réconcilier l'économie écologique avec la théorie de la valeur travail.

D'abord, cette théorie intègre les contraintes naturelles. Contrairement à ce qu'une interprétation superficielle du rejet des thèses de Podolinsky (1881) par Marx et Engels¹⁶⁵ pourrait amener à penser, il n'y a pas d'obstacles épistémologiques à la prise en compte de la thermodynamique par la théorie de la valeur travail. En effet, pour les classiques et Marx, plus les contraintes naturelles sont fortes, plus les sociétés humaines doivent peiner dans le monde physique, plus le temps de travail nécessaire pour produire des richesses est élevé. En application de la théorie de la valeur-travail, le prix relatif des marchandises concernées augmentera. L'énergie, ou plutôt la basse entropie, pour reprendre les termes de Georgescu-Roegen, n'échappe pas à cette règle. Plus les contraintes d'accessibilité sont fortes, plus la valeur de la basse entropie sera forte. Or, comme la basse entropie est indispensable à tout procès de travail¹⁶⁶, les effets de cette hausse de prix sur l'économie seront massifs. En premier lieu les secteurs les plus intensifs en énergie seront affectés mais, progressivement, du fait de l'égalisation des taux de profit, le taux de profit macroéconomique sera affecté entraînant avec lui l'accumulation. Ainsi, l'énergie apparaît bien comme un facteur limitant du

¹⁶⁴ Nous traduisons « widely rejected but little understood »

¹⁶⁵ Physicien et socialiste ukrainien, Podolinsky (1881) propose une reformulation de la théorie de la valeur travail à partir des éléments de la thermodynamique. Pour certains économistes écologiques, il aurait fourni « une base scientifique à la théorie de la valeur travail, ce que ni Marx ni Engels n'auraient apprécié » (Martinez-Alier, 1987, p. 49). Un examen détaillé de cette thèse révèle au contraire un double fragilité (Burkett et Foster, 2006 ; Foster et Burkett, 2004) : non seulement, du strict point de vue de la thermodynamique, cette thèse est erronée, mais la distinction fondamentale entre richesse et valeur est niée, raison pour laquelle elle fût rejetée par Marx et Engels.

¹⁶⁶ Puisque selon la thermodynamique, toute production de richesse s'apparente à une dégradation de la basse entropie (l'énergie finale pour faire simple) en haute entropie (les services énergétiques).

processus de croissance, comme chez les néo-physiocrates. Si la fidélité des néo-physiocrates à la thermodynamique est reconnue, alors on ne voit pas quel type d'argument permettrait de ne pas en dire autant des auteurs classiques et marxistes.

Ensuite, cette théorie dépasse les accusations de substantialisme émises par certains auteurs au sein de l'économie écologique et au-delà (Hornborg, 2014 ; Orléan, 2011a ; Røpke, 2021). Plus précisément, si cette critique était valide pour Ricardo, d'autres interprétations comme celle proposée par Roubine ([1928]) évitent cet écueil. En effet, pour Roubine, les valeurs travail peuvent s'analyser comme le résultat de la configuration marchande, d'un idéaltype particulier où les relations de pouvoir sont neutralisées (par les hypothèses). Dans ce cadre, la dynamique d'égalisation tendancielle entre prix reçus (le travail commandé) et travail physiologique dépensé (le travail incorporé) résulte de l'arbitrage et des décisions prises par les producteurs directs. Dit autrement, des prix proportionnels au travail incorporé sont le produit des structures économiques¹⁶⁷ dans lesquelles les acteurs sont plongés, pas d'une substance qui préexiste aux échanges.

Enfin, l'utilité analytique de cette théorie a été rappelée. Face à ceux qui estiment que cette théorie ne sert plus qu'à « prouver l'exploitation » (Montalban, 2012), nous avons au contraire insisté sur son intérêt dans l'analyse de la dynamique des prix relatifs. En effet, en tant que système de prix reflétant l'expression pure des conditions techniques, les valeurs travail sont heuristiques si elles sont utilisées comme méthode comparative. Plus les prix s'écartent des valeurs travail, moins les conditions techniques sont déterminantes¹⁶⁸. A ce titre, la littérature empirique testant le degré de déviation entre prix et valeur travail est précieuse : dans leur majorité, ces travaux montrent que les conditions techniques sont absolument structurantes des niveaux des prix relatifs réellement observés et, ce faisant, de la dynamique d'accumulation. La théorie de valeur travail conserve ainsi un caractère appliqué. Son rejet est d'autant plus dommageable que, à la fois du côté de l'hétérodoxie française¹⁶⁹ ou de l'économie écologique¹⁷⁰, une théorie générale des prix fait défaut.

¹⁶⁷ L'économie marchande concurrentielle

¹⁶⁸ Et plus les échanges inégaux sont marqués que cela soit lié à une avance technologique ou toute autre forme de pouvoir de marché.

¹⁶⁹ S'exprimant au sujet des hétérodoxes, Montalban conclut : « nous ne disposons toujours pas d'une théorie des prix » (2012, p.20)

¹⁷⁰ L'économie écologique n'a toujours pas de théorie de la valeur d'après Douai et Plumecocq (2017).

Conclusion du chapitre 3 : Le besoin de travaux empiriques supplémentaires sur les canaux de transmission

Au cours de ce chapitre nous avons examiné deux alternatives à la théorie néoclassique de la croissance regroupées sous le terme d'approche par le surplus. A ce stade de l'analyse, nous sommes en mesure de comparer comment chacune de ces deux théories appréhende le rôle de l'énergie dans le processus de croissance.

En premier lieu, que ce soit chez les classiques (et plus particulièrement Marx) ou les néophysocrates, la production est bien encadrée dans le monde physique (Passet, 1979). En effet, dans les deux cas, un accroissement des contraintes physiques, a des répercussions dans le monde monétaire. Le monde monétaire physiocratique ou marxiste n'est donc pas ce « manège » hors sol décrit par Georgescu-Roegen¹⁷¹. Que ce soit par la hausse de l'énergie incorporée ou la hausse du travail incorporé aux marchandises, les prix relatifs sont modifiés.

Cet encastrement se repère au traitement d'un input clef : l'énergie. Conformément aux apports de la thermodynamique, l'énergie est indispensable puisque toute production consiste en une dégradation qualitative d'une certaine quantité d'énergie : les ressources de basse entropie (Georgescu-Roegen). Le processus économique dépend de cet accès à la basse entropie, plus exactement *du coût* de cet accès. Chez les néo-physocrates, c'est le EROI (le rapport entre énergie investie dans le système énergétique et l'énergie générée) qui mesure ce coût d'accès et détermine, tendanciellement, le prix relatif des ressources énergétiques. Chez les classiques, conformément à la théorie de la valeur travail, c'est le travail nécessaire à la production de l'énergie qui matérialise ces contraintes sur le prix de l'énergie.

Dans les deux cas, les travaux empiriques sur cette question restent modestes. Si les études sur le EROI sont abondantes, leur lien au prix de l'énergie reste peu exploré. Du côté de la théorie classique, il existe peu d'étude portant spécifiquement sur le travail incorporé à l'énergie (Hubert, 1980). Toutefois, dans la mesure où la littérature empirique présentée au

¹⁷¹ Voir la métaphore employée par Georgescu-Roegen au chapitre 2, section 2.1.

2.3. porte sur des secteurs, il est possible d'y trouver des estimations du rapport entre l'output monétaire et le travail incorporé total du secteur¹⁷².

	Néo-physiocrates	Classiques
Les contraintes biophysiques affectent le prix de l'énergie via...	L'énergie nécessaire à la production de l'énergie (EROI)	Le travail nécessaire à la production de l'énergie
Les prix affectent...	Le poids de la facture énergétique	La composition organique du capital et le taux de profit
Ralentissement de la croissance provient de...	La baisse de la demande globale	La baisse du taux d'accumulation

Tableau 32. **L'énergie dans les théories de la croissance néo-physiocratiques et classiques.**

Source : auteur

En second lieu, ces deux écoles divergent sur le canal de transmission par lequel le prix de l'énergie affecte la variation du PIB. Dans les travaux néo-physiocratiques les plus récents, l'augmentation du prix de l'énergie vient gonfler la facture énergétique, les dépenses contraintes des agents économiques augmentent, ce qui en retour vient réduire la demande pour d'autres biens et services. Chez les classiques, la variable clef qui explique le rythme de la croissance est le taux de profit. Le taux de profit détermine le taux de l'accumulation (la rentabilité espérée conditionne la décision d'investir), l'inverse étant également vrai¹⁷³. Le canal de transmission (emprunté à Marx) entre le prix de l'énergie et le taux de profit est la composition organique du capital (COC). La COC est un concept à la frontière entre dimensions techniques et monétaires. Elle dépend non seulement de la composition technique du capital (l'intensité capitaliste, donc énergétique d'une branche) mais également de la valeur des éléments de ces capitaux. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, le prix de l'énergie va

¹⁷² A ceci près que dans le cas des ressources naturelles (comme pour la terre chez Ricardo) le travail incorporé pertinent n'est pas le travail incorporé moyen mais celui en vigueur sur l'unité de production marginale.

¹⁷³ « Les capitalistes dépensent ce qu'ils gagnent » disait Kalecki, c'est-à-dire que le profit monétaire ne sera effectivement réalisé *que si* les capitalistes investissent. Sur ce point voir la section 4 du chapitre 4.

affecter la COC de ces secteurs et leur taux de profit. La tendance à l'égalisation des taux de profit fera le reste, faisant chuter le taux d'accumulation.

Au niveau des travaux empiriques, les travaux néo-physiocratiques testent les canaux de transmission évoqués. Ceux sur la relation facture énergétique-PIB réel restent encore trop descriptifs tandis que les études économétriques demanderaient à être répliqués. Du côté des classiques, l'évolution du taux de profit est certes une variable suivie par de nombreux analystes contemporains, néanmoins le lien entre prix de l'énergie et composition organique du capital n'est, à notre connaissance, pas étudié. Compte tenu de ce manque, nous menons, au chapitre 4, une évaluation économétrique du canal du taux de profit.

CHAPITRE 4
MESURER LA CONTRIBUTION DE L'ENERGIE À
L'ACCUMULATION DU CAPITAL : UNE EVALUATION
EMPIRIQUE DU CANAL DU TAUX DE PROFIT.

PLAN DU CHAPITRE 4

INTRODUCTION DU CHAPITRE 4.....	273
1. CONSTRUCTION ET ANALYSE DESCRIPTIVE DES DONNEES	281
1.1. LE PRIX RELATIF DE L'ÉNERGIE (PR_NRJ)	282
1.2. LE TAUX DE PROFIT (PROFITRATE).....	286
1.3. LE TAUX D'EXPLOITATION (EXPL).....	289
1.4. LA COMPOSITION TECHNIQUE DU CAPITAL (CTC)	290
2. PRESENTATION DE LA METHODE : CHOIX DES MODELES ET DES ESTIMATEURS	292
2.1. STATIONNARITE DES VARIABLES	293
2.2. LE CHOIX DE L'ÉQUATION ECONOMETRIQUE UTILISEE.....	294
2.3. LES DIFFERENTS ESTIMATEURS RETENUS.....	296
3. RESULTATS ECONOMETRIQUES : L'EXISTENCE D'UN CANAL DU TAUX DE PROFIT.....	298
3.1. RESULTATS ET TESTS COMPLEMENTAIRES	298
3.2. INTERPRETATION DES RESULTATS	303
CONCLUSION DES SECTIONS 1, 2 ET 3	305
4. DU TAUX DE PROFIT AU TAUX D'ACCUMULATION : UNE REFLEXION A PARTIR DES TRAVAUX POST-KEYNESIENS.....	308
4.1. LE PROFIT COMME SOURCE DE L'ACCUMULATION DE CAPITAL.....	309
4.2. LA LOI DE KALECKI : LE TAUX D'ACCUMULATION COMME SOURCE DE REALISATION DU TAUX DE PROFIT	313
4.2.1. <i>La loi de réalisation des profits de Kalecki : un exemple à partir des bilans comptables</i>	314
4.2.2. Les autres sources de profit comptable : la loi de Kalecki étendue	317
4.3. ARTICULATION DE CES DEUX REPRESENTATIONS ET ROLE DE L'ÉNERGIE DANS L'ACCUMULATION ...	322
CONCLUSION DU CHAPITRE 4 : VERS UN MODELE DE CROISSANCE POSTCLASSIQUE INTEGRANT LE ROLE DE L'ÉNERGIE	325

Introduction du chapitre 4

Au chapitre précédent, nous avons vu la manière dont le cadre d'analyse classique permet d'appréhender la relation entre l'énergie et la croissance économique. Nous avons également pointé le manque de travaux empiriques évaluant les canaux de transmission mis en évidence théoriquement. Schématiquement, le cadre classique développé en section 2 du chapitre 3 permet d'envisager deux choses :

- 1) La manière dont les contraintes physico-techniques pèsent sur le prix de l'énergie,
- 2) La manière dont le prix de cet input indispensable affecte la dynamique de croissance.

Accessibilité des ressources énergétiques et prix relatifs

La théorie classique établit un lien fort entre contraintes technico-matérielles et prix relatifs. C'est là le rôle de la théorie de la valeur travail. D'après cette dernière, plus une marchandise est difficile à produire pour les sociétés humaines, plus le temps de travail socialement nécessaire pour le faire (relativement aux autres marchandises) sera important et plus la valeur de cette marchandise (relativement aux autres) sera élevée. Dans le cas de l'énergie, le temps de travail nécessaire pour la produire pourrait ainsi être utilisé comme un indicateur pertinent de l'accessibilité de cette valeur d'usage indispensable à la croissance. Alors qu'une partie substantielle de l'économie écologique, et plus particulièrement le courant néo-physiocratique, privilégie le EROI¹⁷⁴ comme indicateur pertinent d'accessibilité, le temps de travail incorporé à la production d'énergie nous apparaît comme une alternative qui mérite d'être explorée.

En pratique, la méthode consisterait à calculer des séries de travail incorporé à l'énergie et d'apprécier à quel point le prix relatif suit ou non cette tendance. Dans cette perspective, on pourrait ainsi discriminer ce qui, dans les variations du prix relatif de l'énergie, est dû (1) à une détérioration de l'accessibilité de cette dernière (dans ce cas le travail

¹⁷⁴ Le EROI qui fait l'objet de nombreuses investigations empiriques peut s'interpréter comme l'énergie incorporée à la production d'énergie. Voir chapitre 3, section 1.2.

incorporé à l'énergie serait corrélé à son prix) ou bien (2) à une augmentation du pouvoir de marché des producteurs d'énergie (auquel cas il y aurait absence de corrélation entre prix relatif et travail incorporé).

Des travaux faisant explicitement référence au cadre marxiste ont pu être menés en ce sens au cours des années 1980. On pense, par exemple, au travail de Hubert (1980) consacré au travail incorporé à la production électrique française à partir de trois sources d'énergie primaire (pétrole, gaz et nucléaire). Hubert remarque que l'électricité produite à partir d'uranium incorpore deux fois plus de travail que celle produite à partir de pétrole, tandis que celle produite à partir de charbon en incorpore trois fois plus (figure 36). Pour Hubert, ces résultats indiquent une « évolution du système productif où l'énergie, plus rare, va devenir plus 'coûteuse' en travail » (Hubert, 1980, p.65).

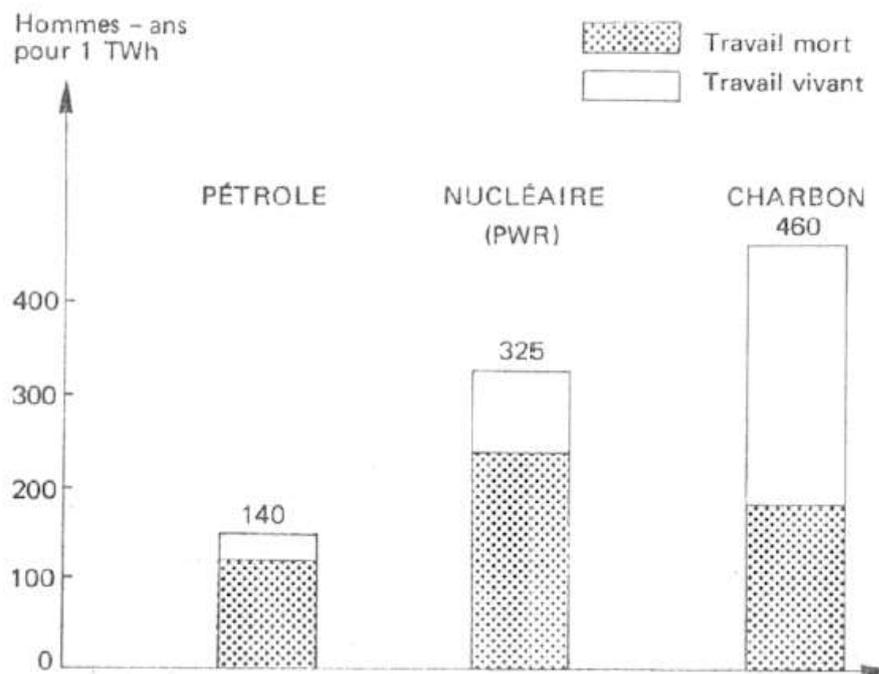


Figure 36. **Estimation du travail incorporé à la production d'électricité française en 1990 selon différentes sources d'énergie.**

Source : Hubert, 1980, p.75

L'électricité issue du pétrole reste donc, d'un point de vue physique, largement plus accessible que l'énergie d'origine nucléaire. Néanmoins, si l'on examine le prix du térawattheure (TWh), la hiérarchie s'inverse : en 1980, le TWh d'électricité issu de la filière fioul coûte 33,5 centimes, celui de la filière nucléaire 13,5 centimes et celui de la filière charbon 22,3 centimes (Hubert, 1980, p.76). L'électricité produite à partir du fioul coûte plus de deux fois plus cher que celle produite à partir de pétrole. Les prix relatifs de ces deux sources d'électricité divergent donc de leur contenu relatif en travail. A l'inverse, si l'on compare le prix de l'électricité nucléaire et celui de l'électricité produite à partir du charbon, le rapport entre les prix est plus proche du rapport en travail incorporé : il faut 1,41 fois plus de travail pour produire 1TWh dans la filière charbon que dans la filière nucléaire tandis que le coût de revient de la filière charbon est 1,65 fois plus élevé que dans la filière nucléaire. En application de notre cadre d'analyse¹⁷⁵, l'écart important dans la filière fioul peut s'interpréter comme manifestation d'une rente importante prélevée sur cette énergie : la valeur captée est en forte déconnexion des coûts de production physiques, ici mesurés en travail.

Une actualisation du travail de Hubert est techniquement envisageable dans la mesure où le calcul fait appel à une méthode éprouvée, les tableaux entrées-sorties souvent désignés par le terme anglophone correspondant « *tables inputs-outputs* ». Ces tables fournissent pour chaque secteur la quantité d'inputs, venant de différentes branches, pour produire une unité d'output. Elles indiquent la manière dont cet output est utilisé par les différentes branches (consommations intermédiaires) mais également par la demande finale. La quantité de travail direct employé par un secteur est également connue (extensions physiques) de sorte qu'il est possible d'estimer une quantité de travail indirect¹⁷⁶. Il est donc possible de calculer par cette méthode le contenu en emplois de la production du secteur énergétique. C'est ce que, par exemple, Philippe Quirion et Perrier (2017) font lorsqu'ils étudient les effets sur l'emploi d'une transition énergétique vers les énergies renouvelables en France. A partir des *tables inputs-outputs*, ils parviennent à calculer un contenu en emplois directs et indirects par euro de

¹⁷⁵ Au chapitre 3, nous avons défendu l'idée que les valeurs travail pouvaient être utilisées comme méthode comparative.

¹⁷⁶ Une difficulté importante est que la matrice des coefficients techniques ne prend en compte, par définition, que les consommations intermédiaires. L'achat du capital fixe est en effet une demande finale du secteur. Le détail des dépenses d'investissements (quels achat à quel secteur) n'est pas calculé (par exemple par le TES de l'INSEE). L'estimation du travail incorporé dans le capital fixe mobilisé est ainsi délicate. Hubert (1980) par exemple utilise des données d'entreprise sur la composition de l'investissement pour pallier le manque d'information. Cependant, de nombreux travaux font abstraction du capital fixe.

demande finale pour différentes branches. Si l'idée de travail incorporé, chère aux classiques, est peu éloignée de ce genre d'analyse, la question de recherche abordée diffère. Ces travaux cherchent à déterminer l'effet net en emplois sur un territoire spécifique d'une réallocation de productions d'un secteur (énergie fossile) vers un autre secteur (énergie renouvelable). Dans notre perspective, c'est tout le travail direct et indirect des branches énergétiques, qu'il soit domestique ou non, qui nous intéresse. Par ailleurs, nous ne recherchons pas le contenu en emplois d'un euro de demande finale mais celui d'une unité de production physique. Cela impliquerait de convertir les euros de demande finale en quantité de KWh d'électricité, de gaz, d'essence. Cette étape ne pose pas de difficulté particulière dans la mesure où la méthode inputs-outputs fait l'hypothèse de branches monoproduit et que les biens énergétiques sont relativement standardisés.

Pour la France, le modèle Avionic de l'INSEE fournit des séries de contenu en emploi des différentes branches. Au niveau le plus agrégé, il paraît possible de déterminer pour les différentes branches énergétiques le contenu en emploi (en EQTP) pour 1 million d'euros de consommation des ménages. Cependant, cela ne donne que le contenu national en emploi. Pour obtenir le contenu en emploi total, il faut intégrer le travail incorporé dans la balance commerciale. Des travaux, soucieux de mesurer les échanges écologiquement inégaux, ont déjà entrepris ce genre de calculs (Dorninger et al., 2021 ; Hickel et al., 2022 ; Pérez-Sánchez, Velasco-Fernández et Giampietro, 2021). Il est donc possible de mener cette analyse.

Prix relatif de l'énergie et accumulation du capital : le canal du taux de profit

La théorie classique permet aussi de mettre en évidence un canal de transmission du prix (relatif) de l'énergie vers la dynamique d'accumulation, que nous appellerons par la suite *canal du taux de profit*. Ce mécanisme est une illustration de ce que James O'Connor définit comme « seconde contradiction du capitalisme » (O'Connor, 1988). Alors que la première contradiction fait référence à l'exploitation des travailleurs, à la lutte des classes et aux conséquences que celle-ci peut avoir sur la dynamique du taux de profit et de l'accumulation, la seconde contradiction repérée par O'Connor a trait à l'exploitation intensive des ressources naturelles. A l'instar de l'exploitation des travailleurs, celle-ci vient affecter la dynamique d'accumulation : à mesure que les ressources sont exploitées, elles deviennent moins

accessibles ce qui, en retour, vient affecter la rentabilité du capital et le développement de la production. En effet, dans une perspective marxiste, le taux de profit s'analyse comme le rapport entre la plus-value (PL) et la totalité du capital engagé, ce dernier se répartissant entre capital constant, les machines et matières premières (et dont le montant total en monnaie s'écrit C), et capital variable, c'est-à-dire la force de travail, généralement noté V. Les ressources naturelles font donc partie du terme C et, toutes choses égales par ailleurs, plus leur valeur augmente, plus le taux de profit est réduit. Une autre manière de faire apparaître ce mécanisme suppose de réarranger l'équation du taux de profit. La formule de base s'écrit :

$$\text{Taux de profit} = \frac{PL}{C + V} \quad (1)$$

En divisant numérateur et dénominateur par V, on peut réexprimer le taux de profit comme rapport entre le taux d'exploitation (P/V) et la composition organique du capital (C/V) :

$$\text{Taux de profit} = \frac{\frac{P}{V}}{\frac{C}{V} + 1} \quad (2)$$

L'intérêt de cette réécriture est de faire apparaître le taux de profit comme la résultante de deux dynamiques : l'intensité de la lutte des classes pour le partage de la valeur (entre salaire et profit) et un paramètre socio-technique, la composition organique du capital (COC) qui rapporte la valeur des moyens de production aux salaires versés. La COC n'est pas un indicateur purement technique dans la mesure où les prix vont influencer ce ratio. Néanmoins, il existe bien une composante technique que Marx appelle la composition technique du capital (CTC) qui rapporte la quantité de machines (c) à celle de travailleurs (L)¹⁷⁷.

$$CTC = \frac{c}{L}$$

¹⁷⁷ On retrouve ici le problème de l'agrégation. Alors que la COC agrège C et V en monnaie, la composition technique suppose d'avoir un indicateur physique. Si pour les travailleurs, l'heure de travail apparaît satisfaisante, pour capital constant, l'unité physique pour agréger ne va pas de soi.

Si on ajoute à l'analyse, pc le prix unitaire du capital et w le salaire, la COC peut être exprimée par l'équation suivante :

$$COC = \frac{c}{L} * \frac{pc}{w}$$

$$COC = CTC * \frac{pc}{w}$$

Ainsi, parce qu'elle est un élément du capital constant, quand le prix de l'énergie augmente, toutes choses égales par ailleurs, le prix du capital constant (pc) augmente. La composition organique augmente, en particulier dans les secteurs où la composition technique (CTC) est la plus élevée. Deux conséquences en découlent : les branches les plus intensives en capital connaissent une baisse de leur taux de profit ce qui entraîne le taux de profit moyen de l'économie vers le bas. Cette situation n'est pas durable : pour que les capitalistes de ces branches acceptent de continuer à produire, une modification des prix relatifs doit intervenir, sinon ils auraient intérêt à investir dans les branches où la composition technique est moins intensive en capital, dans la mesure où le taux de profit y est, pour l'heure, supérieur. Par ce mécanisme de réallocation des capitaux¹⁷⁸, produisant des mouvements de prix relatifs, les taux de profit tendent à s'égaliser. Au terme de ce processus, l'ensemble des branches, intensives ou non, tend progressivement à s'aligner sur le nouveau taux de profit (moyen) macroéconomique. La baisse du taux de profit macroéconomique est ainsi étalée et supportée par l'ensemble des branches de la production.

Par la suite, la baisse du taux de profit tend à ralentir le rythme de l'accumulation voire à le ramener vers zéro, une situation appelée « état stationnaire », envisagée à la fois par Smith et Ricardo. Marx ne mobilise pas ce concept. La baisse tendancielle du taux de profit et du taux d'accumulation est heurtée (successions de baisses et de hausses) et conduit à une exacerbation du conflit de classe, l'une des contre-tendances étant l'augmentation de l'exploitation des travailleurs. Il n'en reste pas moins que Marx retrouve les classiques¹⁷⁹ quant

¹⁷⁸ Voir section 2.3. du chapitre 3

¹⁷⁹ Pour autant, l'interprétation de Marx se distingue de celle de Ricardo. En effet, Ricardo adhère à la loi de Say selon laquelle l'épargne (S), ex ante, finance l'investissement (I) ($S=I$). De son côté, Marx rejette la loi de Say. Par conséquent, si l'épargne finance l'investissement, c'est de manière ex post, comme le mettra en évidence Keynes à l'aide du concept de multiplicateur. Cette discussion est menée d'une manière plus approfondie à la section 4 de ce chapitre.

à l'importance du lien entre taux de profit et taux d'accumulation : le taux de profit reste le moteur de son modèle de croissance.

Le lien entre le taux de profit vers le taux d'accumulation peut être envisagé de deux manières. Tout d'abord le profit est la motivation pour les capitalistes à procéder à une reproduction élargie. Si le taux de profit espéré est jugé insuffisant, la production n'aura pas lieu. Or les anticipations de taux de profit se font en partie sur la base du taux de profit passé. Ensuite, un taux de profit nul correspond à une situation macroéconomique sans surplus, c'est-à-dire à une situation où il n'y a pas de ressources réelles libres pour financer l'expansion de la production. En effet, dans cette situation, l'ensemble du travail dépensé sert totalement et exclusivement à reproduire la classe salariale. Dit autrement, que l'on prenne du côté des motivations capitalistes ou des conditions de possibilité matérielle d'une expansion, le taux de profit règle, en régime capitaliste, le rythme auquel se fait l'accumulation et donc l'augmentation de la quantité produite de biens et de services.

A notre connaissance, il n'existe pas de travaux empiriques qui testent l'existence de ce canal du profit entre prix relatif de l'énergie et accumulation. Par exemple, dans la littérature marxiste, les travaux d'Husson (2009) présentent l'évolution du taux de profit et du coût de l'énergie (figure 37) en mettant en évidence une corrélation entre ces deux variables. Cependant, cette approche descriptive ne nous paraît pas suffisante pour au moins deux raisons : d'une part, le coût de l'énergie retenu n'est pas son prix relatif, mais la facture énergétique rapportée au PIB¹⁸⁰, ce qui ne permet pas de tester le canal du taux de profit (figure 35, chapitre 3). D'autre part, à l'inverse d'un travail économétrique, l'analyse de Husson reste au stade descriptif et ne permet pas de dire si la variable « coût de l'énergie » a un effet significatif sur le taux de profit.

¹⁸⁰ Cette variable est mobilisée par les travaux empiriques néo-physiocratiques. Voir le chapitre 3, section 1.2.



Figure 37. **Taux de profit et coût de la consommation d'énergie. France (1949-2006).**
 Source : Husson, 2009

Ce chapitre a pour objectif de pallier ces manques et développe une analyse économétrique de la relation entre le prix relatif de l'énergie et le taux de profit à partir d'un panel de 16 pays sur la période 1995-2019. Notre hypothèse de départ est qu'il existe une relation significative et négative entre le prix relatif de l'énergie et le taux de profit d'une économie. La présentation de ce travail empirique est l'objet des sections 1 à 3 de ce chapitre. Nous présentons les données retenues au cours de la section 1, leur construction et une première analyse descriptive. Nous abordons notre méthode dans la section 2, c'est-à-dire les différents modèles statistiques auxquels nous avons recours et la manière dont nous avons pris soin de les sélectionner. La section 3 est consacrée à l'interprétation des résultats. Le lecteur l'aura remarqué, ce travail statistique ne va pas jusqu'au dernier maillon du canal du taux de profit qui est le taux d'accumulation. Il s'arrête pour ainsi dire « avant » cette dernière étape. Ce choix s'explique par l'absence de relation mécanique entre profit et accumulation, contrairement à ce qu'une lecture (trop) rapide des thèses classiques pourrait laisser à penser. Cette difficulté n'est pas écartée, elle fait l'objet de notre section 4.

1. Construction et analyse descriptive des données

Sur la base des hypothèses formulées précédemment, nous retenons quatre variables pour mener à bien ce travail économétrique : une variable dépendante que l'on cherche à expliquer, le taux de profit, et 3 variables explicatives. Parmi ces trois variables, nous retrouvons, tout d'abord, le prix relatif de l'énergie, qui est la variable qui nous intéresse et dont on tente de saisir l'influence sur le taux de profit. A cette variable, nous avons adjoint deux variables de contrôle, fortement susceptibles d'influencer le taux de profit selon la perspective marxiste évoquée plus haut : le taux d'exploitation et la composition technique du capital. Le taux d'exploitation, d'abord, puisque ce dernier est au numérateur de la formule du taux de profit (cf. supra). Une baisse du taux de profit peut, en effet, être compensée par une augmentation de l'exploitation des travailleurs, c'est-à-dire de la part de la valeur ajoutée revenant aux capitalistes. C'est d'ailleurs une des contre-tendances repérées par Marx à la baisse tendancielle du taux de profit (Marx, Cohen-Solal et Badia, 1959). La composition technique du capital (CTC), ensuite, qui peut se définir comme le rapport entre la quantité *physique* de machines et de matières premières (le capital constant) rapportée au nombre de travailleurs ou d'heures de travail (le capital variable). Elle se distingue de la composition organique du capital (COC) qui rapporte la valeur du capital constant au capital variable. Les deux notions entretiennent un lien très fort puisque, à composition technique donnée, l'augmentation du prix du capital constant vient augmenter la COC (cf. supra). Dans la mesure où l'énergie fait partie des éléments du capital constant, l'augmentation du prix de l'énergie tend, toutes choses égales par ailleurs, à augmenter la COC et donc à diminuer le taux de profit. Or, plus la composition technique est élevée, plus une industrie est utilisatrice de machines et d'énergie, plus son profit va être affecté par une variation du prix de l'énergie. Nous le voyons au cours de l'année 2022 avec la flambée des prix de l'énergie : ce sont les branches les plus intensives qui sont touchées les premières. Il paraît donc nécessaire de contrôler la composition technique du capital.

Dans la mesure où le prix relatif de l'énergie est notre principale variable explicative, il nous faut également préciser sa relation aux autres variables explicatives. Théoriquement, la relation entre le prix de l'énergie et le taux d'exploitation est médiée par le taux de profit. En effet, si l'augmentation du prix de l'énergie affecte la composition organique du capital et fait

baisser le taux de profit, alors une des réactions des capitalistes pourrait être l'augmentation du taux d'exploitation. Dans ce cas, il y aurait une relation positive entre prix de l'énergie et taux d'exploitation. Cette relation n'a toutefois rien de mécanique puisqu'elle dépend en définitive du rapport de force entre les classes. C'est ce rapport de force qui déterminera qui des capitalistes ou des salariés supportera la hausse des prix relatifs de l'énergie¹⁸¹.

La relation entre le prix de l'énergie et la composition technique du capital peut *a priori* être envisagée comme une relation inverse. En effet, dans une certaine mesure, une augmentation du prix de l'énergie tend à rendre le prix du facteur travail plus attractif relativement à celui des machines. La composition technique cesse donc d'augmenter et peut même redevenir plus intensive en travail si les machines sont progressivement substituées. Un autre mécanisme possible est celui d'un investissement dans un parc de machines plus performant au plan énergétique. Compte tenu de la définition retenue de la composition technique ($\frac{\text{énergie}}{\text{heures de travail}}$), détaillée ci-dessous, la CTC est susceptible de diminuer. *A priori*, la relation entre le prix de l'énergie et la CTC serait négative. Voyons maintenant comment nous construisons ces données.

1.1. Le prix relatif de l'énergie (PR_NRJ¹⁸²)

Pour le prix de l'énergie, nous avons cherché à construire un prix relatif. En effet, le prix en valeur nominale n'a pas de véritable signification économique et doit être rapporté soit à un revenu nominal (pour voir le taux d'effort supporté par les agents économiques), soit à un indice général des prix. Fizaine et Court (2016) ou Husson (2009) choisissent d'utiliser la facture énergétique rapportée au PIB. Dans notre travail et dans la mesure où cela est cohérent avec l'hypothèse que l'on souhaite tester, nous privilégions la seconde option, à savoir celle du calcul d'un prix réel de l'énergie.

¹⁸¹ Un exemple de ce rapport de force en France en 2022 est la demande d'indexation des salaires portée notamment par la CGT : « *Il est temps de revenir à l'échelle mobile des salaires (...), un mécanisme de hausse automatique des grilles de salaires et des pensions de retraite sur l'inflation. Avec répercussion immédiate dans l'ensemble des branches* » (<https://www.cgt.fr/actualites/france/interprofessionnel/salaires/inflation-il-faut-reindexer-les-salaires-sur-les-prix>)

¹⁸² Nous précisons dès maintenant entre parenthèse l'abréviation du nom de la variable utilisée lors de la présentation des modèles en section 3.

Pour ce faire, nous avons compilé plusieurs sources et bases de données. L'OCDE, tout d'abord, couvre un grand nombre de pays et propose deux indicateurs : un indice des prix à la consommation énergétique et un indice du prix de production, c'est-à-dire le prix pratiqué par les industriels du secteur de l'énergie d'un territoire. Notons que l'OCDE utilise en grande partie des données mises à disposition par l'Agence Internationale de l'Énergie. Parmi les autres instituts statistiques qui collectent ce type de données figure Eurostat. L'institut européen produit des données sur le prix de l'électricité et du gaz pour les 27 pays européens, en distinguant les prix payés par les consommateurs de ceux payés par les industriels. Le tableau 33 ci-dessous résume les différentes bases de données consultées.

Source	Nom	Période	Acheteurs d'énergie	Energie concernée
OCDE	Indice du prix de l'énergie	1960-2021	Ménages	Toutes
	Indice des prix de production	1995-2021	Tous	Toutes
EUROSTAT	Prix d'achat intégrant taxes	1995-2021	Consommateurs	Gaz et électricité
	Prix d'achat intégrant taxes	1995-2021	Industriels	Gaz et électricité

Tableau 33. **Sources disponibles pour les prix de l'énergie**
 Source : auteur.

Nous avons opté pour les données produites par l'OCDE parce que celles-ci couvrent une plus grande période de temps et un champ plus étendu de pays. Cet indice des prix à la consommation pour l'énergie présente un avantage certain. Au-delà de la disponibilité des données, l'indice offre un chiffre unique pour l'ensemble des différentes énergies consommées, autrement dit l'évolution du *mix* énergétique au cours du temps est prise en compte. Une des difficultés rencontrées, toutefois, est que ce prix est celui payé par le consommateur, là où il serait préférable d'avoir des données sur les prix payés par les producteurs de biens et services pour une meilleure cohérence avec notre approche qui s'intéresse à un canal du profit.

Pour vérifier si ce choix est susceptible d'influencer nos résultats, nous avons pris soin de comparer, pour le cas français, l'évolution des prix obtenus à partir des différentes sources statistiques. La figure 38 ci-dessous montre que les tendances retenues sont globalement les mêmes. Nous en avons donc conclu que l'indice des prix à la consommation relative à l'énergie de l'OCDE était un *proxy* satisfaisant pour notre variable de prix relatif de l'énergie.

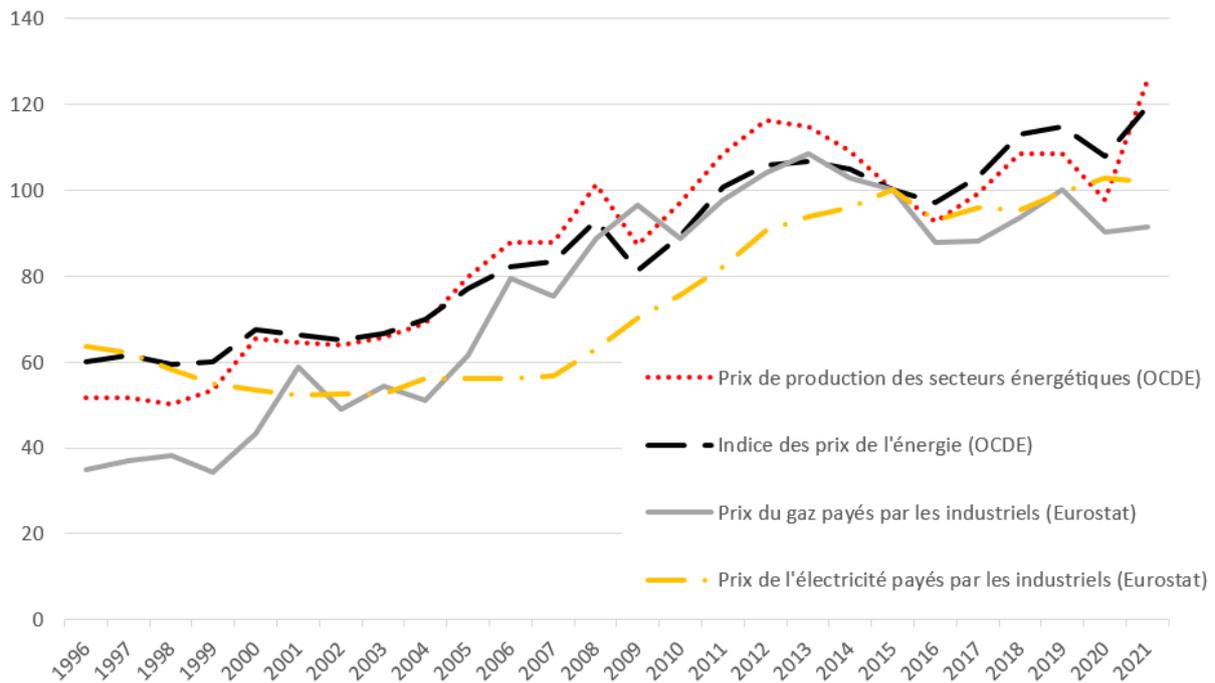


Figure 38. **Evolution du prix de l'énergie selon différentes sources – France (1995-2021). Base 100 = 2015.**

Source : auteur. Données : OCDE et Eurostat.

Dans un second temps, nous avons rapporté cet indice des prix de l'énergie à l'indice des prix à la consommation, là encore fourni par l'OCDE (figure 39). Lorsque l'indice du prix de l'énergie augmente plus rapidement que celui des prix, la valeur obtenue diminue, ce qui reflète bien une diminution du prix relatif de l'énergie. Nous relevons la divergence entre l'indice des prix de l'énergie et l'indice de prix relatif de l'énergie dans le cas de la France entre 1960 et 2020. L'année 1974 apparaît clairement comme une rupture puisqu'en l'espace de 10 ans le prix relatif, qui se situait autour de 0,67 depuis le début des années 1960, augmente de 50% pour atteindre 1. Après une redescente qui débute en 1985, ce prix relatif revient aux alentours des niveaux antérieurs (à 0,75, ce qui reste 10% plus élevé qu'en 1963). Il augmente

toutefois à nouveau à partir des années 2000 de manière heurtée, mais continue : la hausse atteint près de 50% en l'espace de 20 ans.

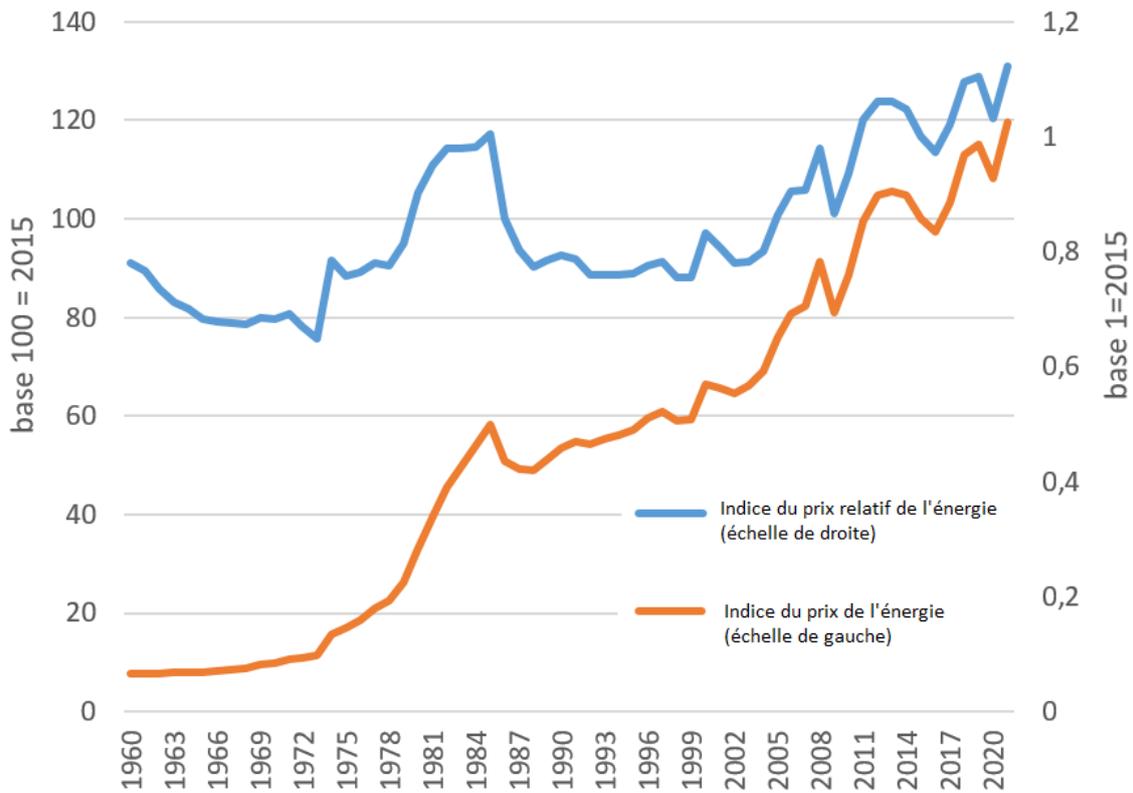


Figure 39. **Indice du prix relatif de l'énergie et indice du prix de l'énergie (France, 1960-2021)**

Source : auteur. Données : OCDE.

La figure 40 confirme le caractère de bien mondialisé de l'énergie avec des évolutions de prix relatifs très similaires entre les différents pays retenus dans notre étude, du moins pour la période 1995-2019 (figure 40).

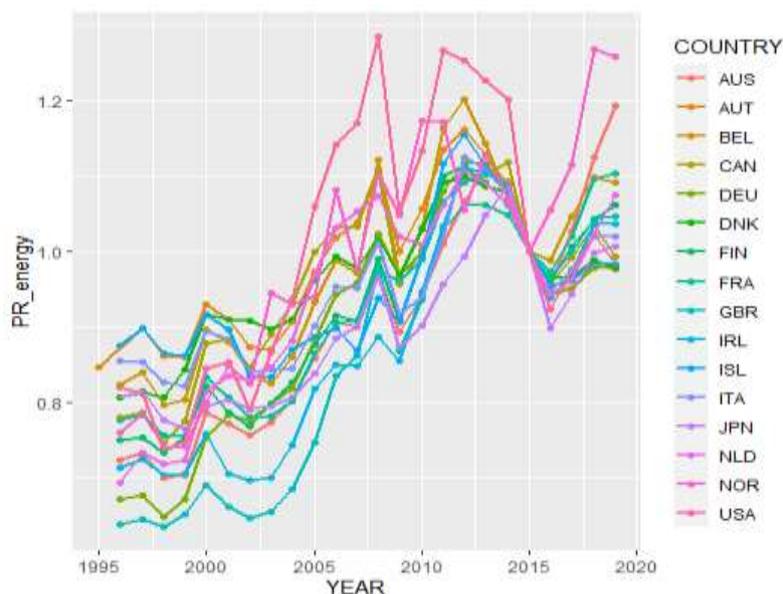


Figure 40. **Prix relatif de l'énergie – (16 pays, 1995-2019).**
Lecture : PR_energy désigne le prix relatif de l'énergie base 1 = 2015.
Source : auteur. Données : OCDE.

1.2. Le taux de profit (ProfitRate)

Le taux de profit est notre variable dépendante. Chez Marx, le taux de profit s'analyse comme le ratio entre la plus-value et la totalité du capital engagé, que celui-ci soit constant (prix des machines, matières premières) ou variables (salaires). Pour être totalement fidèle à son analyse, il faudrait rapporter le profit total à la valeur totale du capital engagé. Toutefois, la plupart des travaux marxistes appliqués contemporains ((Basu, 2017 ; Duménil et Lévy, 2002 ; Kliman et Williams, 2015) n'utilisent pas la formule originelle de Marx. Il en va de même du courant post-keynésien attentif à cette variable (Berr et al., 2018). Ces deux écoles préfèrent rapporter le profit net¹⁸³ à l'actif net immobilisé. Le capital net est une mesure en valeur du capital fixe installé auquel on a soustrait les amortissements. Du point de vue des entreprises, il correspond à l'actif. Le flux de profit d'une période s'apprécie à l'aune de cet actif possédé. Dans ce travail, nous suivons la littérature contemporaine et reprenons cette formule du taux de profit.

¹⁸³ Dans les comptes nationaux publiés par l'OCDE, cette donnée est appelée « *net operating surplus* ».

Cette formule admise, une controverse demeure quant à la définition du capital qui, d'après Husson, est « le choix le plus décisif ». Pour Husson (2010), deux grandes méthodes sont à distinguer : la valorisation *aux prix historiques* et celle *aux prix courants*. Dans le cas de la valorisation aux prix historiques, le nouveau capital est enregistré à sa valeur de marché (prix d'achat), tandis que, dans le cas des prix courants, la valeur des nouvelles machines est réévaluée à chaque période pour tenir compte du prix qu'il faudrait payer pour les remplacer. Les séries de capital net immobilisé de l'OCDE que nous utilisons correspondent au second cas, si l'on en croit la définition donnée par cette institution : [net fixed assets are] « equal to the actual or estimated current purchaser's price of a new asset of the same type less the cumulative value of the consumption of fixed capital accrued up to that point in time » (site de l'OCDE). Mis à part Kliman (1999), la majorité des auteurs marxistes utilisent des séries de taux de profit à prix courants.

La comparaison de notre série (1960-2019), à celles compilées par Husson (2010) pour le cas états-unien montrent plusieurs choses (figure 41). D'abord, on repère des différences en niveau : celui calculé par Husson oscille entre 18 et 6% tandis que le nôtre oscille entre 6 et 9,2%. Ces différences s'expliquent *a priori* par le périmètre des agents économiques retenus. Là où nous avons retenu l'ensemble de l'économie, Husson ne considère que les sociétés non financières et financières tandis que Brenner ne considère que les sociétés non financières. Dans notre cas, l'inclusion de secteurs institutionnels comme les administrations publiques peut en effet faire augmenter le capital fixe, sans augmenter le profit net puisque ces secteurs sont à but non lucratifs. Le profit net des sociétés financières et non financières sera donc dilué sur une masse de capital plus importante avec pour conséquence des taux de profit plus faibles. Sur la période, les tendances observées à partir de ces deux sources sont globalement similaires : le taux de profit augmente de 1960 à 1965, diminue ensuite continuellement jusqu'en 1981, réaugmente jusqu'en 1997 puis diminue jusqu'en 2002. La véritable divergence observée tient à la période 2003-2008 où notre série enregistre une stagnation et une forte baisse à partir de 2007, là où la série de Husson est croissante. L'évolution de notre série ressemble pour cette période à celle proposée par Freeman (2009). D'après Husson, critique des tendances identifiées par Freeman, cette divergence s'expliquerait par la prise en compte du logement (*residential structures*) dans le calcul du capital utilisé, ce qui « gonfle le capital en raison notamment de la hausse du prix des

logements » (Husson, 2010, p.9). Alors que Husson considère qu'il s'agit d'une « erreur » à corriger, nous pensons au contraire qu'un tel retranchement n'est pas justifié. Si le prix des logements augmente, les capitalistes doivent s'acquitter d'un prix d'achat plus élevé, ce qui rentre dans leur calcul de rentabilité. De même, ceux qui possèdent de tels actifs voient leur patrimoine augmenter.

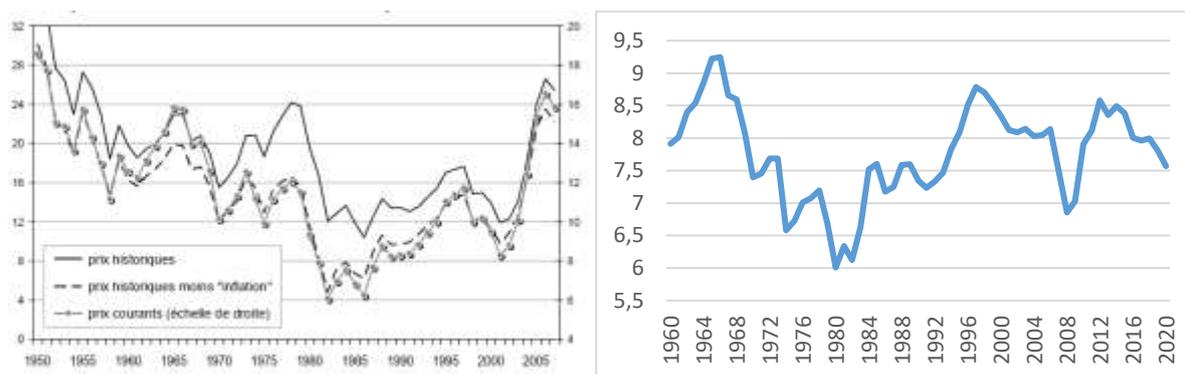


Figure 41. **Taux de profit aux Etats-Unis (1950-2008 et 1960-2019)**

Source : Husson (2010) pour le graphique de gauche et auteur pour le graphique de droite. Données : OCDE.

Pour la période (1995-2019) et l'échantillon (16 pays) étudiés, le taux de profit connaît des divergences importantes d'un pays à l'autre (figure 42). On notera, par exemple, un niveau plus élevé en Irlande et au Royaume-Uni (12,5 et 15% respectivement en moyenne). Le taux de profit minimum est atteint en Islande avec un taux moyen de 3%, soit 5 fois moins que le Royaume-Uni. Ces variations pourraient s'expliquer par différents positionnements dans les chaînes globales de valeur, différents états du rapport de force entre capitalistes et salariés mais également des différences dans les conventions comptables d'un pays à l'autre.

D'un point de vue dynamique, même s'il est délicat de parler pour tous les pays à la fois, la tendance semble plutôt être celle d'une baisse du taux de profit sur la période 1995-2008. Quoi qu'il en soit, la crise de 2008 est clairement visible et se traduit par une chute brutale des taux de profit. La période post-2008 tend plutôt à voir les taux de profit se stabiliser à un niveau inférieur à celui de la période antérieure.

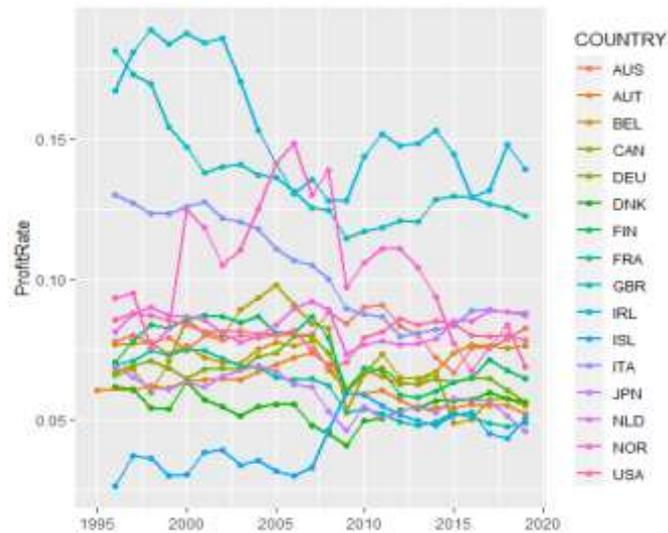


Figure 42. **Taux de profit des 16 pays étudiés (1995-2009)**
Source : auteur. Données : OCDE.

1.3. Le taux d'exploitation (Expl)

Chez Marx, le taux d'exploitation rapporte la plus-value aux salaires versés. En effet, la plus-value étant analysée comme du travail non payé, il est légitime de rapporter cette valeur à la rémunération du salarié. On obtient de la sorte le manque à gagner du salarié en système capitaliste. Par exemple, un taux d'exploitation de 15% signifie que la plus-value reçue par les capitalistes équivaut à 15% de la masse salariale. Dit autrement, sans exploitation capitaliste, les salariés auraient vu leur rémunération globale être plus élevée de 15%. Pour calculer ce taux d'exploitation, nous rapportons le profit net aux salaires bruts versés. Notons que la dispersion des taux d'exploitation (figure 43) est moins marquée que pour le taux de profit : mis à part l'Irlande et l'Italie, le taux d'exploitation moyen se situe autour de 40%. En dynamique, les évolutions sont contrastées et on ne peut pas vraiment dire qu'une tendance générale se dégage.

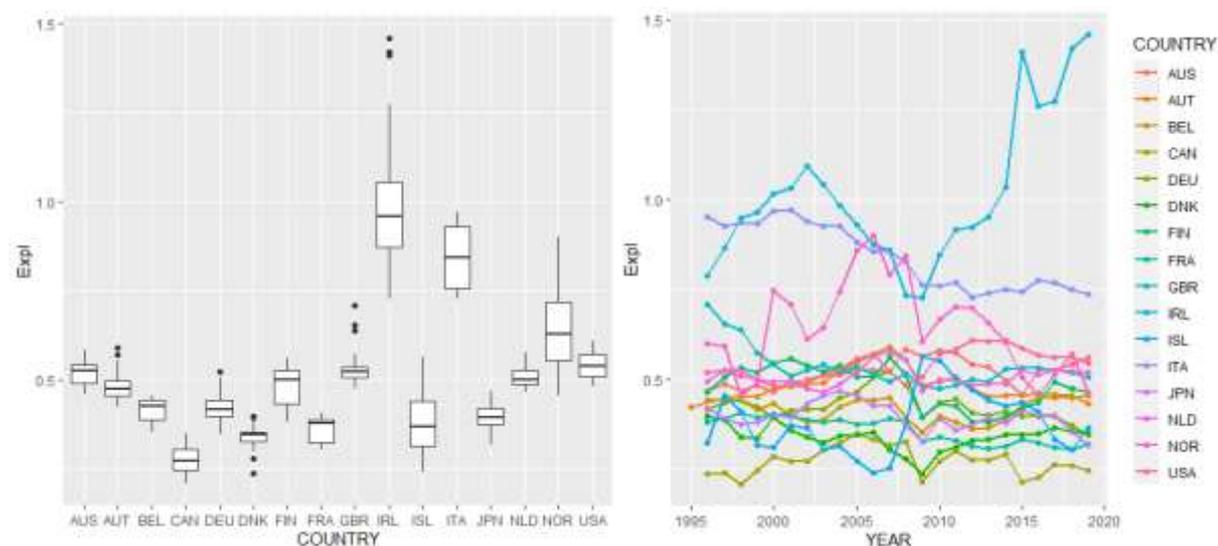


Figure 43. **Le taux d'exploitation de la force de travail dans l'espace et le temps (1995-2019)**

Source : auteur. Données : OCDE.

1.4. La composition technique du capital (CTC)

La composition technique du capital rapporte la quantité de moyens de production à la masse des travailleurs (exprimée en hommes ou en heures de travail). Usuellement, la littérature utilise une mesure du capital qui se veut un agrégat physique (le « capital réel ») mais, pour ce faire, déflate le capital en valeur. Nous avons abondamment discuté dans le chapitre 2 les raisons pour lesquelles le recours à des mesures monétaires pour décrire des variables physiques est insatisfaisant¹⁸⁴. En cohérence avec ces développements, nous privilégions une autre mesure de l'équipement par tête.

Dans la mesure où le parc de machines ne peut se passer d'énergie finale et que l'essentiel des services énergétiques utilisés (chaleur, mouvement mécanique, éclairage) pour réaliser la production sont générés par le parc de machines, on peut raisonnablement considérer que la consommation d'énergie d'un pays est un bon proxy du parc de machines à sa disposition. En rapportant cette quantité aux heures de travail utilisées dans une économie, on obtient une mesure, consistante d'un point de vue physique, du capital par tête. Notons

¹⁸⁴ Voir en particulier la section 2.3. qui expose, à partir de la controverse des deux Cambridge, l'impossibilité de mesurer une quantité de capital physique à partir de l'unité monétaire.

qu'un tel indicateur est déjà utilisé par la littérature en économie écologique (Giampietro, Mayumi, et Alevgul H Sorman, 2010). Il s'agit du *Energetic Metabolic Rate (EMR)* ou taux de métabolisme énergétique, en français. Ce dernier rapporte la quantité d'énergie finale consommée aux heures de travail, que cela soit au niveau d'un pays ou d'un secteur.

Le stade de l'énergie retenu mérite quelques précisions. Giampietro et al. (2010) utilisent l'énergie finale, c'est-à-dire la quantité consommée par les consommateurs finaux. D'autres auteurs comme Brockway et al. (2016) plaident pour une utilisation des services énergétiques puisqu'ils permettent de prendre en compte l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc de machines et de bâtiments¹⁸⁵. Dans notre cas, pour des raisons de disponibilités des données (1960-2021), nous avons été contraint d'utiliser la quantité d'énergie primaire compilée par l'agence internationale de l'énergie et mise à disposition par l'OCDE. Rappelons que l'énergie primaire est l'énergie qui a été extraite de l'environnement mais n'est pas prête (raffinée par exemple) à être mise à disposition des utilisateurs. Cependant, les quantités d'énergie primaire évoluent *a priori* au même rythme que la quantité d'énergie finale. En effet, les pertes liées à la conversion de l'énergie primaire en énergie finale (raffinage) sont *a priori* relativement stables sur la période étudiée, l'essentiel des progrès de conversion se situant entre le stade final et le stade utile de l'énergie (augmentation de l'efficacité énergétique des appareils). Compte tenu de ces éléments, nous retenons la notion d'énergie primaire.

Pour calculer une composition technique du capital, nous rapportons la quantité d'énergie primaire (exprimée en tonnes équivalent pétrole) au nombre d'heures travaillées dans le pays. Pour obtenir cette dernière donnée, nous prenons la force de travail (en nombre d'individus) et nous multiplions par le nombre moyen d'heures travaillées par travailleur. L'analyse de ces données (figure 44) révèle d'importants écarts de niveau entre pays. Ces écarts peuvent s'expliquer par différents facteurs : facteurs géographiques (le Canada et l'Islande ont un climat rigoureux qui induit une consommation d'énergie plus forte par tête), mais également reflets des spécialisations productives (la faible valeur des données pour le

¹⁸⁵ Voir l'encadré 1 du chapitre 1, section 2.2.2. qui présente plus en détail ces notions.

Royaume-Uni reflète très probablement sa spécialisation dans le secteur financier, par définition moins intensive en énergie que l'industrie¹⁸⁶).

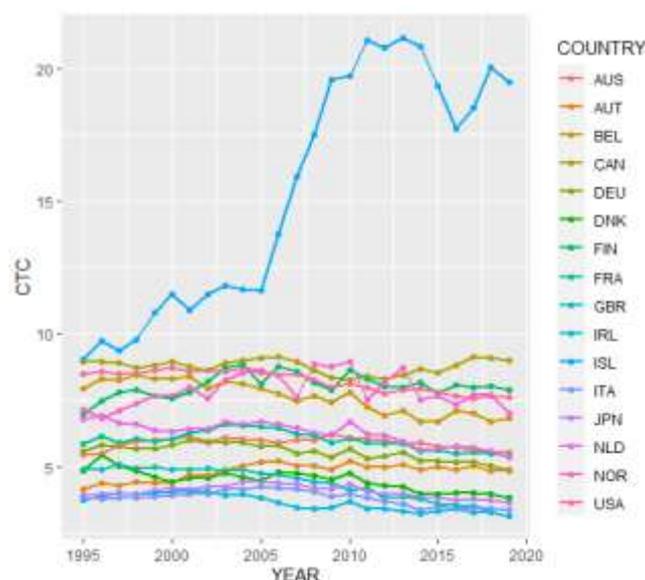


Figure 44. **La composition technique du capital (1995-2019).**
Source : auteur. Données : OCDE.

2. Présentation de la méthode : choix des modèles et des estimateurs

Afin d'étudier la relation existante entre le prix de l'énergie et le taux de profit, nous avons construit une base de données de panel cylindrée, c'est-à-dire que la période retenue est la même pour chacun des pays retenus et que les données sont complètes pour l'ensemble de cette période. Compte tenu de la disponibilité des données, nous couvrons la période 1995-2019 pour 16 pays de l'OCDE (Australie, France, Etats-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, Japon, Italie, Autriche, Belgique, Canada, Finlande, Irlande, Danemark, Norvège, Islande, Pays-Bas). Nous procédons en trois temps. D'abord, nous testons la stationnarité de nos variables,

¹⁸⁶ D'après l'agence internationale de l'énergie, dans les pays les plus développés où 2/3 du PIB proviennent des services, la part de l'énergie finale consommée est de l'ordre de 14%. En prenant en compte l'énergie indirecte, la consommation d'énergie totale des services est multipliée par 1,6. Cela reste toutefois inférieur au secteur industriel et au secteur des transports (Fourcroy, Gallouj et Decellas, 2015).

ensuite nous justifions le choix de l'équation économétrique retenue, enfin nous présentons les différents estimateurs utilisés.

2.1. Stationnarité des variables

Avant de choisir un modèle statistique, nous testons la stationnarité de nos variables. En effet, il est fréquent que les séries temporelles croissent au cours du temps, c'est le cas du PIB et de la consommation d'énergie par exemple. Leur variance et leur moyenne n'est alors pas stable au cours du temps et l'inférence statistique est limitée. Le risque de corrélation fallacieuse est élevé. Dans le cas de données de panel, la prise en compte de la stationnarité fut plus tardive que pour les séries temporelles mais elle est également importante (Hurlin et Mignon, 2005).

Pour apprécier la stationnarité de nos variables nous utilisons trois tests différents. Tout d'abord, un test classique ADF, adapté aux données de panel, est pratiqué. Ensuite, deux autres tests sont conduits, celui développé par Levin Lin et Chu (2002) ainsi que celui de Maddala et Wu (1999). Le choix du nombre de lag est laissé par défaut ou bien choisi à partir du critère d'information d'Akaike (AIC) quand le test offre cette possibilité. Les résultats présentés dans le tableau 34 indiquent que les séries utilisées sont bien stationnaires à l'exception de la composition organique du capital dans le cas du test de Levin Lin Chu. Compte tenu du résultat des deux autres tests, nous utilisons toutes nos séries sans corrections, y compris la composition organique du capital.

Valeurs : statistique t	Augmented Dicker-Fuller (1 lag)			Interprétation
	Constante			
Taux de profit	-4,1844***			Stationnaire
Prix relatif de l'énergie	-65663**			Stationnaire
Taux d'exploitation	-4,805***			Stationnaire
Composition technique du capital	-3,5101**			Stationnaire
Valeurs : statistique z	Levin Lin Chu (1 lag)			Interprétation
	Constante	Constante + tendance	/	
Taux de profit	-3,2144***	-2,9165***	-3,32256***	Stationnaire
Prix relatif de l'énergie	-2,1194**	-1,8362**	3,0059	Stationnaire
Taux d'exploitation	-3,1422***	-3,352***	-2,0758***	Stationnaire
Composition technique du capital	-1,8568	-2,6043***	-3,5665***	Non stationnaire
Valeurs : statistique khi2	Test de Maddala et Wu (lag=AIC)			Interprétation
	Constante	Constante + tendance	/	
Taux de profit	548,28***	714,19***	112,54***	Stationnaire
Prix relatif de l'énergie	411,66***	1007,2***	17,178	Stationnaire
Taux d'exploitation	646,12***	1129,7***	48,399**	Stationnaire
Composition technique du capital	258,63***	711,43***	240,32***	Stationnaire

Avec *** p<0,001, ** p<0,05 et * p<0,1

Tableau 34. Résultats des tests de racine unitaire.
Source : auteur

2.2. Le choix de l'équation économétrique utilisée

Pour confirmer l'intérêt de nos variables identifiées théoriquement, nous commençons par estimer de façon simple quatre équations présentées dans le tableau 35. La

première (équation A) est une régression simple avec notre principale variable dépendante (le prix relatif de l'énergie, noté « PR_NRJ »), les trois autres intègrent nos variables de contrôle (« Expl » pour le taux d'exploitation et « CTC » pour la composition technique du capital), soit une par une (modèles B et C), soit les deux à la fois (modèle D).

Modèle	Equation estimée
A	$ProfitRate = \alpha + \beta_1 PR_{NRJ} + \varepsilon$
B	$ProfitRate = \alpha + \beta_1 PR_{NRJ} + \beta_2 Expl + \varepsilon$
C	$ProfitRate = \alpha + \beta_1 PR_{NRJ} + \beta_2 CTC + \varepsilon$
D	$ProfitRate = \alpha + \beta_1 PR_{NRJ} + \beta_2 Expl + \beta_3 CTC + \varepsilon$

Tableau 35. **Les différentes équations estimées.**

Lecture : avec α , une constante ; β_1 , β_2 et β_3 les différents coefficients des variables explicatives et ε le terme d'erreur.

Source : auteur

Ce premier exercice d'estimation, dont nous reportons les résultats dans le tableau 36, confirme le caractère significatif de toutes nos variables dépendantes dans le cadre d'un modèle économétrique en « pool », c'est-à-dire traitant l'ensemble des données comme un seul et même pays. Nous réalisons cette première estimation à partir du régresseur OLS classique. Le coefficient R^2 croît à mesure que les variables sont ajoutées, ce qui confirme l'intérêt de retenir une équation avec trois variables (équation D) plutôt que deux (équations B et C). Cette première étape nous conduit en toute logique à retenir uniquement cette équation D.

	Modèles			
	A	B	C	D
Constante	13.44 *** (1.05)	6.36 *** (0.70)	14.84 *** (1.01)	7.04 *** (0.73)
Prix relatif de l'énergie	-5.70 *** (1.12)	-4.76 *** (0.69)	-4.89 *** (1.07)	-4.56 *** (0.68)
Taux d'exploitation		0.12 *** (0.00)		0.12 *** (0.00)
Composition technique du capital			-0.33 *** (0.05)	-0.10 ** (0.03)
R²	0.06	0.65	0.16	0.66
R² ajusté	0.06	0.65	0.16	0.66
Nombre d'observations	400	400	400	400

Avec *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$

Tableau 36. **Pool OLS avec les différentes variables explicatives.**
 Source : auteur.

2.3. Les différents estimateurs retenus

Dans un second temps, nous considérons quatre régressions économétriques complémentaires à la dernière (*Pool OLS*) que nous venons de présenter. Ces nouvelles régressions nous permettent de conforter la robustesse de notre démarche, comme le font par exemple Carpenter et Guariglia (2008) pour une estimation portant sur l'accumulation de capital fixe sur données de panel. Au final, nous reportons dans le tableau 5 les 5 régressions suivantes pour notre équation à trois variables :

- 1- **Un modèle pool avec estimateur OLS** (« *Pool Ordinary Least Square* ») où toutes nos données sont traitées comme celle d'un seul et même ensemble géographique. Ce

modèle a déjà été estimé puisqu'il s'agit des résultats pour l'équation D, modèle appelé par la suite « Pool ».

- 2- **Un modèle à effet fixe pays avec estimateur *within*** (modèle « Pays ») où la régression est menée pour chacun des 16 pays. Un modèle à effet fixe signifie que « la différence entre les individus peut être captée par la constante » (Greene et al., 2011, p.345). Ici, le modèle estimé va donc avoir une constante différente pour chacun des 16 pays.

- 3- **Un modèle à effet fixe temps avec estimateur OLS¹⁸⁷** (modèle « temps ») où la régression est menée pour chacune des années. Exemple : on compile l'ensemble des données de tous les pays pour l'année 1995 et on regarde la relation qui se dégage. Contrairement au modèle précédent, il existe non pas une constante pour chaque pays mais pour chaque année retenue.

- 4- **Un modèle avec effets fixes pays et temps avec estimateur OLS¹⁸⁸** (modèle à « deux effets ») qui combine les deux modèles précédents puisque on contrôle ici à la fois le pays et l'année.

- 5- **Un modèle aléatoire avec estimateur *random*** (« aléatoire ») : à l'instar d'un modèle à effet fixe, un modèle aléatoire va considérer que le fait d'être dans un pays A, plutôt que dans un pays B, va affecter la relation entre le profit et le prix de l'énergie. Cependant, contrairement au modèle à effet fixe, le modèle à effet aléatoire considère qu'il est possible que les pays répondent différemment à une variation du prix de l'énergie. En termes statistiques, la relation n'est pas seulement affectée par une constante différente.

¹⁸⁷ Il s'agit du même estimateur que pour le modèle « pool », la différence réside dans l'ajout d'une variable de contrôle : l'année.

¹⁸⁸ Il s'agit du même estimateur que pour le modèle « pool », la différence réside dans l'ajout de deux variables de contrôle supplémentaires : le pays et l'année.

3. Résultats économétriques : l'existence d'un canal du taux de profit

Dans cette section nous présentons tout d'abord les résultats des cinq modèles retenus. Nous précisons comment opérer un choix entre ces modèles à partir des différents tests. Dans un second temps, ces résultats sont interprétés.

3.1. Résultats et tests complémentaires

	Modèles				
	« Pool »	« Pays »	« Temps »	« Deux effets »	« Aléatoire »
Constante	7.04 *** (0.73)		9.86 *** (1.23)	3.77 *** (0.76)	5.58 *** (0.64)
Prix relatif de l'énergie	-4.56 *** (0.68)	-3.4 *** (0.34)	-8.71 *** (1.44)	-1.00 (0.08)	-3.43 *** (0.34)
Taux d'exploitation	0.12 *** (0.00)	0.09 *** (0.01)	0.12 *** (0.00)	0.08 *** (0.01)	0.09 *** (0.01)
Composition technique du capital	-0.10 ** (0.03)	0.21 *** (0.04)	-0.09 ** (0.03)	0.24 *** (0.04)	0.19 *** (0.04)
R²	0.66	0.50	0.68	0.94	0.50
R² ajusté	0.66	0.48	0.65	0.93	0.50
Nombre d'observations	400	400	400	400	400

Avec *** p < 0.01 ; ** p < 0.05 ; * p < 0.1

Tableau 37. **Résultats de la régression multivariée du taux de profit sur le prix relatif de l'énergie, le taux d'exploitation et la composition technique du capital.**
 Source : auteur.

On peut tout d'abord remarquer qu'à l'exception du modèle à « deux effets », quel que soit le modèle retenu, nos variables sont toutes significatives. Pour tous ces autres

modèles, nos variables indépendantes sont non seulement significatives, mais surtout les coefficients sont compatibles avec nos hypothèses :

- L'augmentation du prix de l'énergie tend à affecter négativement le taux de profit (modèles « pays », « temps », « aléatoire » et « pool »)
- Le taux d'exploitation tend à affecter positivement le taux de profit (tous les modèles)
- L'augmentation de la composition technique du capital tend à influencer négativement le taux de profit (modèles « pool » et « temps ») ou bien positivement (modèles « aléatoire », « pays », et « deux effets »)

Pour choisir entre ces différents modèles, plusieurs tests sont à considérer. Tout d'abord, il faut choisir entre un Pool OLS et un modèle à effet fixe pays. Un effet fixe pays permet d'estimer une multiplicité de modèle OLS pour chacun des pays considérés. L'effet fixe temps procède de la même manière, mais pour chacune des années, tous pays confondus.

Dans notre cas, il paraît *a priori* raisonnable de considérer un effet fixe pays. En effet, on peut estimer qu'il existe des variables inobservables, propres à chacun des pays étudiés. Par exemple, certains pays ont une position particulière dans les chaînes de valeur permettant un taux de profit plus élevé qu'ailleurs, comme l'a révélé l'analyse des taux de profit. Le recours à un test de Fisher (tableau 37) confirme cette intuition et met en évidence des effets significatifs liés à l'hétérogénéité entre les pays. A ce stade, le modèle à effet fixe pays doit donc être privilégié à un modèle pool.

Il nous faut ensuite déterminer si un modèle à effet fixe pays est à privilégier par rapport à un modèle à effet aléatoire. Pour ce faire, on peut réaliser un test de Hausman. Avec une *p value* < 0,05, ce test nous conduit à privilégier le modèle à effet fixe. Enfin, il faut pouvoir décider si les effets fixes pays doivent être combinés à un effet fixe année (modèle « *two way fixed* »). Là encore, un test permet de nous orienter : le *Lagrange multiplier test for time effect* (Breusch-Pagan) pour panel cylindrés. Avec une *p value* > 0,05, ce test nous conduit à privilégier le modèle avec seulement un effet fixe pays. Enfin, une dernière comparaison doit être menée : celle entre un modèle à effets fixes temps et un modèle à effets

fixes pays. Le recours à un test de Fisher permet de trancher en faveur du modèle à effets fixes pays.

Objectif/comparaison	Test utilisé	H0	Résultat	Interprétation
« Pool » VS « pays »	Fisher	« Pool » > « pays »	92,087***	« Pays » > « Pool »
« Pays » VS « aléatoire »	Hausman	« Aléatoire » > « pays »	11,987***	« Pays » > « Aléatoire »
Ajout d'un effet fixe au modèle « pays »	Lagrange multiplier	Pas d'ajout nécessaire	3.5472*	"Pays" > "double effet"
"Pays" VS "temps"	Fisher	"Pays" > "temps"	-31,913	"Pays" > "temps"

Avec * p < 0.01 ; ** p<0.05 ; * p<0.1**

Tableau 38. **Résultats des différents tests permettant de départager les modèles.**
 Source : auteur.

Pour finir, il nous faut tester différentes caractéristiques susceptibles de modifier la robustesse du modèle retenu. Les trois principales sont l'hétéroscédaticité (*heteroskedaticity*), l'autocorrélation (*serial correlation*) et la dépendance entre les sections (*cross sectionnal dependance*). Nous compilons les résultats de différents tests dans le tableau 39.

Objectif	Test pratiqué	H0	Résultat	Interprétation
Hétéroscédaticité	Breush-Pagan	Homoscédaticité	88.522*** (BP)	Présence d'hétéroscédaticité
Auto-corrélation	Breush-Goodfrey-Woolridge	Absence d'auto-corrélation	264,89*** (chisq)	Présence d'autocorrélation
Dépendance entre les sections	Breush-Pagan LM	Pas de dépendance entre les sections	586,4*** (chisq)	Présence de dépendance
Dépendance entre les sections	Pesaran CD	Pas de dépendance entre les sections	5,544*** (z)	Présence de dépendance

Avec * p < 0.01 ; ** p<0.05 ; * p<0.1**

Tableau 39. **Test de l'hétéroscédasticité, de l'autocorrélation et de la dépendance entre les sections.**
 Source : auteur ?

D'après Baltagi (2021), l'autocorrélation et la dépendance entre les sections peuvent poser problème pour des panels macroéconomiques avec d'importantes séries temporelles (au-delà de 20 à 30 ans). Dans la mesure où notre étude porte sur une période de 24 ans et que nos données sont macroéconomiques, il est nécessaire de considérer une procédure pour prendre en charge leur présence. L'hétéroscédasticité conduit, elle aussi, à rendre contestables les estimations fournies par la méthode des moindres carrés (nos différents estimateurs étant tous dérivés de cette méthode¹⁸⁹). La littérature en économétrie suggère différentes pistes pour prendre en compte le comportement des erreurs du modèle.

La première solution consiste à conserver un modèle utilisant la méthode des moindres carrés (*Ordinary Least Square*) mais avec des erreurs standard robustes (*robust standard error*) (Bai, Choi et Liao, 2020). Dans le cas où l'hétéroscédaticité, l'autocorrélation

¹⁸⁹ Les modèles à effets fixes s'apparentent à un OLS classique auquel on ajoute des variables de contrôle « pays » et « temps ».

et la dépendance entre les sections sont présentes, Hoechle (2007) préconise d'utiliser l'estimateur *Driscoll-Kraay*.

La seconde solution proposée par Bai et al. (2021) consiste à utiliser un modèle FGLS (pour *Feasible Generalized Least Square*) dès lors que le nombre d'années T est supérieur au nombre d'individus N, ce qui correspond à notre situation (T= 25 et N=16). Ce type de modèle permet l'estimation en présence d'autocorrélation, de dépendance entre les sections au sein du panel et d'hétéroscédaticité à travers le panel.

Force est de constater que la prise en compte de l'autocorrélation, l'hétéroscédaticité et la dépendance entre les sections ne viennent pas changer nos résultats. Les deux méthodes (Discroll & Kray et FGLS) nous donnent des coefficients significatifs (tableau 40).

	Modèles		
	« Pays »	« Discroll & Kray »	« FGLS »
Prix relatif de l'énergie	-3.4 ***	-3.4*	-3.4***
Taux d'exploitation	0.09 ***	0.09*	0.09***
Composition technique du capital	0.21***	0.21***	0.21***
R²	0.50	0.50	0.39
Adj. R²	0.48	0.48	
Nombre d'observations	400	400	400

*** p < 0.001 ; ** p < 0.01 ; * p < 0.05

Tableau 40. **Résultats des 3 modèles : effet fixe, Discroll & Kray et FGLS.**
 Source : auteur

3.2. Interprétation des résultats

L'estimation des deux modèles est compatible avec nos hypothèses. Tout d'abord, le prix de l'énergie apparaît bien comme étant négativement corrélé avec le taux de profit. Le coefficient est -3,4. Cela signifie que lorsque l'indice du prix relatif de l'énergie augmente d'une unité, alors le taux de profit diminue de 3,4 points de pourcentage. L'interprétation d'une unité de prix relatif n'est pas évidente de prime abord. Pour se la représenter, il faut rappeler les valeurs de prix relatifs : le prix relatif de l'énergie est compris entre 0,75 et 1,10 environ, entre 1995 et 2019, tous pays confondus. La variation du prix relatif de l'énergie sur la période est donc inférieure à l'unité. L'augmentation d'une unité représente, dans le cas d'un prix relatif à 0,75, une augmentation de 130%. Sur la période étudiée, l'indice du prix de l'énergie n'a augmenté que de 0,35 unité, soit d'environ 46%. Si on accepte un calcul sommaire, il se trouve que l'augmentation du prix relatif de l'énergie aurait donc coûté de $0,46 * 3,4 = 1,19$ point de taux de profit entre 1995 et 2019. L'effet apparaît donc conséquent sur la période.

Le coefficient du taux d'exploitation va également dans le sens de nos hypothèses. D'après les deux modèles, il existe une corrélation positive entre le taux d'exploitation et le taux de profit. Ici, l'interprétation est plus aisée car la valeur du taux d'exploitation est, elle aussi, en pourcentage. D'après nos résultats, une augmentation du taux d'exploitation d'un point conduit à une amélioration du taux de profit de 0,085 point. Sur la période étudiée, les évolutions du taux d'exploitation sont trop disparates d'un pays à l'autre, mais l'on peut illustrer le propos à partir d'un pays. En France, le taux d'exploitation, soit le rapport entre l'ENE et les salaires bruts, passe de 40,6% à 31,9%, entre 1995 et 2019, une baisse de 8,7 points en 25 ans. Compte tenu du coefficient de corrélation, on peut considérer que cela a participé à une baisse du taux de profit de 0,73 point ($8,7 * 0,085 = 0,73$).

Les résultats concernant la composition technique du capital (CTC) diffèrent de ce que nous avons prédit théoriquement. En effet, nous avons estimé que l'augmentation de la composition technique, en tant que partie intégrante de la composition organique du capital, venait, toutes choses égales par ailleurs, peser négativement sur le taux du profit. Or, en l'espèce, nos résultats révèlent une corrélation positive entre ces deux variables : une augmentation de la composition technique s'accompagne d'une augmentation du taux de

profit. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce résultat. A court terme, l'augmentation de la composition technique du capital peut avoir un effet positif sur le taux de profit par le biais de la plus-value extra. En effet, les capitalistes qui modernisent l'outil de travail mettent en place des méthodes plus économes en travail humain. Temporairement, dans la mesure où cette avance technologique reste localisée, le prix des marchandises reste le même (le travail socialement nécessaire est resté le même), de sorte que ces capitalistes vont bénéficier d'une plus-value plus importante relativement aux autres. Par conséquent, la relation entre la composition technique du capital et le taux de profit n'est pas unilatérale, comme nous le résumons dans la figure 45.

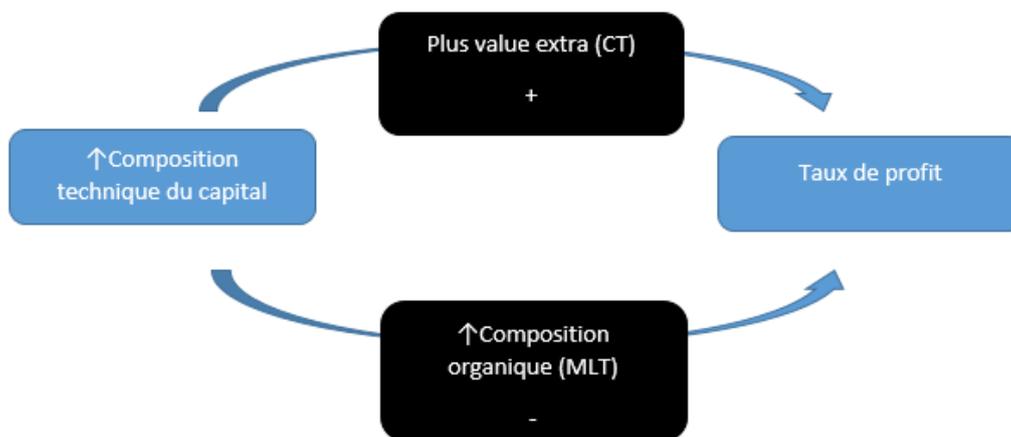


Figure 45. **La relation entre composition technique du capital et le taux de profit.**
Source : auteur.

Le coefficient obtenu pour la composition technique du capital est de 0,21. Comme pour le prix relatif, son interprétation demande quelques explications. En effet, la CTC est le ratio entre quantité d'énergie en tonnes équivalent pétrole et le nombre total d'heures travaillées dans un pays. D'après nos résultats, une augmentation de 1 unité de ce ratio a entraîné une augmentation du taux de profit de 0,21 point. Pour illustration, sur la période, la CTC française passe de 6,12 à 5,4, soit une baisse de 0,72 point. Un simple produit en croix

montre qu'en France, cette baisse de la CTC a conduit à une baisse du taux de profit de l'ordre de 0,15 point ($0,72 \times 0,21 = 0,15$).

Ces résultats peuvent s'interpréter de plusieurs manières. Si on s'en tient à notre indicateur initial, la quantité de machines par tête a été réduite avec un effet négatif sur le taux de profit. D'après la figure 45, ce serait plutôt l'effet de court terme qui serait à l'œuvre, la démécanisation relative entraînant une chute de la plus-value extra et, avec elle, du taux de profit. Cependant, la chute de la CTC peut également provenir d'une *amélioration de l'efficacité énergétique* du capital fixe installé. Dans ce cas, l'énergie finale par tête peut diminuer tandis que, dans le même temps, la puissance mécanique délivrée par ces machines, moins énergivores, est accrue. Les données en énergie utile, *proxy* de la puissance mécanique, tirée de Serrenho et al. (2014), confirme cette trajectoire pour le cas français : le ratio énergie utile sur heures de travail a augmenté en France de 4,8% entre 1995 et 2008. L'interprétation que l'on peut faire du résultat est ainsi différente. Mesurée au stade utile, la composition technique du capital augmente, ce qui conduit à une baisse du taux de profit. On retrouve, finalement, l'effet de moyen-long terme mis en évidence sur la figure 45 : l'équipement, plus moderne, augmenterait la composition organique du capital.

Conclusion des sections 1, 2 et 3

En résumé, nous pouvons dire que ce travail empirique vient largement valider les hypothèses formulées par le cadre d'analyse marxiste. Ce dernier apparaît donc heuristique pour saisir la manière par laquelle l'énergie, valeur d'usage indispensable à l'économie, exerce ses effets sur la dynamique de croissance. En particulier, nous mettons en évidence un canal du taux de profit qui, jusqu'ici, paraît avoir été négligé par la littérature en économie écologique qui lui préfère la facture énergétique¹⁹⁰. En contrôlant le taux d'exploitation et la composition technique, l'effet de l'énergie est significatif sur le taux de profit, confirmant l'hypothèse d'une action par le biais de la composition organique du capital. Par ailleurs, conformément aux développements du chapitre 2 sur l'importance de distinguer agrégats monétaires et physiques, nous avons utilisé une mesure physique de la composition technique

¹⁹⁰ Voir sur ce point la section 1.2. du chapitre 3

du capital, là où les travaux marxistes appliqués continuent d'utiliser une mesure du capital déflatée¹⁹¹. Ce travail exploratoire mériterait d'être prolongé et approfondi dans plusieurs directions.

Tout d'abord, au niveau des données retenues, il serait pertinent de mener une comparaison de nos résultats avec d'autres mesures de la composition technique du capital. Nous pensons ici à l'usage du stade utile de l'énergie que nous avons brièvement mobilisé pour le cas français. En effet, le développement des forces productives peut être approché par la quantité de machines (la quantité d'énergie) mais la puissance productive de ces machines dépend pour partie de l'efficacité énergétique. En partant du stade utile de l'énergie, les effets de l'efficacité énergétique pourraient être pris en compte.

Du côté du côté du calcul du taux de profit, notre travail gagnerait à mobiliser des données plus fines. En effet, une des limites évoquées est notre définition très macroéconomique du profit, sans distinction entre les secteurs lucratifs et non lucratifs. Une réplification de cette étude à partir du seul taux de profit des sociétés non financières et financières, ou bien sur données sectorielles serait souhaitable. Cela supposerait toutefois de disposer des autres variables mobilisées dans la régression à ce niveau plus méso-économique. Au-delà des acteurs retenus, une autre mesure du taux de profit pourrait être utilisée. Nous pensons par exemple aux propositions de Guy et du Tertre de considérer comme capital engagé non pas l'actif net mais la totalité du passif. En effet, au niveau macroéconomique, ce sont ces différents éléments du passif qui vont être rémunérées et qui représentent différentes fractions du capital (le capital industriel, le capital bancaire pour rester à un premier niveau de désagrégation).

Au niveau de la période étudiée, il serait également intéressant de l'allonger. Pour certains pays (Etats-Unis, Australie, Japon, France, pour ne citer qu'eux), l'ensemble des données utilisées dans ce travail existe bien avant 1995 (1960 pour les Etats-Unis, 1980 pour

¹⁹¹ Par exemple, Husson défend cette position la mesure de la composition technique en ces termes : « L'indicateur le plus simple est le capital par tête qui rapporte le stock de capital – le nombre de machines si l'on veut – aux effectifs employés ou au nombre total d'heures de travail. Mais, fera-t-on remarquer, un tel concept de "capital" défini comme un stock de moyens de production est étranger à la théorie marxiste et ne fait sens que dans la théorie néo-classique. Une telle objection n'est cependant pas légitime, parce qu'elle confond des problèmes de mesure avec la critique d'un concept » (Husson, 1999). D'après Husson l'usage pour démontrer la théorie de la répartition néoclassique serait donc à distinguer de l'usage pour mesurer une quantité physique de capital. Pourtant, le chapitre 2 a montré que des mesures physiques sont disponibles et préférables.

le Japon, 1978 pour la France). Dans notre étude, nous avons privilégié le panel cylindré le plus large, mais un travail statistique sur un panel plus restreint sur plus longue période aurait un intérêt certain. En particulier, travailler sur les années 1960-1980 permettrait de tester nos hypothèses sur une période particulièrement importante de l'histoire économique et énergétique des pays développés, le choc pétrolier, caractérisée par des variations du prix de l'énergie fortes et rapides (figure 39). Dans une perspective régulationniste, les indicateurs et sens de corrélation obtenus aux différentes périodes et dans les différents pays pourraient servir à caractériser certains régimes nationaux d'accumulation du capital (Amable, 2005 ; Boyer, 2004) et mettre en évidence des rôles différents de l'énergie dans le profit et l'accumulation. Notre analyse pourrait à terme être étendue à la période actuelle, caractérisée par une hausse forte du prix relatif de l'énergie, mais trop récente pour disposer de suffisamment de données.

Au niveau des équations estimées, nous avons choisi de faire un lien direct entre prix de l'énergie en contrôlant le taux d'exploitation et la composition technique. Un travail complémentaire serait d'étudier directement la relation entre le prix de l'énergie – composition organique du capital (COC). En effet, cette relation est le maillon clef du canal théorique que nous avons mis en lumière : le prix relatif de l'énergie (PR_{NRJ}) augmente la COC ce qui fait baisser le taux de profit. Il est ainsi possible de mener un autre travail économétrique qui prend la COC comme variable dépendante et de contrôler la composition technique du capital (CTC). Cette équation économétrique prendrait la forme :

$$COC = \alpha + \beta_1 PR_{NRJ} + \beta_2 CTC + \varepsilon$$

Comme expliqué en fin de chapitre 3, dans une optique marxiste, la question du rapport entre composition technique et composition organique est fondamentale mais reste théoriquement indéterminé.

Ces prolongements potentiels évoqués, nous allons maintenant aborder la relation entre le taux de profit et le taux d'accumulation.

4. Du taux de profit au taux d'accumulation : une réflexion à partir des travaux post-keynésiens

Dans la section précédente, nous avons mis en évidence une relation positive entre le prix de l'énergie et le taux de profit. Dans cette section nous présentons une analyse de la relation entre le taux de profit et le taux d'accumulation.

Tout d'abord, il faut préciser ce que l'on entend par taux d'accumulation et dans quelle mesure cette notion se distingue de celle du taux de croissance économique. Dans la pensée classique, les deux termes sont synonymes. Chez Marx par exemple, le taux d'accumulation représente le rythme auquel le capital croît d'une période à l'autre, le capital désignant à la fois le capital constant (machines et matières premières) et le capital variable (la force de travail). Il s'agit en définitive d'accumuler des facteurs de production. Dans les approches plus contemporaines, le capital est pris dans le sens plus étroit de capital fixe (K). Le taux d'accumulation désigne alors le ratio $\frac{\Delta K}{K}$ c'est-à-dire le taux auquel le capital fixe augmente. Dans la mesure où le nouveau capital installé résulte d'un flux d'investissement (I), le taux d'accumulation s'écrit aussi $\frac{I}{K}$. L'idée sous-jacente est la même que chez les classiques : le capital installé détermine les capacités de production de l'économie donc l'offre. Taux de croissance et taux d'accumulation sont donc, là encore, synonymes¹⁹². Nous utiliserons donc de manière indifférenciée « taux d'accumulation » et « taux de croissance ».

L'objectif de cette section est de comprendre les liens qui unissent le taux de profit et le taux d'accumulation. En effet, si le taux de profit détermine de manière mécanique le taux de croissance, alors le canal entre prix de l'énergie et taux de profit affecte proportionnellement le taux de croissance. Nous procédons en trois temps. Tout d'abord nous présentons les mécanismes qui font du profit une source importante de l'investissement (4.1.) Puis nous abordons, les raisonnements, comme la loi de réalisation des profits de Kalecki, qui font apparaître le profit comme une conséquence de l'investissement (4.2.) Pour

¹⁹² A titre d'exemple, un récent manuel post-keynésien (Lavoie, Monvoisin et Ponsot, 2021) écrit : « qu'est-ce qui détermine le taux de croissance de l'économie ? Robinson a proposé une réponse à cette question. Elle suppose que le taux d'accumulation de l'économie, le taux de croissance du stock de capital décidé par les entrepreneurs, dépend du taux de profit anticipé » (p.90)

finir, nous montrons comment ces deux dimensions peuvent être combinées pour saisir le rôle de l'énergie dans la dynamique d'articulation (4.3.)

4.1. Le profit comme source de l'accumulation de capital

Une première manière de voir le profit est de le considérer comme la source permettant l'investissement donc l'accumulation du capital. Cette notion de sources renvoie à deux types de canaux : 1) le profit peut fournir des ressources financières pour l'investissement (via l'autofinancement notamment). Nous appellerons ce canal, *canal des ressources*, 2) le (taux de) profit actuel peut aussi être une motivation ce qui encourage l'investissement. On parlera dans ce cas de *canal de la rentabilité espérée*.

Chez les classiques, le lien entre taux de profit et taux d'accumulation est évident, pour ne pas dire automatique et se fait du profit vers l'accumulation. Chez Ricardo par exemple, cette conclusion est liée à la loi de Say : les entreprises versent un profit aux capitalistes et tout ce qu'ils épargnent finit en investissement. L'épargne sur profit fournit les ressources de la croissance. Cependant, considérer que le profit offre des ressources n'implique pas d'adhérer à la loi de Say. Pour preuve, les auteurs postkeynésiens développent aussi de tels arguments¹⁹³. Au sein de ce courant, Kalecki, explique :

*« Investment decisions are closely related to
'internal' accumulation of capital, i.e. to the gross savings of firms.
There will be a tendency to use these savings for investment,
and, in addition, investment may be financed by new outside funds on the
strength of the accumulation of entrepreneurial capital »
(Kalecki, 1952, p.97)*

Non seulement, le profit fournit des ressources aux entrepreneurs mais il leur permet également de se financer plus aisément auprès du secteur bancaire. Au-delà d'être une capacité de financement, le profit est, lorsqu'il rapporté au capital engagé, un indicateur de rentabilité. Ainsi, l'amélioration du taux de profit vient augmenter la rentabilité espérée des projets :

¹⁹³ A l'instar de Marx et Keynes, les économistes postkeynésiens rejettent la loi de Say et l'idée que l'épargne préalable financerait l'investissement au niveau macroéconomique.

« Another factor which influences the rate of investment decisions is the increase of profit per unit of time. A rise in profits from the beginning to the end of the period considered renders attractive certain projects which were previously considered unprofitable and thus permits an extension of the boundaries of investment plans in the course of the period. »
(Kalecki, 1952, p. 97)

Cette seconde relation entre taux de profit et accumulation est par exemple formalisée par Robinson (1962) : le taux d'accumulation est exprimée comme une relation linéaire de la rentabilité anticipée.

Selon ces premiers mécanismes mis en évidence, une augmentation du profit se traduirait par une augmentation de l'investissement. A quantité de capital engagé donnée, le taux de profit augmente le taux d'accumulation donc la croissance économique. De plus, le taux de profit indique le taux d'accumulation maximum d'une économie : « si le taux de profit disponible est de 20 % et si le profit est entièrement investi, alors le capital peut augmenter de 20% » (Husson, 2010, p.6). A première vue, cette citation de Husson correspond au premier mécanisme : le profit est disponible avant l'investissement pour le financer¹⁹⁴.

Pour autant, l'investissement du profit n'a rien d'automatique comme en témoigne la période ouverte depuis 1985 (voir figure 46). Alors que la part des profits dans la valeur ajoutée des sociétés non financières est passée d'un point bas dans les années 1980 de 24% à près de 33% soit 9 points en dix ans, l'évolution de l'investissement a été beaucoup plus modeste (+1 point environ). Cette déconnexion est un des faits stylisés du régime de capitalisme contemporain (Boyer, 2000).

¹⁹⁴ Nous verrons au 4.2. que cela est également vérifié dans l'optique où l'investissement est à l'origine du profit.

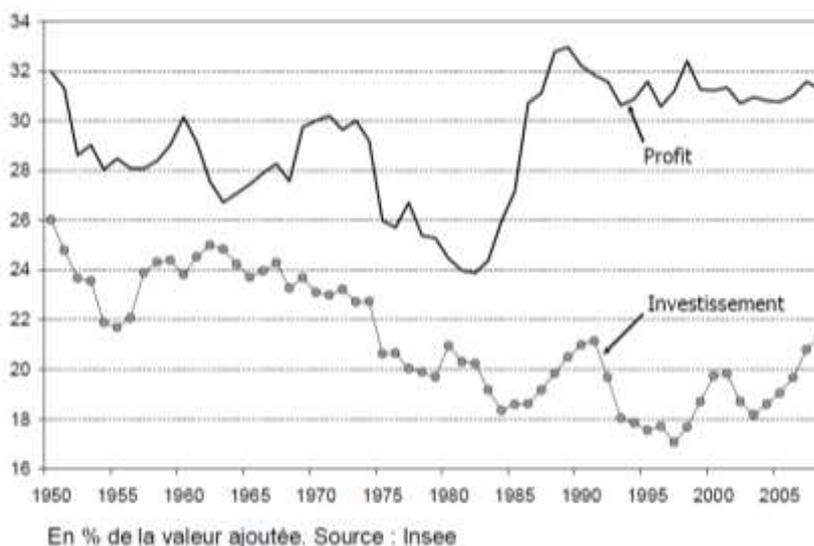


Figure 46. **Profit et investissement des sociétés non financières – France (1949-2008).**
Source : Husson (2010a, p.22)

Dans la perspective énoncée ci-dessus, cette situation de déconnexion entre profit et accumulation pose plusieurs questions. Tout d'abord, le canal de la rentabilité identifié par Robinson semble sévèrement mis à mal : le regain de rentabilité ne se traduit pas par le financement accru de nouveaux projets. Quel phénomène est à l'origine de ce résultat ? Pourquoi les entreprises n'investissent-elles par leurs profits ? Est-ce l'absence de nouveaux projets d'investissements rentables ? Ou bien est-ce les exigences de rentabilité des propriétaires des entreprises qui sont trop devenues trop élevés ? Pour Stockhammer (2006), les *cash flows* de profit des entreprises sont orientés vers les marchés financiers plutôt que l'investissement productif dans la mesure où ils offriraient un retour sur investissement supérieur :

« Firms do not invest because the rate of return on financial markets is higher, even though they might have the financial resources for investment. »
(Stockhammer, 2006, p.211)

Pour Husson (2010), cette chute du taux d'accumulation résulte d'un changement dans la gouvernance des entreprises et de la création de valeur pour l'actionnaire. Les exigences de rentabilité plus élevées ont pour effet de disqualifier des projets insuffisamment rentables de sorte que les entreprises se retrouvent avec des flux de cash disponibles à verser les

actionnaires, phénomène qui serait renforcé par une augmentation du taux d'exploitation de la force de travail. Ainsi, le taux de profit augmente sans que cela ne se traduise pas de l'investissement supplémentaire (figure 47).

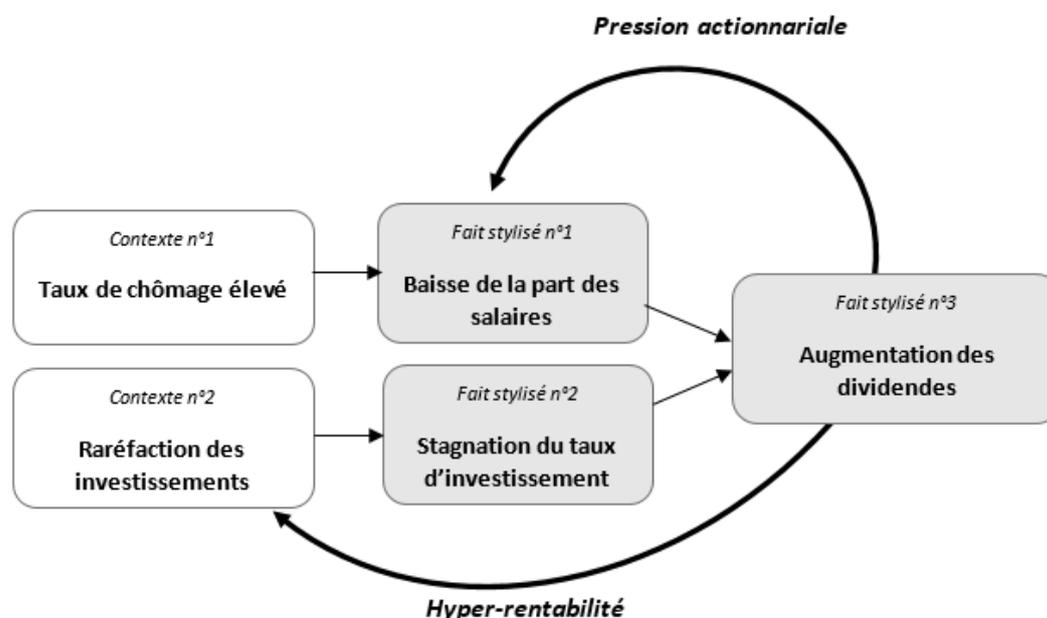


Figure 47. **Le ralentissement du taux d'accumulation dans le capitalisme contemporain.**
 Source : auteur à partir de Husson (2010b)

En application de ce cadre, une baisse du prix relatif de l'énergie vient affecter positivement le taux de profit cependant l'effet sur le taux d'accumulation est incertain. Une amélioration de la rentabilité pourrait encourager à financer de nouveaux projets mais la tendance suivie depuis les années 1980 montre qu'une amélioration de la rentabilité ne conduit pas à une hausse substantielle du taux d'accumulation. Inversement, une baisse du prix relatif de l'énergie réduirait la rentabilité ce qui disqualifie de nouveaux investissements jusqu'ici rentables. Le taux d'accumulation risque ainsi d'être réduit. Cependant, compte tenu du contexte de chômage, les propriétaires des entreprises peuvent également décider de reporter cette charge sur les salariés en augmentant le taux d'exploitation.

Cette première manière d'envisager la relation profit investissement suppose d'être confrontée à celle de la loi de Kalecki au sein de la théorie post-keynésienne pour qui la causalité s'exprime, à l'inverse, du taux d'accumulation vers le taux de profit. Alors que dans l'optique précédente, les faits stylisés contemporains conduisaient à la question : « pourquoi

la hausse du profit ne conduit-elle pas à plus d'investissement », dans cette nouvelle optique, elle devient « pourquoi la baisse de l'investissement n'entraîne-t-elle pas le profit avec elle ? ».

4.2. La loi de Kalecki : le taux d'accumulation comme source de réalisation du taux de profit

D'après l'approche post-keynésienne, le sens de la relation se fait de l'accumulation vers le profit. Appelée la loi de Kalecki (1966), cette relation peut être résumée par l'adage suivant : « les salariés dépensent ce qu'ils gagnent, les capitalistes gagnent ce qu'ils dépensent ». Une présentation rapide à partir de la comptabilité nationale permet d'illustrer cette idée.

Soit P le profit, W les salaires, C la consommation, I l'investissement, Q la production, K le stock de capital et p le prix unitaire. On fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de consommation intermédiaire, de sorte que $VA = p.Q$, que les salariés consomment l'intégralité de leur salaire et que les capitalistes ne font qu'investir (pas de consommation capitaliste).

On peut donc écrire :

$$P = p.Q - W \quad (1)$$

$$P = (C + I) - W \quad (2)$$

$$P = I \quad (3)$$

$$P/K = I/K \quad (4)$$

Dans ce modèle stylisé, on voit que le profit provient des dépenses d'investissement des capitalistes, le taux de profit dépend donc du taux d'accumulation au plan comptable et au cours d'une période. Dans cette perspective, le paradoxe du profit sans l'accumulation est plus saillant : si les capitalistes investissent moins, ils dépensent moins, ils devraient donc avoir un profit inférieur. Dès lors, une interrogation surgit : comment parviennent-ils à avoir un taux de profit positif, alors même qu'ils investissent moins ? Quels sont les facteurs qui autorisent cette déconnexion entre profit et accumulation ? Pour répondre à ces questions, nous

repartons d'une représentation simplifiée (salariés, capitalistes) de l'économie pour, dans un premier temps, mettre en évidence les conditions d'existence d'un profit comptable en l'absence d'investissement. Dans un second temps, nous complexifions le modèle (Etat, reste du monde) pour mettre en évidence d'autres sources du profit.

4.2.1. La loi de réalisation des profits de Kalecki : un exemple à partir des bilans comptables

Imaginons une situation avec une seule entreprise (possédée par un actionnaire) avec un seul salarié et du capital fixe déjà installé qui, par simplification, ne sera pas inscrit au bilan. L'entreprise produit une marchandise à partir de travail salarié qu'elle rémunère 1000€. La valeur qu'elle souhaite faire valider par le marché est 2000€, soit un profit de 1000€. La valeur ajoutée générée par l'activité de l'entreprise est donc de 2000€. On fait ici abstraction des consommations intermédiaires et du capital fixe. L'endettement auprès de la banque se fait à taux nul, ce qui permet de simplifier le raisonnement, en enlevant les charges d'intérêts.

1- L'entreprise achète la force de travail du salarié (1000€) en souscrivant un crédit à la banque

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Force de L 1000€	Dettes 1000€	Avoir à la banque : 1000€	Richesse nette 1000€		

2- L'entreprise dépense la force de travail louée et produit un bien d'une valeur de 2000€

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Marchandise 2000€	Richesse nette 1000€ Dettes 1000€	Avoir à la banque : 1000€	Richesse nette 1000€		

En consommant la force de travail, l'entreprise a ajouté 1000€ de valeur à la force de travail, qui demande toutefois à être réalisée sur le marché contre monnaie (prix = 2000€). Cette valeur (potentielle) augmente la richesse (à ce stade fictive) de l'entreprise de 1000€.

3- Le salarié dépense son salaire pour consommer et achète pour 1000€ de marchandises

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Marchandise 1000€	Richesse nette 1000€	Avoir à la banque : 0	Richesse nette 1000€		
Avoir à la banque : 1000€	Dette 1000€	Marchandise 1000€			

Avec la vente de la marchandise, 1000€ de recettes sont générées sous forme de monnaie. Une partie de l'actif a été converti en monnaie. A ce stade, l'entreprise couvre ses coûts (le salaire), il n'y a pas encore de profit. Toutefois, en vendant une partie de la production aux salariés, l'entreprise récupère de la monnaie qui va pouvoir *re-circuler* dès lors qu'elle est versée à l'actionnaire.

4- L'entreprise verse cet avoir monétaire sous forme de dividendes au propriétaire de l'entreprise

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Marchandise 1000€	Richesse nette 0	Avoir à la banque : 0	Richesse nette 1000€	Avoir en monnaie : +1000€	Richesse nette +1000€
Avoir à la banque : 1000€-1000€ = 0	Dette 1000€	Marchandise 1000€			

L'entreprise, anticipant des profits de 1000€, prend le parti de verser des dividendes pour un même montant qui, concrètement, sont financés (indirectement par l'endettement). 1000€ de richesse sont ainsi transférés de l'entreprise vers le propriétaire par le versement d'un dividende.

5- Le propriétaire actionnaire consomme en utilisant ses 1000€ de dividendes

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Marchandise 1000€ - 1000€ = 0	Richesse nette 0	Avoir à la banque : 0	Richesse nette 1000€	Avoir en monnaie : 0€	Richesse nette +1000€
Avoir en monnaie = 1000€	Dettes 1000€	Marchandise 1000€		Marchandise 1000€	

On suppose que l'actionnaire a une propension à consommer les dividendes de 100%. En achetant les marchandises, le propriétaire génère 1000€ de recettes pour l'entreprise. Ces recettes, dans la mesure où elles interviennent alors que les salaires ont déjà été versés, constituent le profit.

6- On consolide les bilans : les biens de consommation sont détruits en fin de période. L'entreprise rembourse sa dette

Entreprise		Salarié de l'entreprise		Propriétaire de l'entreprise	
Avoir en monnaie = 1000€	Dettes 1000€	Avoir à la banque : 0	Richesse nette 1000€	Avoir en monnaie : 0	Richesse nette +1000€
		Marchandise 1000€		Marchandise 1000€	

En fin de période, ces marchandises sont consommées. En réalité, elles ne créent pas de richesse nette. On efface donc la marchandise de l'actif. Notons que d'autres marchandises identiques devront être rachetées pour satisfaire la demande de consommation à la période suivante. Les 1000€ reçus de l'actionnaire-propriétaire servent à l'entreprise pour rembourser sa dette.

En résumé, toutes les marchandises (2000€) ont pu être achetées avec 1000€ de monnaie. Si l'entreprise avait décidé de rembourser sa dette à la fin de l'étape 3, le profit aurait été impossible (paradoxe du profit). La monnaie n'aurait pas pu continuer à circuler

pour venir acheter la totalité de la production. A l'inverse, à la fin de l'étape 6, le profit est bien réalisé, car les profits distribués ont été intégralement consommé par le ménage actionnaire. Si le ménage actionnaire n'avait pas consommé son dividende, le profit n'aurait pas été réalisé puisque la moitié des marchandises se serait retrouvée invendue. On retrouve ici la loi de réalisation des profits de Kalecki : les capitalistes gagnent ce qu'ils dépensent, ici la consommation financée par les profits distribués.

Le passage par les équations de la comptabilité nationale conduit aux mêmes conclusions. Il suffit d'ajouter au modèle initial la distinction entre une consommation salariale (C_w) et une consommation capitaliste (C_p), de sorte que $C = C_w + C_p$.

Dans ce cas, on a :

$$P = C_p + C_w + I - W \quad (6)$$

$$P = C_p + I \quad (6)$$

et avec $I=0$, $P = C_p$

Cet exemple fictif montre bien qu'il est possible, dans un modèle simple, d'avoir du profit sans accumulation. En effet, les capitalistes peuvent réaliser deux types de dépenses : de la consommation capitaliste ou bien de l'investissement (accumulation de capital fixe). Dans le cas où le profit consiste essentiellement en consommation capitaliste, il n'y a pas d'investissement, donc pas de reproduction élargie du capital : l'économie ne peut pas croître. Il est donc possible d'avoir un taux de profit positif avec un taux d'accumulation nul, en l'occurrence, lorsque les capitalistes consomment l'intégralité du profit. En complexifiant le modèle, nous allons mettre en évidence d'autres situations où il y a profit sans accumulation.

4.2.2. Les autres sources de profit comptable : la loi de Kalecki étendue

Dans le cadre du modèle précédent, nous avons vu que, pour qu'un profit comptable apparaisse, il fallait que les capitalistes reçoivent une somme supérieure aux salaires versés. En effet, « si les entreprises ne pouvaient compter pour alimenter leurs recettes que sur le reflux de ce qu'elles ont déjà dépensé en coût de production (les salaires), elles ne réaliseraient jamais un euro de profit. Il faut donc qu'une partie des dépenses qui leurs sont

adressées dépassent le montant des salaires qu'elles ont payés, sans toutefois que cette autre dépense provienne d'un coût de production » (Cordonnier, 2006, p.84). Dans un monde où il n'y a que des capitalistes et des salariés, cette dépense ne peut venir que des capitalistes eux-mêmes, soit sous la forme de consommation, soit sous la forme d'investissement. Cependant, en complexifiant le modèle, il est possible de mettre en évidence d'autres situations produisant ce résultat. On peut en présenter au moins trois : le déficit public, l'excédent commercial et la désépargne salariale.

Dans le cas du déficit public, l'État dépense plus qu'il ne prélève sur les agents économiques privés. Il injecte donc une demande nette supplémentaire dans le circuit économique. Les entreprises reçoivent un montant supérieur aux salaires sans qu'il ait été nécessaire pour les capitalistes ni d'investir, ni de consommer. En repartant des équations de la comptabilité nationale et en notant G les dépenses publiques et T les impôts, le profit P peut donc s'écrire :

$$P = (Cp + I) + (G - T) \quad (7)$$

Le cas de l'excédent commercial suit exactement la même logique, mis à part que cette injection nette de demande supplémentaire est réalisée par le reste du monde. Avec X , les exportations, et M , les importations, on peut ainsi enrichir notre formule du profit de la sorte :

$$P = (Cp + I) + (G - T) + (X - M) \quad (8)$$

Enfin, les comportements de désépargne des salariés viennent également influencer le taux de profit. Rappelons que, dans le modèle initial, les salariés ne disposaient que de leur salaire courant qu'ils consommaient intégralement. Or, en pratique, il est plus réaliste de considérer la possibilité pour les salariés de dépenser plus que leur salaire, soit par le biais d'un stock d'épargne préalablement constitué, soit par le recours à l'endettement. Dans les deux cas, ce comportement se traduit par une désépargne de la part des salariés, c'est-à-dire un *flux d'épargne négatif*. Une désépargne salariale vient contribuer positivement au profit et, à l'inverse, quand les salariés épargnent, cela réduit les profits. On peut ainsi compléter

l'équation (8) avec S_w , le flux d'épargne des salariés, ce qui nous donne l'équation la plus complète proposée par Kalecki :

$$P = (\mathbf{Cp} + I) + (\mathbf{G} - T) + (\mathbf{X} - M) - S_w \quad (9)$$

Par commodité, la somme des agrégats **en gras** sera appelée **A** par la suite. A désigne ainsi l'ensemble des flux monétaires qui contribuent positivement à la réalisation d'un niveau de profit mais qui ne sont pas des dépenses d'investissement. Notre objectif est ici de distinguer, les dépenses d'investissement (I) des autres dépenses (A). En divisant par le stock de capital (K), on retrouve la formule du taux de profit :

$$\frac{P}{K} = \frac{I}{K} + \frac{\mathbf{Cp}}{K} + \frac{(\mathbf{G} - T)}{K} + \frac{(\mathbf{X} - M)}{K} - \frac{S_w}{K} \quad (10)$$

$$\frac{P}{K} = \frac{I}{K} + \frac{A}{K} \quad (11)$$

Ainsi, le taux de profit d'une économie peut être décorrélé du taux d'accumulation, dès lors que $\frac{A}{K} > 0$. C'est l'évolution de ce terme qu'il importe de suivre pour mesurer à quel point le taux d'accumulation s'écarte du taux de profit. Dit autrement, l'écart entre le taux de profit et le taux d'accumulation s'expliquerait par la contribution positive de A/K .

Illustration à partir du cas états-unien (1970-2020)

A partir de l'équation 11, il est possible de proposer une analyse descriptive de l'évolution du taux de profit. La plupart des agrégats qui la composent sont directement disponibles dans les comptes nationaux. Les seuls agrégats qui ne soient pas disponibles et nécessitent une construction de notre part sont la consommation capitaliste (Cp) et le flux d'épargne salariale (Sw). Pour les obtenir, nous faisons l'hypothèse simple que capitalistes et salariés ont le même taux d'épargne. En pratique, il est fort probable que les capitalistes aient un taux d'épargne plus élevé que les salariés, étant donné que les premiers ont tendance à avoir un revenu supérieur aux seconds et que le taux d'épargne est une fonction croissante

du revenu. Les estimations présentées ci-dessous risquent donc de surestimer la consommation capitaliste et sous-estimer la consommation salariale.

L'épargne salariale (S_w) s'obtient en multipliant le taux d'épargne des ménages (s) par le montant total de la masse salariale (W).

$$S_w = s \cdot W$$

Du même coup, cela permet d'obtenir la consommation salariale (C_w).

$$C_w = W - S_w$$

On en déduit aisément la consommation capitaliste (C_p) qui est obtenue en soustrayant la consommation salariale à la consommation totale.

$$C_p = C - C_w$$

A partir de ces agrégats et des données de l'OCDE, nous calculons le terme A/K que nous comparons au taux d'accumulation (I/K) pour les États-Unis entre 1970 et 2020. Le taux de profit (P/K) est obtenu en faisant la somme de I/K et de A/K (voir figure 48). D'après nos données, la trajectoire états-unienne se caractérise par deux tendances. Le taux de profit a augmenté de près de 35% depuis 1970 tandis que le taux d'accumulation tend, lui, à diminuer, son niveau de 2020 étant 14% inférieur à celui de 1970. La divergence entre profit et accumulation présentée au 4.1. est également visible dans le cas états-unien. Enfin, le terme A/K connaît, au contraire, une forte croissance sur la période puisqu'il est multiplié par 2,17 (+ 117%).

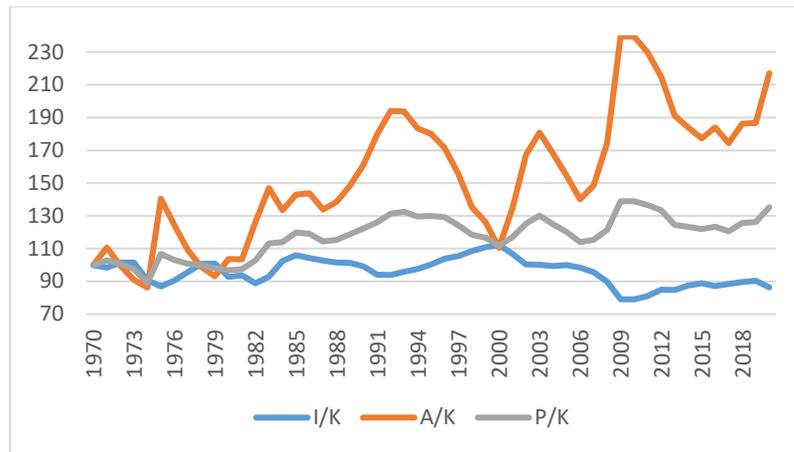


Figure 48. **Taux d'accumulation et autres facteurs contribuant au taux de profit. USA, 1970-2020. Base 100 = 1970.**
 Source : auteur. Données : OCDE

En raison de ces évolutions, la part de l'accumulation dans la formation du taux de profit devient de plus en plus faible, tandis que les autres sources du taux de profit prennent une place croissante (figure 49). Alors qu'en 1970, le taux d'accumulation expliquait près de 70% du niveau du taux de profit, cette contribution n'est plus que de 40% en 2020, soit une chute de près de 30 points en 50 ans.

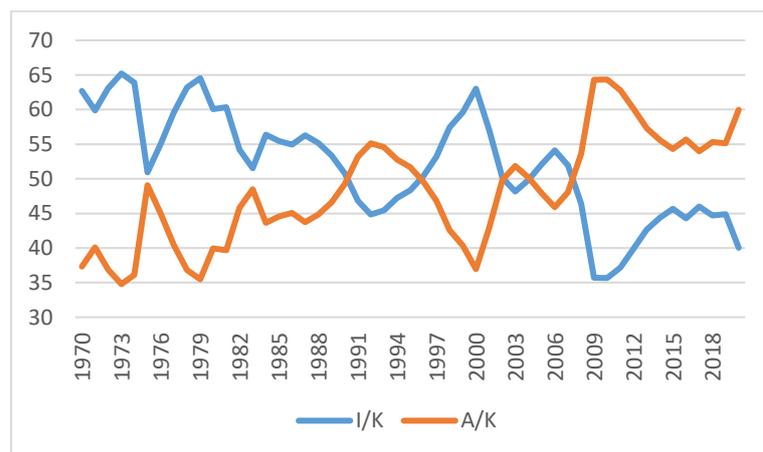


Figure 49. **Part du taux de profit expliquée par le taux d'accumulation (I/K) et par A/K**
 Source : auteur à partir de données OCDE.

Ces résultats sont compatibles avec la thèse du profit sans l'accumulation : le taux de profit augmente, mais le taux d'accumulation ralentit. L'intérêt de cette perspective est de mettre en évidence comment un niveau de taux de profit peut être obtenu sans que les capitalistes n'aient besoin d'investir ce qui, dans un modèle simplifié, est impossible. Elle explique ainsi la possibilité d'un système capitaliste moins dynamique, à taux de croissance plus faibles qui, dans le même temps, parce qu'il parvient à dégager une valorisation satisfaisante des capitaux (grâce au déficit public, l'endettement des salariés et les exportations), continue d'emporter l'adhésion de la classe capitaliste.

4.3. Articulation de ces deux représentations et rôle de l'énergie dans l'accumulation

A la vue des développements précédents, on peut s'interroger sur l'articulation entre la loi de Kalecki et l'approche marxiste. En effet, il semble *a priori* délicat de concilier une thèse (marxiste), qui fait de l'exploitation des salariés la source du profit, avec une autre (post-keynésienne) qui fait, de différents types de dépenses supérieures aux coûts de production, la source du profit. De même, la relation entre le profit (P) et l'accumulation (I) peut sembler contradictoire : du profit vers l'accumulation uniquement pour les marxistes selon la loi de la baisse tendancielle du taux de profit de Marx, de l'accumulation vers le profit pour les post-keynésiens selon la loi de réalisation du profit de Kalecki (tableau 41).

	Marxistes	Post-keynésiens
Source du profit	Exploitation des salariés	Dépenses supérieures aux salaires versés
Relation entre I et P	$P \Rightarrow I$	$I \Rightarrow P$

Tableau 41. **Résumé des divergences entre les analyses marxistes et post-keynésiennes.**
 Source : auteur.

Cette contradiction n'est toutefois qu'apparente. Nous avons en effet mis en évidence au 4.1. que Kalecki ou encore Robinson avançaient des mécanismes selon lesquels le profit entraîne l'investissement : canal des ressources mais aussi canal de la rentabilité espérée. Surtout, ces deux théories ne se placent pas dans le même registre ou, plus exactement, elles décrivent deux moments distincts de l'existence du profit. Lorsqu'elle étudie la réalisation du profit à travers la loi de Kalecki, la théorie post-keynésienne se place du point de vue de la *circulation monétaire* et identifie les flux de revenus à l'origine du profit. Elle se focalise ainsi sur le moment de la validation sociale, celui de la réalisation monétaire du profit. Pour le dire autrement, cette théorie s'intéresse à la manière dont le profit est financé ex-post, elle s'intéresse aux formes du *profit réalisé*. En effet, ici, le profit est dit « réalisé », car il dépend des flux monétaires intervenus pendant la période. Dans ce cas, le financement (ex-post) du profit n'implique pas nécessairement un flux d'investissement mais peut également se faire à partir de la consommation capitaliste, la désépargne salariale, le déficit public ou encore l'excédent commercial.

La théorie marxiste se focalise, elle, sur les conditions techniques de la production et les rapports sociaux de production, en l'occurrence le salariat, et les droits sur la production sociale qui en découlent. Le taux de profit est appréhendé comme la résultante de la lutte des classes (dont le taux d'exploitation rend compte), mais également des contraintes physico-techniques (via la composition technique et organique du capital). Parmi ces contraintes, il y a l'accessibilité à une valeur d'usage indispensable, l'énergie, dont le prix relatif vient peser sur la composition organique du capital. Le travail économétrique mené sur données de panel est compatible avec cette thèse dans la mesure où il met en évidence une relation significativement négative entre prix relatif de l'énergie et taux de profit, une fois contrôlés le taux d'exploitation et la composition technique du capital (cf. section 3). Ce taux de profit peut être qualifié de *taux de profit autorisé* au sens où il est celui qui est autorisé par les rapports de force et la technologie du moment. Ces conditions socio-techniques structurent la rentabilité du processus de production, la valorisation espérée du capital engagé.

La compatibilité entre ces deux thèses est particulièrement explicite si on repart des bilans comptables présentés précédemment - c'est là leur avantage rapport aux seules équations. Dans notre exemple, la consommation capitaliste (C_p) génère le flux monétaire

permettant l'apparition d'un profit comptable (financement ex-post étape 5 et 6). Toutefois, ce flux (Cp) n'est possible que parce que, à l'étape de la production, les salariés ont reçu un salaire inférieur à la valeur *espérée* des marchandises produites (étape 1). L'étape 1 nous montre que le profit trouve son origine dans la production, par le fait que le salarié ne reçoit pas toute la valeur (potentielle à ce stade) qu'il a contribué à créer. Les étapes 5 et 6 nous montrent que cette valeur n'est *réalisée* qu'à condition qu'un flux de dépense ait bien lieu, en l'occurrence une consommation capitaliste, sur la base du produit des ventes faites aux salariés. Les deux théories sont donc compatibles. Là où la théorie marxiste nous indique qu'il y a prélèvement (physique) d'une classe par l'autre (le surtravail), la théorie postkeynésienne nous indique la circulation monétaire qui fait exister ce prélèvement, la forme prise par le surtravail : biens de consommation achetés par les capitalistes (Cp) ou biens d'équipements possédés par les capitalistes et enregistrés dans le bilan des entreprises (I).

En résumé (figure 50), le niveau du taux de profit est d'abord déterminé dans la sphère productive par l'état des rapports de force (taux d'exploitation) et de la technologie (composition organique du capital). En tant que facteur de production indispensable, c'est dans cette sphère que se manifeste l'énergie dans le modèle. Par exemple, une augmentation du prix relatif de l'énergie se traduit, à niveau d'exploitation et de composition technique du capital donné, par une augmentation de la COC donc par une baisse du taux de profit, comme les résultats présentés à la section 3 ont pu le mettre en évidence. Les capitalistes peuvent toutefois décider de restaurer ce taux de profit par différentes stratégies dont l'augmentation du taux d'exploitation, ou encore l'utilisation de machines intégrant les progrès de l'efficacité énergétique¹⁹⁵. Dans le cas où le taux de profit baisse, le canal de la rentabilité espérée et des ressources affectent tendanciellement l'investissement. Le taux d'accumulation est réduit. Le taux de profit ex-post ne chute pas nécessairement dans la mesure où d'autres composantes comme le déficit public peuvent intervenir. Cette instabilité des relations entre profit et accumulation conforte la démarche de notre travail empirique et l'intérêt de séparer analytiquement la question du taux de profit de celle de l'accumulation.

¹⁹⁵ Des machines plus performantes permettent de faire baisser la composition technique du capital tel que définie dans ce chapitre (énergie/heures de travail), ce qui, toutes choses égales par ailleurs, permet de réduire la composition organique du capital.

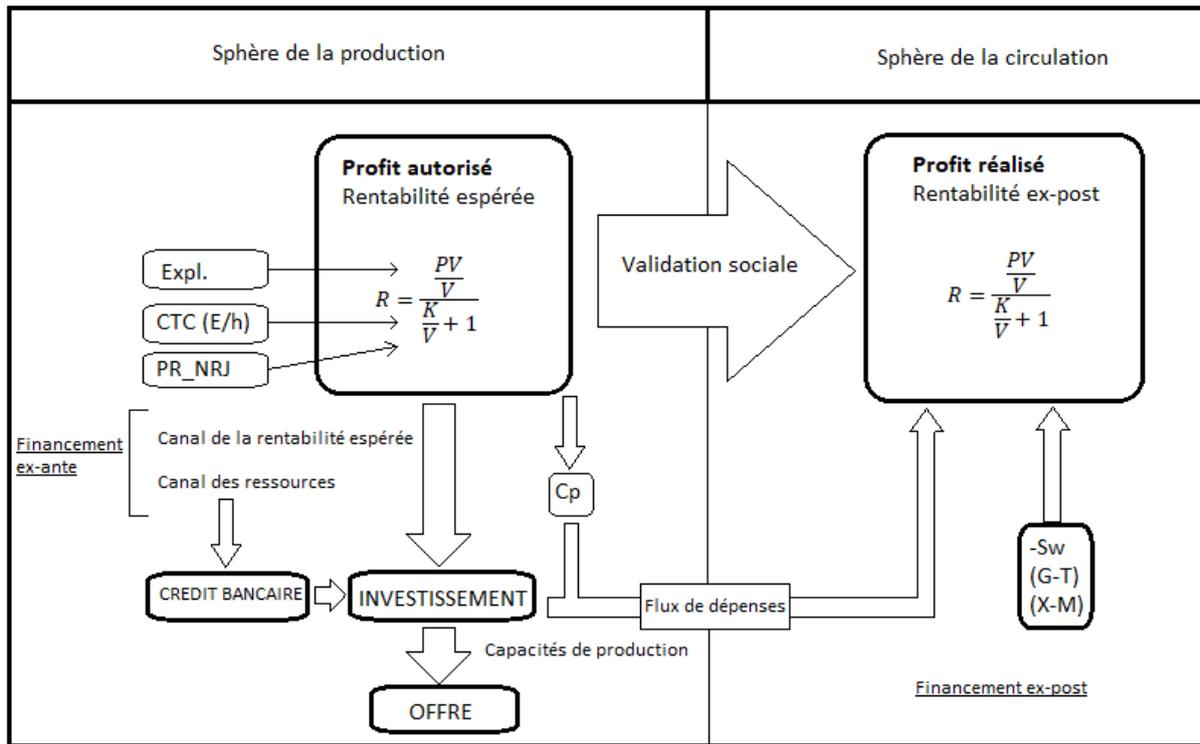


Figure 50. **Le rôle de l'énergie dans la formation du taux de profit et l'accumulation du capital.**

Lecture : les agrégats représentés sont le taux de profit (R), le taux d'exploitation (Expl), la composition technique du capital (CTC) appréciée à partir de la consommation d'énergie par heure de travail (E/h), le prix relatif de l'énergie (PR_NRJ), la consommation capitaliste sur profit (Cp), la désépargne salariale (-Sw), le déficit public (G-T) et le solde de la balance commerciale (X-M).

Source : auteur.

Conclusion du chapitre 4 : vers un modèle de croissance postclassique intégrant le rôle de l'énergie

Au chapitre précédent, nous avons montré la pertinence du cadre marxiste pour proposer une articulation entre les dimensions physiques et monétaires de la production. Plus précisément, cette théorie permet d'envisager un entre prix relatif de l'énergie et taux d'accumulation. A partir d'un travail économétrique sur un panel 16 pays, ce chapitre est venu confirmer l'existence de ce canal pour la période 1995-2019. D'après nos résultats, la hausse du prix relatif de l'énergie exerce un effet significativement négatif une fois pris en compte le

taux d'exploitation et la composition technique du capital. Une des originalités de ce travail, en accord avec les développements du chapitre 2, a été d'utiliser une évaluation véritablement physique de la composition technique du capital. Ce faisant, nous avons importé au sein de l'analyse marxiste, l'*exosomatic metabolic rate* (Giampietro, Mayumi et Sorman, 2011) – le ratio entre la quantité d'énergie et les heures de travail – développé au sein de l'économie écologique. En ce sens, ce travail peut s'analyser comme une synthèse alternative à celle proposée par la théorie néo-thermodynamique.

Dans un second temps, les travaux postkeynésiens nous ont permis de préciser par quels canaux le taux de profit déterminait le taux d'accumulation. Le résultat est que le prix relatif de l'énergie affecte la rentabilité espérée donc la motivation, en même temps que les possibilités de financement ex-ante, de l'investissement. La déconnexion entre profit et accumulation révèle que ce canal n'a rien d'automatique : la croissance de la rentabilité espérée n'est pas suffisante, et c'est là un fait stylisé du capitalisme contemporain, pour conduire à une augmentation du taux de l'accumulation. Ce niveau de rentabilité espéré parvient toutefois à être réalisé par les capitalistes grâce à l'augmentation du déficit public, à la désépargne salariale ou encore l'excédent commercial.

A première vue, ces résultats mettent en évidence un canal alternatif à celui identifié par les néophysocrates qui préfèrent considérer le poids de la facture énergétique (en % de PIB). Pourtant, la figure 37 proposée par Husson amène à questionner cette conclusion : le taux de profit apparaît fortement corrélé au poids de la facture énergétique. Ces similitudes invitent à un approfondissement des discussions avec ces auteurs.

La confirmation de l'existence du canal du taux de profit permet d'envisager des prolongements à notre travail. Une possibilité serait d'utiliser ce canal afin de formaliser un modèle de croissance postclassique intégrant l'énergie. On pourrait par exemple imaginer l'existence d'au moins deux secteurs : un secteur énergétique qui produit ce bien indispensable pour le reste de l'économie et dont le prix relatif serait déterminé par la quantité de travail incorporée, et d'autres secteurs, non énergétiques, affectés par le prix relatif de l'énergie en fonction de leur composition technique du capital (mesurée à partir de l'énergie par tête). Le taux de profit déterminerait le taux d'accumulation selon le canal de la

rentabilité espérée. Enfin l'accumulation entraînerait une hausse de la consommation d'énergie fixée par la composition technique.

L'intérêt d'un tel modèle pour appréhender le découplage énergétique tient au fait que les quantités d'énergie¹⁹⁶ ainsi que leur prix relatif apparaissent explicitement dans le raisonnement. Un tel modèle aurait toute sa place dans le développement actuel d'une macroéconomie écologique qui s'intéresse au cadre postkeynésien (Fontana et Sawyer, 2016 ; Hardt et O'Neill, 2017 ; Jackson et Victor, 2020) mais encore relativement peu aux apports de la théorie marxiste (Blauwhof, 2012 ; Burkett, 2004).

¹⁹⁶ Cette dernière apparaît à travers la définition de la composition technique du capital (CTC) qui rapporte la quantité d'énergie au nombre d'heures de travail.

CONCLUSION GENERALE

Agrocarburants, semences augmentées, stratégie NBIC¹⁹⁷, géoingénierie, avion à hydrogène, déploiement massif des énergies renouvelables, toutes ces solutions s'inscrivent dans un paradigme structurant les politiques publiques actuelles : la croissance verte. Toutes promettent la même chose : rendre la croissance compatible avec le respect des différents seuils écologiques. Pour ne citer qu'un exemple, le pacte vert pour l'Europe proposé par la Commission européenne en juillet 2021 envisage « une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, garantissant : la fin des émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici à 2050, une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources où personne n'est laissé de côté »¹⁹⁸. Notre thèse a pris pour objet l'un de ces objectifs, le découplage entre ressources et PIB en se concentrant sur le cas des ressources énergétiques. Plusieurs raisons ont motivé ce choix, le lien direct entre le réchauffement et la consommation énergétique mais également le fait que l'énergie, en tant que capacité à transformer l'environnement peut être perçue comme un indicateur général des pressions environnementales¹⁹⁹. Ainsi, l'ambition de notre travail était d'évaluer la possibilité d'un tel découplage c'est-à-dire une diminution absolue de la consommation d'énergie concomitante d'une progression du PIB réel.

L'analyse descriptive des séries de PIB et de consommation d'énergie amène à conclure à l'existence d'un découplage absolu localisé, modeste et insuffisant, et ce d'autant plus que certains régimes de responsabilité sont privilégiés (approche consommation dans le cas des pays qui découplent). De plus, alors que cela est insuffisamment pris en compte dans les recherches en la matière, ce découplage peut être encore plus faible si certaines conventions intervenant dans la construction du PIB réel sont remises en cause. On pense ici à l'imputation croissante d'activités à partir de leur revenu ou encore du choix d'une année de référence particulière pour déflater. Enfin, ces résultats sont confirmés par la littérature portant sur l'évaluation d'une courbe environnementale de Kuznets en matière d'énergie. Une fois les limites relatives aux agrégats retenus pris en compte, ces travaux convergent quant à la non existence d'une courbe en U inversé ce qui indique que la baisse de la

¹⁹⁷ Pour Nanotechnologies, biotechnologies, sciences de l'information et de la cognition. Pour une présentation détaillée de cette stratégie voir par exemple Tordjman (2021).

¹⁹⁸ Site internet de la commission européenne : https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

¹⁹⁹ Là où la focalisation sur des ressources ou polluants plus spécifiques peut donner lieu à des formes de substituabilité au sein des éléments naturels.

consommation d'énergie, n'est pas un résultat nécessaire du développement économique à long terme.

Face à ce constat, deux attitudes sont possibles. La première est d'en « rester là » en considérant que les tendances à venir ne pourront être radicalement différentes des tendances passées. La possibilité du découplage devient alors un non sujet. La seconde, et c'est le choix fait dans cette thèse, consiste à comprendre plus finement les relations et les mécanismes qui unissent la consommation d'énergie et la production de valeur économique.

Dans cette perspective, nous avons montré que les décompositions d'index de la consommation d'énergie, autre méthode abondamment mobilisée par la littérature sur le découplage, apparaissent insuffisantes. Outre leur sensibilité au nombre d'agrégats retenus et, surtout, à la qualité de ces derniers (pensons ici à l'intensité énergétique du PIB utilisé comme indicateur d'efficacité technique), les relations entre les différentes variables utilisées dans la décomposition ne sont pas envisagées. Pour ne prendre qu'un exemple, l'efficacité énergétique apparaît à côté du PIB, comme si elle était indépendante, négligeant de la sorte l'existence d'effets rebond macroéconomiques. En effet, l'efficacité énergétique est susceptible de modifier les prix relatifs, en premier lieu celui des services énergétiques, et peut être à l'origine d'une dynamique de croissance qui augmente en retour la consommation d'énergie. La compréhension de ces interactions passe par des raisonnements macroéconomiques, de préférence en équilibre général²⁰⁰, ce qu'autorisent les théories de la croissance. Aussi, les chapitres 2 et 3 ont porté sur les théories de la croissance, avec une attention particulière à la manière dont l'énergie y est intégrée.

A partir d'un examen critique du cadre néoclassique mené au chapitre 2, nous avons montré que les fonctions de production agrégées étaient inadéquates pour intégrer correctement l'énergie. Les tentatives de la théorie néo-thermodynamique d'importer les concepts de la thermodynamique en leur sein buttent sur un problème ontologique : une fonction de production décrit une relation technique. Or, le PIB est monétaire et, comme l'a montré la controverse des deux Cambridge, les variables monétaires ne sauraient se substituer aux variables physico-techniques. Ces conclusions, développées au sujet de la mesure du capital, valent aussi pour la production. Utiliser une mesure physique de la

²⁰⁰ Par opposition à un raisonnement en équilibre partiel qui se focalise sur un marché.

production (par exemple l'exergie utile) comme le proposent Ayres et Keen résout partiellement ce problème : la relation entre output, mesurée à partir de cette nouvelle unité, et les facteurs de production est alors rigoureusement technique. Cette solution s'apparente toutefois plus à un déplacement du problème puisque le lien entre production physique et PIB réel reste à faire. En bref, les fonctions de production constituent une impasse dans la mesure où la relation entre la consommation d'énergie (variable physique) et le PIB réel (variable monétaire) n'est pas une relation technique. Comprendre le (dé)couplage énergétique suppose de reconnaître et d'articuler ces deux dimensions de la production : la création de production physique d'une part, pour laquelle l'énergie est indispensable, la création de valeur économique d'autre part qui admet d'autres déterminants. En définitive, cet examen nous a permis de préciser notre question de recherche : il fallait désormais comprendre par quels canaux l'énergie pouvait affecter la création de valeur.

C'est dans cette perspective que le chapitre 3 est venu montrer que les théories néophysiocratiques et classiques (et plus particulièrement celle de Marx) étaient heuristiques. La thèse que nous avons défendue est que ces deux théories parviennent à une articulation satisfaisante grâce aux théories de la valeur qui les structurent. En effet, les théories de la valeur travail et énergie permettent d'envisager les répercussions des contraintes physiques dans le monde monétaire. Plus ces contraintes sont fortes, plus les quantités d'énergie (néophysiocrates) ou de travail incorporées (classiques) aux biens et services seront importantes, plus la valeur des marchandises considérées sera importante. L'input énergie n'échappe pas à cette règle et, dans la mesure, où il est indispensable à toute production, les effets à attendre sur l'ensemble des prix relatifs donc la création de valeur seront massifs.

Dans le cas des néophysiocrates, la théorie de la valeur énergie n'est pas toujours explicitement revendiquée. Pourtant, le lien entre EROI et prix de l'énergie que tentent de mettre en évidence les travaux appliqués contemporains s'apparente à un test de la théorie de la valeur énergie appliqué au cas de l'input énergétique. Par la suite, pour ces auteurs, ce prix de l'énergie détermine le poids de la facture énergétique ce qui affecte l'investissement et la consommation discrétionnaire des ménages et ainsi le PIB réel. Ce canal néglige le canal des coûts pourtant à la base de la théorie de la valeur énergie. Dit autrement, l'impact du prix de l'énergie sur les entreprises donc sur la dynamique des prix relatifs n'est pas analysée.

Dans le cas des marxistes, le mécanisme initial identifié est relativement similaire : le travail incorporée dans la production d'énergie détermine le prix de l'input énergie. Cependant, le canal de transmission à la création de valeur est plus détaillé et plus cohérent avec une théorie générale des coûts : la composition organique du capital des secteurs les plus intensifs en énergie est d'abord affectée ce qui réduit leur taux de profit donc le taux de profit moyen de l'économie. Dans un second temps, la tendance à l'égalisation des taux de profit « étale » la baisse du taux de profit macroéconomique sur l'ensemble des secteurs. Le taux de profit étant réduit l'accumulation du capital ralentit. Ainsi, les accusations d'une partie de l'économie écologique d'un obstacle épistémologique à l'intégration des lois de la thermodynamique à l'analyse marxiste apparaissent peu fondées.

A l'instar d'autres auteurs (Burkett, 2006 ; Foster et Burkett, 2018 ; Pirgmaier, 2021), nous défendons le fait que le cadre d'analyse marxiste a toute sa place au sein de l'économie écologique. En particulier, la théorie de la valeur travail, largement rejetée par ce champ, offre en réalité un certain nombre d'avantages. D'abord, elle fournit une théorie des prix relatifs consistante avec l'idée d'un encastrement de la sphère économique dans l'environnement : la production des marchandises n'est pas hors sol, elle se fait en présence de contraintes physiques qui ont une répercussion sur les prix et la dynamique économique. Pour autant, et c'est là un deuxième avantage, elle ne tombe dans les écueils du substantialisme. En effet, certaines interprétations, notamment celles proposées par Roubine, permettent de montrer qu'un système de prix relatif correspondant aux valeurs travail est, sous certaines hypothèses, un résultat tendanciel de l'économie marchande, non d'une substance préexistante aux échanges. Enfin, les valeurs travail sont utiles si on les utilise dans le cadre d'une démarche comparative. Dans la mesure où les valeurs travail correspondent à une situation idéal-typique où les conditions techniques déterminent exclusivement les prix relatifs, l'écart entre valeurs travail et prix relatifs permet d'apprécier à quel point les conditions techniques sont déterminantes. De ce point de vue, les travaux empiriques présentés convergent pour indiquer le rôle structurant des conditions techniques sur les prix relatifs.

Afin de conforter le caractère fécond de cette théorie pour appréhender les limites énergétiques à la croissance, les travaux empiriques doivent être étendus. La relation entre prix relatif de l'énergie et valeur travail a reçu insuffisamment d'attention, de même des relations entre prix relatifs de l'énergie et composition organique du capital. Le travail

économétrique mené au chapitre 4 visait à réduire ce manque. A partir d'un panel de 16 pays de l'OCDE portant sur la période 1995-2019, il a confirmé l'existence du canal, identifié théoriquement, entre prix relatif de l'énergie et taux de profit macroéconomique. En effet, une fois contrôlé le taux d'exploitation et la composition technique du capital, l'augmentation du prix relatif de l'énergie réduit significativement le taux de profit. L'impact sur l'accumulation peut ensuite être précisé à l'aide de la théorie postkeynésienne. Conjointement avec l'exploitation des travailleurs, le prix de l'énergie autorise un certain niveau de taux de profit. Ce dernier affecte l'accumulation par deux canaux qui sont la rentabilité espérée et le canal du financement. Toutefois, cela n'a rien d'automatique comme en témoigne la déconnexion entre taux de profit et taux d'accumulation dans la période contemporaine. En définitive, l'identification de ces différents canaux fournit une architecture aux relations d'un modèle postclassique de croissance où les enjeux de répartition sont bien présents (via le taux d'exploitation) tout en considérant les contraintes énergétiques (via la quantité d'énergie utilisée²⁰¹ et son prix relatif).

Sur la base de ces résultats, plusieurs prolongements à ce travail sont envisageables. En premier lieu, l'évaluation empirique des différents canaux identifiés mériterait d'être approfondie.

La relation entre le prix relatif de l'énergie et la quantité de travail incorporé relative, tout d'abord, pourrait être évaluée à partir des tables inputs-outputs. Un tel travail nécessiterait toutefois de prendre en compte le phénomène de rente associé aux ressources naturelles. En effet, dans le cas des produits de la terre, le travail nécessaire pertinent à analyser n'est pas le travail incorporé moyen mais celui dépensé sur la terre marginale (Tsoulfidis, 2008). Par extension, le travail nécessaire à la production des ressources fossiles est celui de la mine ou du puit marginal. Ces résultats pourraient par la suite être comparés à ceux obtenus sur la base du EROI (c'est-à-dire en termes d'énergie incorporée). Cela permettrait de nourrir un dialogue fécond avec les néophysocrates quant à l'accessibilité de cette valeur d'usage indispensable au processus de production.

²⁰¹ Conformément à la critique cambridgienne, une des originalités de ce travail a consisté à proposer un agrégat véritablement physique de la composition technique du capital : le ratio entre l'énergie consommée et les heures de travail.

De même, la relation entre prix relatif de l'énergie et le taux de profit pourrait être également approfondie dans plusieurs directions. Au niveau des données, notre étude pourrait être répliquée à partir d'agrégats plus fins. Comme évoqué au chapitre 4, des mesures du taux de profit restreintes aux seules sociétés financières et non financières seraient plus pertinentes. De même des mesures alternatives du capital pourraient être utilisées pour voir la robustesse des résultats. Nous pensons par exemple à l'usage du passif des sociétés non financières utilisés dans d'autres travaux (du Tertre et Guy, 2019). Enfin, la composition technique du capital, saisie à partir du ratio $\frac{\text{énergie finale}}{\text{heures de travail}}$ pourrait faire l'objet d'une mesure alternative à partir du stade utile de l'énergie. Une telle mesure est plus qualitative au sens où la puissance physique du parc de machines installées dépend également des progrès de l'efficacité énergétique. Elle permettrait également d'intégrer le rôle de l'efficacité énergétique à l'analyse et ainsi participer à la discussion sur l'évaluation des effets rebonds macroéconomiques.

Également, la relation entre le prix de l'énergie et la composition organique du capital pourrait faire l'objet d'un traitement plus précis. En effet, dans le cadre de notre théorisation, cette dernière est le canal central par lequel le taux de profit est affecté. Alors que notre travail a privilégié le lien entre prix relatif de l'énergie et le taux de profit, un travail économétrique complémentaire consisterait à tester plus directement ce lien entre prix relatif de l'énergie et composition organique du capital en contrôlant la composition technique.

Enfin, l'étude de tous ces canaux sur le temps long apparaît également pertinente dans une démarche institutionnaliste. Elle permettrait de périodiser ces relations et mettre en évidence d'éventuelles ruptures structurelles. Ces travaux pourraient ainsi permettre d'enrichir la théorie de la régulation en participant à préciser la relation sociale à l'énergie que les différents régimes de capitalisme développent (Cahen-Fourot et Durand, 2016) et voir comment ce rapport à l'énergie peut participer à la mise en crise d'un régime.

A ce titre, le modeste découplage absolu observé dans certains pays peut s'analyser, et c'est là une hypothèse future de travail, comme le résultat de certains régimes de capitalisme (historiquement et spatialement situés) mais dont la performance environnementale ne peut s'analyser indépendamment des autres formes institutionnelles,

en particulier le type d'insertion internationale retenu (Cahen-Fourot, 2020 ; Dorninger et al., 2021).

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- ACURIO VÁSCONEZ V., GIRAUD G., MC ISAAC F., PHAM N.-S., 2015. « The effects of oil price shocks in a new-Keynesian framework with capital accumulation », *Energy Policy*, 86, p. 844-854.
- ADEME, 2010. « Les effets rebond des mesures d'efficacité énergétique : comment les atténuer ? », *ADEME&VOUS*, 24, p. 1-6.
- ADEME, 2021. « Transition(s) 2050 : choisir maintenant, agir pour le climat », Paris, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- AGLIETTA M., ORLEAN A., 1982. *La violence de la monnaie*, Paris, Presses universitaires de France.
- AGLIETTA M., ORLEAN A., 2002. *La monnaie: entre violence et confiance*, Paris, Odile Jacob.
- ALCOTT B., 2007. « Historical Overview of the Jevons Paradox in the Literature », dans *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*, London, Routledge.
- ALLAIRE G., DAVIRON B., 2017. *Transformations agricoles et agroalimentaires - Entre écologie et capitalisme*, Versailles, Quae.
- ALLAN G., GILMARTIN M., MCGREGOR P.G., SWALES J.K., TURNER K., 2009. « Modelling the Economy-wide Rebound Effect », dans HERRING H., SORRELL S. (dirs.), *Energy Efficiency and Sustainable Consumption: The Rebound Effect*, London, Palgrave Macmillan, p. 69-98.
- ALTUNÇ Ö.F., YILDIRIM A., 2020. « Capital - Energy Substitution: Does Energy Sources Matter for the Elasticity of Substitution? An Empirical Investigation for OECD Countries », *Siyasal: Journal of Political Sciences*, 29, 2, p. 367-378.
- AMABLE B., 2005. *Les cinq capitalismes: diversité des systèmes économiques et sociaux dans la mondialisation*, Paris, Le seuil.
- AMIN S., 1988. *L'Échange inégal et la loi de la valeur*, Paris, Anthropos.
- ANG B.W., XU X.Y., SU B., 2015. « Multi-country comparisons of energy performance: The index decomposition analysis approach », *Energy Economics*, 47, p. 68-76.
- ANG B.W., 2004. « Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? », *Energy Policy*, 32, 9, p. 1131-1139.
- ANG B.W., ZHANG F.Q., 2000. « A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies », *Energy*, 25, 12, p. 1149-1176.
- APOSTOLAKIS B.E., 1990. « Energy—capital substitutability/ complementarity: The dichotomy », *Energy Economics*, 12, 1, p. 48-58.
- ARAMENDIA E., BROCKWAY P.E., PIZZOL M., HEUN M.K., 2021. « Moving from final to useful stage in energy-economy analysis: a critical assessment », *Applied Energy*, 283, p. 1-41.
- ARUGA K., 2019. « Investigating the Energy-Environmental Kuznets Curve Hypothesis for the Asia-Pacific Region », *Sustainability*, 11, 8, p. 1-12.

AYRES R.U., AYRES L.W., WARR B., 2003. « Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998 », *Energy*, 28, 3, p. 219-273.

AYRES R.U., BERGH J.C.J.M. VAN DEN, LINDENBERGER D., WARR B., 2013. « The underestimated contribution of energy to economic growth », *Structural Change and Economic Dynamics*, 27, p. 79-88.

AYRES R.U., WARR B., 2005. « Accounting for growth: the role of physical work », *Structural Change and Economic Dynamics*, 16, 2, p. 181-209.

AYRES R.U., WARR B., 2009. *The economic growth engine: how energy and work drive material prosperity*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing Ltd.

BABEAU A., 1964. « L'élasticité de substitution entre facteurs », *Revue économique*, 15, 4, p. 533-566.

BAI J., CHOI S.H., LIAO Y., 2020. « Feasible Generalized Least Squares for Panel Data with Cross-sectional and Serial Correlations », *Empirical Economics*, 60, p. 309-326.

BALTAGI B.H., 2021. *Econometric Analysis of Panel Data*, New-York, Springer.

BANDYOPADHYAY S., SHAFIK N., 1992. « Economic Growth and Environmental Quality : Time Series and Cross-Country Evidence », World Development Report.

BARKER T., EKINS P., FOXON T., 2007. « The macro-economic rebound effect and the UK economy », *Energy Policy*, 35, 10, p. 4935-4946.

BASHMAKOV I., 2007. « Three laws of energy transitions », *Energy Policy*, 35, 7, p. 3583-3594.

BASU D., FOLEY D.K., 2013. « Dynamics of output and employment in the US economy », *Cambridge Journal of Economics*, 37, 5, p. 1077-1106.

BASU D., 2017. « Quantitative empirical research in marxist political economy: a selective review », *Journal of Economic Surveys*, 0, 0, p. 1-28.

BASU D., 2018. « Quantitative Empirical Research in Marxist Political Economy: A Selective Review », dans *Analytical Political Economy*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 237-267.

BAUMOL W.J., BOWEN W.G., 1968. *Performing arts: the economic dilemma*, Cambridge (Etats-Unis), MIT Press.

BECKERMAN W., 1992. « Economic growth and the environment: Whose growth? whose environment? », *World Development*, 20, 4, p. 481-496.

BELLOFIORE R., 2008. « Sraffa after Marx: An Open Issue », dans CHIODI G., DITTA L. (dirs.), *Sraffa or An Alternative Economics*, London, Palgrave Macmillan UK, p. 68-92.

BENQUET M., SOBEL R., 2019. « Entretien avec André Orléan : Monnaie, valeur et capitalisme », *Revue Française de Socio-Economie*, 23, 2, p. 21-32.

BERGH J.C.J.M. VAN DEN, 1999. « Materials, Capital, Direct/Indirect Substitution, and Mass Balance Production Functions », *Land Economics*, 75, 4, p. 547.

BERNANKE B., GERTLER M., WATSON M.W., 2004. « Oil Shocks and Aggregate Macroeconomic Behavior: The Role of Monetary Policy: A Reply », *Journal of Money, Credit, and Banking*, 36, 2, p. 287-291.

BERNDT E.R., 1982. « From technocracy to net energy analysis : engineers, economists and recurring energy theories of value », dans *Progress in Natural Resource Economics*, Oxford, Oxford University Press, p. 337-367.

BERNDT E.R., WOOD D.O., 1975. « Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy », *The Review of Economics and Statistics*, 57, 3, p. 259.

BERNDT E.R., WOOD D.O., 1979. « Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity », *The American Economic Review*, 69, 3, p. 342-354.

BERR É., MONVOISIN V., PONSOT J.-F., GALBRAITH J.K.P., 2018. *L'économie post-keynésienne: histoire, théories et politiques*, Paris, Éditions du Seuil.

BLAUWHOF F.B., 2012. « Overcoming accumulation: Is a capitalist steady-state economy possible? », *Ecological Economics*, 84, p. 254-261.

BOERMANS M.A., GALEMA R., 2019. « Are pension funds actively decarbonizing their portfolios? », *Ecological Economics*, 161, p. 50-60.

BOSKIN M., DULBERGER E., GORDON R., GRILICHES Z., JORGENSON D., 1996. « Toward a More Accurate Measure of the Cost of Living: Final Report to the Senate Finance Committee », Washington, Advisory Commission to Study the Consumer Price Index.

BOURDIEU P., PASSERON J.-C., 1970. *La reproduction: éléments pour une théorie du système d'enseignement*, Paris, Les Editions de Minuit.

BOURGEOIS A., LAFROGNE-JOUISSIER R., 2022. « La flambée des prix de l'énergie : un effet sur l'inflation réduit de moitié par le « bouclier tarifaire » », *Insee Analyses*, 75, p. 1-6.

BOWLES S., 1970. « Aggregation of Labor Inputs in the Economics of Growth and Planning: Experiments with a Two-Level CES Function », *Journal of Political Economy*, 78, 1, p. 68-81.

BOYER R., 2000. « Is a Finance-led growth regime a viable alternative to Fordism? A preliminary analysis », *Economy and Society*, 29, 1, p. 111-145.

BOYER R., 2004. *Théorie de la régulation. 1, Les fondamentaux*, Paris, la Découverte.

BROBERG T., BERG C., SAMAKOVLIS E., 2015. « The economy-wide rebound effect from improved energy efficiency in Swedish industries—A general equilibrium analysis », *Energy Policy*, 83, p. 26-37.

BROCKWAY P.E., BARRETT J.R., FOXON T.J., STEINBERGER J.K., 2014. « Divergence of Trends in US and UK Aggregate Exergy Efficiencies 1960–2010 », *Environmental Science & Technology*, 48, 16, p. 9874-9881.

BROCKWAY P.E., OWEN A., BRAND-CORREA L.I., HARDT L., 2019. « Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources », *Nature Energy*, 4, 7, p. 612-621.

BROCKWAY P.E., SAUNDERS H., HEUN M.K., FOXON T.J., STEINBERGER J.K., BARRETT J.R., SORRELL S., 2017. « Energy Rebound as a Potential Threat to a Low-Carbon Future: Findings from a New Exergy-Based National-Level Rebound Approach », *Energies*, 10, 51, p. 1-24.

BROCKWAY P.E., SORRELL S., SEMIENIUK G., HEUN M.K., COURT V., 2021. « Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, p.1-20.

BROCKWAY P.E., KJELSTRUP S., DEWULF J., SIEBENTRITT S., VALERO A., WHELAN C., 2016. « In a resource-constrained world: Think exergy not energy », *Science Europe*, p. 1-23.

BROOKES L.G., 1992. « Energy efficiency and economic fallacies: a reply », *Energy Policy*, 20, 5, p. 390-392.

BRUNO O., CHIAPPINI R., GROSLAMBERT B., 2020. « Quelle valeur ajoutée pour les banques françaises ? », *Revue économique*, 71, 1, p. 139-162.

BURKETT P., 2004. « Marx's reproduction schemes and the environment », *Ecological Economics*, 49, 4, p. 457-467.

BURKETT P., 2006. *Marxism and ecological economics: toward a red and green political economy*, Leiden, Brill.

BURKETT P., FOSTER J.B., 2006. « Metabolism, energy, and entropy in Marx's critique of political economy: Beyond the Podolinsky myth », *Theory and Society*, 35, 1, p. 109-156.

CAHEN-FOUROT L., 2020. « Contemporary capitalisms and their social relation to the environment », *Ecological Economics*, 172, p. 1-17.

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*, 20.

CARNOT S. (1796-1832) A. DU TEXTE, 1824. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Paris, Chez Bachelier.

CARTELIER J., 1991. « L'économie politique de François Quesnay: A propos d'un ouvrage de G. Vaggi », *Revue économique*, 42, 5, p. 923-926.

CASTRO C., CAPELLÁN-PÉREZ I., 2020. « Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies », *Energies*, 13, p. 1-42.

CAVIGLIA-HARRIS J.L., CHAMBERS D., KAHN J.R., 2009. « Taking the “U” out of Kuznets: A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation », *Ecological Economics*, 68, 4, p. 1149-1159.

CLEVELAND C.J., 1999. « Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology », dans *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.

COCKSHOTT P., COTTRELL A., MICHAELSON G., 1995. « Testing Marx: Some new results from UK data », *Capital & Class*, 19, 1, p. 103-130.

COCKSHOTT W.P., COTTRELL A., 2005. « Robust correlations between prices and labour values: a comment », *Cambridge Journal of Economics*, 29, 2, p. 309-316.

CORDONNIER L., 2006. « Le profit sans l'accumulation : la recette du capitalisme gouverné par la finance », *Innovations*, 23, 1, p. 79-108.

CORDONNIER L., 2012. « Une théorie de la valorisation ? : André ORLÉAN, L'Empire de la valeur. Refonder l'économie. », *Revue Française de Socio-Économie*, 10, 2, p. 289-294.

COSTANZA R., 1980. « Embodied Energy and Economic Valuation », *Science*, 210, 4475, p. 1219-1224.

COSTANZA R., 1981. « Embodied Energy, Energy Analysis, and Economics », dans *Energy, Economics, and the Environment*, London, Routledge.

COSTANZA R., HERENDEEN C., 1984. « Embodied energy and economic value in the United States economy : 1963, 1967 and 1972 », *Resources and Energy*, 6, p. 129-163.

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*, p. 1-43.

COUX Q., 2020a. *Ressources naturelles, thermodynamique et théorie économique de la production Une perspective historique et méthodologique*, Thèse de doctorat.

COUX Q., 2020b. « Georgescu-Roegen's Flow-Fund Theory of Production in Retrospect », *Ecological Economics*, 176, p. 1-10.

COURT V., 2016. *Energie, EROI et croissance économique dans une perspective de long terme*, Thèse de doctorat.

COURT V., 2019. « An Estimation of Different Minimum Exergy Return Ratios Required for Society », *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 4, 3, p. 1-11.

COURT V., FIZAIN F., 2017. « Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions », *Ecological Economics*, 138, p. 145-159.

CSEREKLYEI Z., RUBIO-VARAS M. D. M., STERN D.I., 2016. « Energy and Economic Growth: The Stylized Facts », *The Energy Journal*, 37, 2, p. 223-255.

DALY H.E., 1991. *Steady-state economics*, Washington, Island Press.

DALY H.E., 1995. « On Wilfred Beckerman's Critique of Sustainable Development », *Environmental Values*, 4, 1, p. 49-55.

DARMANGEAT C., 2016. *Le profit déchiffré: trois essais d'économie marxiste*, Montreuil, La ville brûle.

DAVIS S.J., HALTIWANGER J., 2001. « Sectoral job creation and destruction responses to oil price changes », *Journal of Monetary Economics*, 48, 3, p. 465-512.

DEBEIR J.-C., DELÉAGE J.-P., HÉMERY D., 2013. *Une histoire de l'énergie: les servitudes de la puissance*, Paris, Flammarion.

DELEPLACE G., 2018. *Histoire de la pensée économique - 3e éd.*, Paris, Dunod.

DENISON E.F., 1979. *Accounting for slower economic growth: the United States in the 1970's*, Washington, The Brookings Institution.

DIMITROPOULOS A., OUESLATI W., SINTEK C., 2018. « The rebound effect in road transport: A meta-analysis of empirical studies », *Energy Economics*, 75, p. 163-179.

DORNINGER C., HORNBERG A., ABSON D.J., WEHRDEN H. VON, SCHAFFARTZIK A., GILJUM S., ENGLER J.-O., FELLER R.L., HUBACEK K., WIELAND H., 2021. « Global patterns of ecologically unequal exchange: Implications for sustainability in the 21st century », *Ecological Economics*, 179, p. 1-14.

DOUAI A., PLUMECOCQ G., 2017. *L'économie écologique*, Paris, La Découverte.

DOUGLAS P.H., 1976. « The Cobb-Douglas Production Function Once Again: Its History, Its Testing, and Some New Empirical Values », *Journal of Political Economy*, 84, 5, p. 903-915.

DUMÉNIL G., LÉVY D., 2002. « The profit rate: where and how much did it fall? Did it recover? (USA 1948–2000) », *Review of Radical Political Economics*, 34, 4, p. 437-461.

EHRlich P.R., HOLDREN J.P., 1971. « Impact of Population Growth », *Science*, p. 1212-1217.

ELSNER H., 1967. *The technocrats: prophets of automation*, Syracuse, Syracuse University Press.

EMMANUEL A., 1969. *L'échange inégal: essai sur les antagonismes dans les rapports économiques internationaux*. Paris, François Maspero.

FARBER S.C., COSTANZA R., WILSON M.A., 2002. « Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services », *Ecological Economics*, 41, 3, p. 375-392.

FELIPE J., McCOMBIE J.S.L., 2014. « The Aggregate Production Function: 'Not Even Wrong' », *Review of Political Economy*, 26, 1, p. 60-84.

FERNANDEZ GONZALEZ P., LANDAJO M., PRESNO M.J., 2014. « Multilevel LMDI decomposition of changes in aggregate energy consumption. A cross country analysis in the EU-27 », *Energy Policy*, 68, p. 576-584.

FISCHER-KOWALSKI M., 1998. « Society's Metabolism.: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860– 1970 », *Journal of Industrial Ecology*, 2, 1, p. 61-78.

FIX B., NITZAN J., BICHLER S., 2019. « Real GDP: The Flawed Metric at the Heart of Macroeconomics », *Real-world economics review*, 88, p. 1-9.

FIXLER D., ZIESCHANG K., 1999. « The Productivity of the Banking Sector: Integrating Financial and Production Approaches to Measuring Financial Service Output », *The Canadian Journal of Economics*, 32, 2, p. 547-569.

FIZAINE F., COURT V., 2016. « Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society », *Energy Policy*, 95, p. 172-186.

FOLEY D.K., 1982. « The Value of Money the Value of Labor Power and the Marxian Transformation Problem », *Review of Radical Political Economics*, p. 37-47.

FOLEY D.K., 2000. « Recent developments in the labor theory of value », *Review of Radical Political Economics*, 32, 1, p. 1-39.

FONTANA G., SAWYER M., 2016. « Towards post-Keynesian ecological macroeconomics », *Ecological Economics*, 121, p. 186-195.

FOSTER J.B., BURKETT P., 2004. « Ecological Economics and Classical Marxism: The “Podolinsky Business” Reconsidered », *Organization & Environment*, 17, 1, p. 32-60.

FOSTER J.B., BURKETT P., 2018. « Value Isn't Everything », *Monthly Review*, p. 1-17.

FOURCROY C., GALLOUJ F., DECELLAS F., 2015. « La matérialité invisible des services et ses implications énergétiques : une estimation de l'énergie grise par la méthode input-output », *Revue d'économie industrielle*, 149, p. 43-72.

FREEMAN A., 2009. « What makes the US Profit Rate Fall? », *MPRA*, p.1-21.

FRESSOZ J.-B., 2013. « Pour une histoire désorientée de l'énergie. », *Entropia. Revue d'étude théorique et politique de la décroissance*, 15, p. 1-17.

FRIEDMAN M., 1953. *Essays in positive economics*, Chicago, University of Chicago Press.

FRIOT B., 2012. *L'enjeu du salaire*, Paris, la Dispute.

FRONDEL M., 2011. « Modelling energy and non-energy substitution: A brief survey of elasticities », *Energy Policy*, 39, 8, p. 4601-4604.

FRONDEL M., SCHMIDT C.M., 2002. « The Capital-Energy Controversy: An Artifact of Cost Shares? », *The Energy Journal*, 23, 3, p. 53-79.

GADREY J., 2011. *Adieu à la croissance: bien vivre dans un monde solidaire*, Paris, les Petits matins.

GADREY J., JANY-CATRICE F., 2016. *Les nouveaux indicateurs de richesse*, Paris, La Découverte.

GALVIN R., 2014. « Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap' », *Energy and Buildings*, 69, p. 515-524.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1971. *The entropy law and the economic process*, Cambridge (Etats-Unis), Harvard University Press.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1973. « The entropy law and the economic problem », dans *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics*, Cambridge, MIT Press, p. 49-60.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1976. *Energy and economic myths: institutional and analytical economic essays*, New York, Pergamon Press.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1979. « Energy analysis and economic valuation », dans *From Bioeconomics to Degrowth*, London, Routledge.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1979 [1995]. *La décroissance. Entropie - Ecologie - Economie.*, Paris, Sang de la terre.

GEORGESCU-ROEGEN N., 1978 [2015]. « De la science économique à la bioéconomie », dans *Nicholas Georgescu-Roegen, pour une révolution bioéconomique*, Lyon, ENS Éditions, p. 87-128.

GIAMPIETRO M., MAYUMI K., ALEVGUL H SORMAN, 2010. « Assessing the quality of alternative energy sources: Energy Return On the Investment (EROI), the Metabolic Pattern of Societies and Energy Statistics », *Working paper on Environmental Sciences*, p. 1-43.

GIAMPIETRO M., MAYUMI K., SORMAN A., 2011. *The Metabolic Pattern of Societies: Where Economists Fall Short*, London, Routledge.

GIRAUD G., 2008. « Au-delà d'un troisième choc pétrolier », *Revue Projet*, 304, p. 76-83.

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'Economie de la Sorbonne*, p. 1-28.

GLOMSRØD S., TAOYUAN W., 2005. « Coal cleaning: a viable strategy for reduced carbon emissions and improved environment in China? », *Energy Policy*, 33, 4, p. 525-542.

GRAEBER D., 2016. *Dettes: 5000 ans d'histoire*, Arles, Actes sud.

GRAZIANI A., 1989. *The theory of the monetary circuit*, London, Thames Polytechnic.

GREENE D.L., 2012. « Rebound 2007: Analysis of U.S. light-duty vehicle travel statistics », *Energy Policy*, 41, p. 14-28.

- GREENE W.H., 2011. *Économétrie*, Paris, Pearson education.
- GRIFFIN J.M., GREGORY P.R., 1976. « An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses », *The American Economic Review*, 66, 5, p. 845-857.
- GROSSMAN G.M., KRUEGER A.B., 1995. « Economic Growth and the Environment », *The Quarterly Journal of Economics*, 110, 2, p. 353-377.
- GUARIGLIA A., CARPENTER R., 2008. « Cash flow, investment, and investment opportunities : new tests using UK Panel data. », *Journal of banking & finance*, 32, 9, p. 1894-1906.
- GUERRIEN B., 2016. « La théorie néoclassique de la répartition : John Bates Clark et les autres », *Economie Critique - site de Bernard Guerrien*.
- GUERRIEN B., 2017. « Fonction de production agrégée et idéologie », *Economie Critique - site de Bernard Guerrien*.
- HALL C., 1972. « Migration and Metabolism in a Temperate Stream Ecosystem », *Ecology*, 53, p. 585-604.
- HALL C.A.S., LAMBERT J.G., BALOGH S.B., 2014. « EROI of different fuels and the implications for society », *Energy Policy*, 64, p. 141-152.
- HALL C., BALOGH S., MURPHY D., 2009. « What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? », *Energies*, 2, 1, p. 25-47.
- HAMILTON J., 2011. « Historical Oil Shocks », *NBER Working Paper*, p. 1-51.
- HAMILTON J., 2016. « Oil and the Macroeconomy », dans *The New Palgrave Dictionary of Economics*, London, Palgrave Macmillan UK, p. 1-7.
- HANLEY N., MCGREGOR P.G., SWALES J.K., TURNER K., 2009. « Do increases in energy efficiency improve environmental quality and sustainability? », *Ecological Economics*, 68, 3, p. 692-709.
- HARDT L., 2021. « What structural change is needed for a post-growth economy_ A framework of analysis and empirical evidence », *Ecological Economics*, p. 1-13.
- HARDT L., O'NEILL D.W., 2017. « Ecological Macroeconomic Models: Assessing Current Developments », *Ecological Economics*, 134, p. 198-211.
- HARDT L., OWEN A., BROCKWAY P., HEUN M.K., BARRETT J., TAYLOR P.G., FOXON T.J., 2018. « Untangling the drivers of energy reduction in the UK productive sectors: Efficiency or offshoring? », *Applied Energy*, 223, p. 124-133.
- HARRIBEY J.-M., 2013. *La richesse, la valeur et l'inestimable: fondements d'une critique socio-écologique de l'économie capitaliste*, Paris, Les Liens qui libèrent.
- HARRIBEY J.-M., 2019. « Dans les services monétaires non marchands, le travail est productif de valeur », *La nouvelle revue du travail*, 15, p. 1-15.

- HENNEGUELLE A., JATTEAU A., 2021. *Sociologie de la quantification*, Paris, La Découverte.
- HENRIQUES S.T., KANDER A., 2010. « The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy », *Ecological Economics*, 70, 2, p. 271-282.
- HEUN M.K., SANTOS J., BROCKWAY P.E., PRUIM R., DOMINGOS T., SAKAI M., 2017. « From Theory to Econometrics to Energy Policy: Cautionary Tales for Policymaking Using Aggregate Production Functions », *Energies*, 10, 2, p. 1-44.
- HEUN M.K., WIT M. DE, 2012. « Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions », *Energy Policy*, 40, p. 147-158.
- HEYER É., TIMBEAU X., 2022. « La croissance à l'épreuve des chocs: Perspectives pour l'économie française 2022 », *Revue de l'OFCE*, N° 177, 2, p. 45-71.
- HICKEL J., DORNINGER C., WIELAND H., SUWANDI I., 2022. « Imperialist appropriation in the world economy: Drain from the global South through unequal exchange, 1990–2015 », *Global Environmental Change*, 73, p. 1-13.
- HICKEL J., KALLIS G., 2020. « Is Green Growth Possible? », *New Political Economy*, 25, 4, p. 469-486.
- HICKS J., 1963. *The Theory of Wages*, New-York, Springer.
- HOECHLE D., 2007. « Robust Standard Errors for Panel Regressions with Cross-Sectional Dependence », *The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata*, 7, 3, p. 281-312.
- HORNBERG A., 1998. « Towards an ecological theory of unequal exchange: articulating world system theory and ecological economics », *Ecological Economics*, 25, 1, p. 127-136.
- HORNBERG A., 2009. « Zero-Sum World: Challenges in Conceptualizing Environmental Load Displacement and Ecologically Unequal Exchange in the World-System », *International Journal of Comparative Sociology*, 50, 3-4, p. 237-262.
- HORNBERG A., 2014. « Ecological economics, Marxism, and technological progress: Some explorations of the conceptual foundations of theories of ecologically unequal exchange », *Ecological Economics*, 105, p. 11-18.
- HORNBERG A., 2016. « The Fossil Interlude: Euro-American Power and the Return of the Physiocrats », dans STRAUSS S., RUPP S., LOVE T. (dirs.), *Cultures of Energy : power, practices and technology*, London, Routledge, p. 41-59.
- HORNBERG A., 2019. « The Money–Energy–Technology Complex and Ecological Marxism: Rethinking the Concept of “Use-value” to Extend Our Understanding of Unequal Exchange, Part 2 », *Capitalism Nature Socialism*, 30, 4, p. 71-86.
- HOTELLING H., 1931. « The Economics of Exhaustible Resources », *Journal of Political Economy*, 39, 2, p. 137-175.

- HOWELLS M., JEONG K., LANGLOIS L., LEE M.K., NAM K.-Y., ROGNER H.H., 2010. « Incorporating macroeconomic feedback into an energy systems model using an IO approach: Evaluating the rebound effect in the Korean electricity system », *Energy Policy*, 38, 6, p. 2700-2728.
- HUBACEK K., CHEN X., FENG K., WIEDMANN T., SHAN Y., 2021. « Evidence of decoupling consumption-based CO2 emissions from economic growth », *Advances in Applied Energy*, 4, p. 1-10.
- HUBERT P., 1980. « Le travail incorporé à l'électricité », *Economie et statistique*, 126, 1, p. 65-77.
- HUETTNER D.A., 1982. « Economic Values and Embodied Energy », *Science*, 216, 4550, p. 1141-1143.
- HURLIN C., MIGNON V., 2005. « Une synthèse des tests de racine unitaire sur données de panel », *Économie & prévision*, n° 169-170-171, 3, p. 253-294.
- HUSSON M., 1999. « Après l'âge d'or : sur Le Troisième âge du capitalisme », dans *Le marxisme d'Ernest Mandel*, PUF, Paris.
- HUSSON M., 2009. « Un capitalisme vert est-il possible ? », *Contretemps*.
- HUSSON M., 2010a. « La hausse tendancielle du taux de profit », *hussonet - site internet de Michel Husson*.
- HUSSON M., 2010b. « Le partage de la valeur ajoutée en Europe », *La Revue de l'Ires*, 64, 1, p. 47-91.
- HUSSON M., 2016. « Comptabilité nationale et valeur non-marchande », *Contretemps*.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2022. « Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability », Sixth Assessment Report, Genève.
- JACKSON A., JACKSON T., 2021. « Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI) », *Ecological Economics*, 185, p. 1-27.
- JACKSON T., VICTOR P.A., 2020. « The Transition to a Sustainable Prosperity-A Stock-Flow-Consistent Ecological Macroeconomic Model for Canada », *Ecological Economics*, 177, p. 1-14.
- JANCOVICI J.-M., 2012. « Les limites énergétiques de la croissance », *Le Débat*, 171, 4, p. 80-95.
- JANY-CATRICE F., 2018. « Conflicts in the calculation and use of the price index: the case of France », *Cambridge Journal of Economics*, 42, 4, p. 963-986.
- JANY-CATRICE F., 2019. *L'indice des prix à la consommation*, Paris, La Découverte.
- JEVONS W.S., 1865. *The Coal Question: an Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, Macmillan, London.

- JEVONS W.S., 1965. *The coal question: an inquiry concerning the progress of the Nation and the probable exhaustion of our coal-mines*, FLUX A.W. (dir.), New York, Etats-Unis d'Amérique, A.M. Kelley, 467 p.
- JOHANSEN L., 1972. *Production functions: an integration of micro and macro, short run and long run aspects*, Amsterdam, North-Holland Publishing.
- JONSSON F.A., 2014. « The Origins of Cornucopianism: A Preliminary Genealogy », *Critical Historical Studies*, 1, 1, p. 151-168.
- KAHRL F., ROLAND-HOLST D., ZILBERMAN D., 2013. « Past as Prologue? Understanding energy use in post-2002 China », *Energy Economics*, 36, p. 759-771.
- KALECKI M., 1952. *Theory of Economic Dynamics: An Essay on Cyclical and Long-Run Changes in Capitalist Economy*, London, Allen and Unwin.
- KALECKI M., 1966. *Théorie de la dynamique économique: essai sur les variations cycliques et à long terme de l'économie capitaliste*, Paris, Gauthier-Villars.
- KANDER A., 2002. *Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in Sweden 1800-2000.*, Stockholm, Almqvist and Wiksell International.
- KAYA Y., YOKOBORI K., 1997. *Environment, energy and economy: Strategies for sustainability*, New-York, United Nations University Press.
- KEEN S., AYRES R.U., STANDISH R., 2019. « A Note on the Role of Energy in Production », *Ecological Economics*, 157, p. 40-46.
- KHAZZOOM J.D., 1980. « Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances », *The Energy Journal*, 1, 4, p. 21-40.
- KHAZZOOM J.D., 1987. « Energy Saving Resulting from the Adoption of More Efficient Appliances », *The Energy Journal*, Volume 8, Number 4, p. 85-89.
- KING C.W., HALL C.A.S., 2011. « Relating Financial and Energy Return on Investment », *Sustainability*, 3, 10, p. 1810-1832.
- KLIMAN A., WILLIAMS S.D., 2015. « Why “financialisation” hasn't depressed US productive investment », *Cambridge Journal of Economics*, 39, 1, p. 67-92.
- KLIMAN A., 1999. « Debt, Economic Crisis, and the Tendential Fall in the Profit Rate: A temporal perspective », *Working Paper*, p.1-31.
- KLIMAN A.J., 2002. « The law of value and laws of statistics: sectoral values and prices in the US economy, 1977–97 », *Cambridge Journal of Economics*, 26, 3, p. 299-311.
- KLIMAN A.J., 2005. « Reply to Cockshott and Cottrell », *Cambridge Journal of Economics*, 29, 2, p. 317-323.

KOETSE M.J., GROOT H.L.F. DE, FLORAX R.J.G.M., 2008. « Capital-energy substitution and shifts in factor demand: A meta-analysis », *Energy Economics*, 30, 5, p. 2236-2251.

KULIONIS V., WOOD R., 2020. « Explaining decoupling in high income countries: A structural decomposition analysis of the change in energy footprint from 1970 to 2009 », *Energy*, 194, p. 1-10.

KÜMMEL R., 1982. « The impact of energy on industrial growth », *Energy*, 7, 2, p. 189-203.

KÜMMEL R., 2013. « Why energy's economic weight is much larger than its cost share », *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 9, p. 33-37.

KÜMMEL R., AYRES R.U., LINDENBERGER D., 2010. « Thermodynamic laws, economic methods and the productive power of energy », *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 35, 1-26, p. 1-26.

KÜMMEL R., LINDENBERGER D., 2020. « Energy in Growth Accounting and the Aggregation of Capital and Output », *Biophysical Economics and Sustainability*, 5, 1, p. 1-10.

KUZNETS S., 1954 [1984]. "Economic Growth and Income Inequality", dans *Economic Growth and Income Inequality*, London, Routledge.

LAMBERT J.G., HALL C.A.S., BALOGH S., GUPTA A., ARNOLD M., 2014. « Energy, EROI and quality of life », *Energy Policy*, 64, p. 153-167.

LANGE S., KERN F., PEUCKERT J., SANTARIUS T., 2021. « The Jevons paradox unravelled: A multi-level typology of rebound effects and mechanisms », *Energy Research & Social Science*, 74, p. 1-15.

LAVOIE M., 1992. « Éléments d'analyse d'une synthèse post-classique », *L'Actualité économique*, 68, 4, p. 607-631.

LAVOIE M., 2020. *Post-Keynesian monetary theory: selected essays*, Cheltenham, Elgar.

LAVOIE M., MONVOISIN V., PONSOT J.-F., 2021. *L'économie post-keynésienne*, La découverte, Paris.

LAVOISIER A.-L. DE, 1789. *Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, Chez Cuchet, Paris.

LEE F.S., JO T.-H., 2011. « Social Surplus Approach and Heterodox Economics », *Journal of Economic Issues*, 45, 4, p. 857-876.

LEE K., NI S., RATTI R.A., 1995. « Oil Shocks and the Macroeconomy: The Role of Price Variability », *The Energy Journal*, 16, 4, p. 39-56.

LEMOINE D., 2020. « General equilibrium rebound from energy efficiency innovation », *European Economic Review*, 125, p. 1-20.

LENZEN M., 2007. « Aggregation (in-)variance of shared responsibility: A case study of Australia », *Ecological Economics*, 64, 1, p. 19-24.

LEVIN A., LIN C.-F., JAMES CHU C.-S., 2002. « Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties », *Journal of Econometrics*, 108, 1, p. 1-24.

LIN B., DU K., 2015. « Measuring energy rebound effect in the Chinese economy: An economic accounting approach », *Energy Economics*, 50, p. 96-104.

LIPIETZ A., 1983. *Le monde enchanté: de la valeur à l'envol inflationniste*, Paris, La Découverte.

LÖFFLER K., BURANDT T., HAINSCH K., OEI P.-Y., 2019. « Modeling the low-carbon transition of the European energy system - A quantitative assessment of the stranded assets problem », *Energy Strategy Reviews*, 26, p. 1-16.

LORDON F., ORLEAN A., 2007. « Genèse de l'Etat et genèse de la monnaie : le modèle de la potentia multitudinis », *Revue du Mauss permanente*.

LOVINS A.B., 1998. « Further comments on Red Herrings », *Letter to the New Scientist*.

LUTZ K., 2008. « The Economic Effects of Energy Price Shocks », *Journal of Economic Literature*, 46, 4, p. 871-909.

LUZZATI T., ORSINI M., 2009. « Investigating the energy-environmental Kuznets curve », *Energy*, 34, 3, p. 291-300.

MADDALA G.S., WU S., 1999. « A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test », *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, S1, p. 631-652.

MAHMOOD H., ALKHATEEB T.T.Y., TANVEER M., MAHMOUD D.H.I., 2021. « Testing the Energy-Environmental Kuznets Curve Hypothesis in the Renewable and Nonrenewable Energy Consumption Models in Egypt », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 14, p. 1-17.

MALM A., 2016. *Fossil capital: the rise of steam power and the roots of global warming*, London, Verso.

MALM A., 2021. *L'anthropocène contre l'histoire: Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, Paris, la Fabrique éditions.

MALTHUS T.R., 1830. *Essai sur le principe de population en tant qu'il influe sur le progrès futur de la société avec des remarques sur les théories de M. Godwin, de M. Condorcet et d'autres auteurs*, Paris, Ined éditions.

MANKIW N.G., 1997. *Macroeconomics*, New York, Worth Publications.

MARQUES A., RODRIGUES J., LENZEN M., DOMINGOS T., 2012. « Income-based environmental responsibility », *Ecological Economics*, 84, p. 57-65.

MARX K., 1867 [1959]. *Le Capital : critique de l'économie politique*, Paris, Editions sociales.

MARX K., 1875 [2008]. *Critique du programme de Gotha*, Paris, Les Editions sociales.

- MARX K., 1905 [1963]. *Theories of surplus value (Pt. 1)*, Moscou, Progress Publishers.
- MAS-COLELL A., WHINSTON M.D., GREEN J.R., 1995. *Microeconomic theory*, New York, Oxford University Press.
- MAZZUCATO M., SEMIENIUK G., 2018. « Financing renewable energy: Who is financing what and why it matters », *Technological Forecasting and Social Change*, 127, p. 8-22.
- MEADOWS D.H., MEADOWS D.L., RANDERS J., BEHRENS W.W.I., 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.
- MENG B., PETERS G.P., WANG Z., LI M., 2018. « Tracing CO2 emissions in global value chains », *Energy Economics*, 73, p. 24-42.
- MISSEMER A., 2017. *Les économistes et la fin des énergies fossiles: 1865-1931*, Paris, Classiques Garnier.
- MONTALBAN M., 2012. « De la place de la théorie de la valeur et de la monnaie dans la théorie de la régulation : critique et synthèse », *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, 12, p.1-27.
- MOREAU V., VUILLE F., 2018. « Decoupling energy use and economic growth: Counter evidence from structural effects and embodied energy in trade », *Applied Energy*, 215, p. 54-62.
- MURPHY D.J., 2014. « The implications of the declining energy return on investment of oil production », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 372, p. 1-19.
- MURPHY D.J., HALL C.A.S., 2011. « Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth: EROI, peak oil, and the end of economic growth », *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219, 1, p. 52-72.
- NORDIN S.K.B.S., SEK S.K., 2021. « Testing the validity of the Energy-Environmental Kuznets Curve (EEKC) hypothesis in oil-importing versus oil-exporting countries: A heterogeneous panel data modeling analysis », *AIP Conference Proceedings*, 2423, 1.
- OCHOA E.M., 1989. « Values, prices, and wage-profit curves in the US economy », *Cambridge Journal of Economics*, 13, 3, p. 413-429.
- O'CONNOR J., 1988. « Capitalism, nature, socialism a theoretical introduction », *Capitalism Nature Socialism*, 1, 1, p. 11-38.
- OEEC, 1952. *A standardised system of national accounts*, OEEC, Paris.
- ORESQUES N., CONWAY E.M., 2016. *Les marchands de doute: Ou comment une poignée de scientifiques ont masqué la vérité sur des enjeux de société tels que le tabagisme et le réchauffement climatique*, Paris, Humensis.
- ORLEAN A., 2011a. *L'empire de la valeur: refonder l'économie*, Paris, Édition du Seuil.

- ORLEAN A., 2011b. « Réponse à Jean-Marie Harribey », *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, 10.
- OULD-AHMED P., 2008. « Le troc, une forme monétaire alternative en russie (1991-2001) », dans *Conflicts et pouvoirs dans les institutions du capitalisme*, Presses de Sciences Po, p. 143-171.
- ÖZOKCU S., ÖZDEMİR Ö., 2017. « Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, p. 639-647.
- PABLO-ROMERO M. DEL P., DE JESUS J., 2016. « Economic growth and energy consumption: The Energy-Environmental Kuznets Curve for Latin America and the Caribbean », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, p. 1343-1350.
- PASINETTI L.L., 1977. *Lectures on the theory of production*, London, Macmillan.
- PASSARELLA M.V., 2017. « Monetary theories of production », dans *The Routledge Handbook of Heterodox Economics*, London, Routledge.
- PASSET R., 1979. *L'économie et le vivant*, Paris, Payot.
- PEREZ-SANCHEZ L., VELASCO-FERNANDEZ R., GIAMPIETRO M., 2021. « The international division of labor and embodied working time in trade for the US, the EU and China », *Ecological Economics*, 180, p. 1-10.
- PERRIER Q., QUIRION P., 2017. « La transition énergétique est-elle favorable aux branches à fort contenu en emploi ? Une analyse input-output pour la France », *Revue d'économie politique*, 127, 5, p. 851-887.
- PERSSON L., CARNEY ALMROTH B.M., COLLINS C.D., CORNELL S., WIT C.A. DE, DIAMOND M.L., FANTKE P., HASSELLÖV M., MACLEOD M., RYBERG M.W., SØGAARD JØRGENSEN P., VILLARRUBIA-GOMEZ P., WANG Z., HAUSCHILD M.Z., 2022. « Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities », *Environmental Science & Technology*, 56, 3, p. 1510-1521.
- PETHERICK A., 2012. « Dirty money », *Nature Climate Change*, 2, 2, p. 72-73.
- PETROVIĆ P., 1987. « The deviation of production prices from labour values: some methodology and empirical evidence », *Cambridge Journal of Economics*, 11, 3, p. 197-210.
- PINDYCK R., 1990. « Irreversibility, Uncertainty, and Investment », w3307, Cambridge (USA), National Bureau of Economic Research.
- PIÑERO P., BRUCKNER M., WIELAND H., PONGRÁCZ E., GILJUM S., 2019. « The raw material basis of global value chains: allocating environmental responsibility based on value generation », *Economic Systems Research*, 31, 2, p. 206-227.
- PIRGMAIER E., 2021. « The value of value theory for ecological economics », *Ecological Economics*, 179, p. 1-10.
- PODOLINSKY S., 1881 [2004]. « Socialisme and the unity of physical forces », *Organization & Environment*, 17, p. 61-75.

POMERANZ K., 2000. *The great divergence: China, Europe and the making of the modern world economy*, Princeton, Princeton University Press.

POTTIER A., 2012. *L'économie dans l'impasse climatique*, Thèse de doctorat.

POULON F., 2015. « La méthode systémique », dans *Économie générale*, Paris, Dunod, p. 45-90.

RAUSCH S., SCHWERIN H., 2018. « Does higher energy efficiency lower economy-wide energy use? », *Working Paper 18/299*, p. 1-60.

RAWORTH K., 2017. « Why it's time for Doughnut Economics », *IPPR Progressive Review*, 24, 3, p. 216-222.

RAYNAUD M., OSSO D., BOURGES B., DUPLESSIS B., ADNOT J., 2016. « Evidence of an indirect rebound effect with reversible heat pumps: having air conditioning but not using it? », *Energy Efficiency*, 9, 4, p. 847-860.

RICARDO D., 1821 [1985]. *Des principes de l'économie politique et de l'impôt*, Paris, Flammarion.

ROBINSON J., 1953. « The Production Function and the Theory of Capital », *The Review of Economic Studies*, 21, 2, p. 81-106.

ROBINSON J., 1962. « A Model of Accumulation », dans ROBINSON J. (dir.), *Essays in the Theory of Economic Growth*, London, Palgrave Macmillan UK, p. 22-87.

ROCKSTRÖM J., STEFFEN W., NOONE K., PERSSON Å., CHAPIN F.S., LAMBIN E., LENTON T.M., SCHEFFER M., FOLKE C., SCHELLNHUBER H.J., NYKVIST B., WIT C.A. DE, HUGHES T., LEEUW S. VAN DER, RODHE H., SÖRLIN S., SNYDER P.K., COSTANZA R., SVEDIN U., FALKENMARK M., KARLBERG L., CORELL R.W., FABRY V.J., HANSEN J., WALKER B., LIVERMAN D., RICHARDSON K., CRUTZEN P., FOLEY J., 2009. « Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity », *Ecology and Society*, 14, 2, p. 1-33.

RØPKE I., 2021. « From value to valuation and appropriation. A comment on Pirgmaier's paper "The value of value theory for ecological economics" », *Ecological Economics*, 187, p. 1-7.

ROUBINE ISAAK.I., 1928 [2008]. *Essais sur la théorie de la valeur de Marx*, Syllepse, Paris.

SAKAI M., BROCKWAY P., BARRETT J., TAYLOR P., 2018. « Thermodynamic Efficiency Gains and their Role as a Key 'Engine of Economic Growth' », *Energies*, 12, 1, p. 1-14.

SALAMA P., TRAN H.H., 1992. *Introduction à l'économie de Marx*, Paris, la Découverte.

SAMUELSON P.A., 1970. « The „Transformation" from Marxian „Values" to Competitive „Prices": A Process of Rejection and Replacement », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 67, 1, p. 423-425.

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*, 148, p. 103-120.

SAUNDERS H.D., 2000. « A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brookes », *Energy Policy*, p. 439-449.

SCHNEIDER F.G., 2012. « The Shadow Economy and Work in the Shadow: What Do We (Not) Know? », *Discussion Paper No. 6423*, p. 1-73.

SECCARECCIA M., 1982. « Keynes, Sraffa et l'économie classique : le problème de la mesure de la valeur », *L'Actualité économique*, 58, 1-2, p. 115-151.

SEMBOJA H.H.H., 1994. « The effects of an increase in energy efficiency on the Kenya economy », *Energy Policy*, 22, 3, p. 217-225.

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*, 76, p. 704-715.

SHAHBAZ M., SHAFIULLAH M., KHALID U., SONG M., 2020. « A nonparametric analysis of energy environmental Kuznets Curve in Chinese Provinces », *Energy Economics*, 89, p. 104814.

SHAIKH A., 1974. « Laws of Production and Laws of Algebra: The Humbug Production Function », *The Review of Economics and Statistics*, 56, 1, p. 115.

SHAIKH A., 1984. « The transformation from Marx to Sraffa », dans *Ricardo, Marx, Sraffa*, London, Verso.

SHAIKH A., 2021. « Marx and the Other Sraffa: The Insignificant Empirical Effect of Price-Value Deviations on Economic Aggregates », dans VELUPILLAI K. (dir.), *Keynesian, Sraffian, Computable and Dynamic Economics : Theoretical and Simulational (Numerical) Approaches*, New-York, Springer International Publishing, p. 367-385.

SHAIKH A.M., 1998. « The Empirical Strength of the Labour Theory of Value », dans BELLOFIORE R. (dir.), *Marxian Economics: A Reappraisal: Volume 2: Essays on Volume III of Capital Profit, Prices and Dynamics*, London, Palgrave Macmillan UK, p. 225-251.

SMALL K.A., VAN DENDER K., 2007. « Fuel Efficiency and Motor Vehicle Travel: The Declining Rebound Effect », *The Energy Journal*, 28, 1, p. 25-51.

SMITH A., 1776 [2000]. *Recherche sur la nature et les causes de la richesse des nations. Livres I et II*, Paris, Economica.

SOLOW J.L., 1987. « The Capital-Energy Complementarity Debate Revisited », *American Economic Review*, 77, 4, p. 604-614.

SOLOW R.M., 1956. « A Contribution to the Theory of Economic Growth », *The Quarterly Journal of Economics*, 70, 1, p. 65-94.

SOLOW R.M., 1957. « Technical Change and the Aggregate Production Function », *The Review of Economics and Statistics*, 39, 3, p. 312-320.

SOLOW R.M., 1974. « The Economics of Resources or the Resources of Economics », *The American Economic Review*, 64, 2, p. 1-14.

- SOLOW R.M., 1988. « Growth Theory and After », *The American Economic Review*, 78, 3, p. 307-317.
- SORRELL S., 2009. « Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency », *Energy Policy*, 37, 4, p. 1456-1469.
- SORRELL S., DIMITROPOULOS J., SOMMERVILLE M., 2009. « Empirical estimates of the direct rebound effect: A review », *Energy Policy*, 37, 4, p. 1356-1371.
- SORRELL S., UNIVERSITY OF SUSSEX, 2007. *The Rebound effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*, Sussex, UK Energy Research Centre.
- SRAFFA P., 1953. *The Works and Correspondence of David Ricardo Vol. I*, Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge university Press.
- SRAFFA P., 1960 [1963]. *Production of commodities by means of commodities: prelude to a critique of economic theory*, Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press.
- STEEDMAN I., TOMKINS J., 1998. « On measuring the deviation of prices from values », *Cambridge Journal of Economics*, 22, 3, p. 379-385.
- STEININGER K.W., LININGER C., MEYER L.H., MUÑOZ P., SCHINKO T., 2016. « Multiple carbon accounting to support just and effective climate policies », *Nature Climate Change*, 6, 1, p. 35-41.
- STERN D.I., 2004. « The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve », *World Development*, 32, 8, p. 1419-1439.
- STERN D.I., 2020. « How large is the economy-wide rebound effect? », *Energy Policy*, 147, p. 1-12.
- STIGLER G.J., 1958. « Ricardo and the 93% Labor Theory of Value », *The American Economic Review*, 48, 3, p. 357-367.
- STIGLITZ J., 1974. « Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths », *The Review of Economic Studies*, 41, p. 123-137.
- STIGLITZ J., SEN A., FITOUSSI J.-P., 2008. *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, La documentation française, Paris.
- SURI V., CHAPMAN D., 1998. « Economic growth, trade and energy: implications for the environmental Kuznets curve », *Ecological Economics*, 25, 2, p. 195-208.
- TERTRE R. DU, GUY Y., 2019. « Chapitre 6. Gouvernance d'entreprise et finance », dans *Capitalisme - Le temps des ruptures*, Paris, Odile Jacob, p. 267-343.
- TODD E., 2021. *Les luttes de classes en France au XXIe siècle*, Paris, Éditions points.

TORDJMAN H., 2021. *La croissance verte contre la nature: critique de l'écologie marchande*, Paris, la Découverte.

TSOULFIDIS L., 2008. « Price–value deviations: further evidence from input–output data of Japan », *International Review of Applied Economics*, 22, 6, p. 707-724.

TSOULFIDIS L., MANIATIS T., 2002. « Values, prices of production and market prices: some more evidence from the Greek economy », *Cambridge Journal of Economics*, 26, 3, p. 359-369.

TURNER K., 2009. « Negative rebound and disinvestment effects in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy », *Energy Economics*, 31, 5, p. 648-666.

TVERBERG G.E., 2012. « Oil supply limits and the continuing financial crisis », *Energy*, 37, 1, p. 27-34.

UNEP, 2011. « Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication – a synthesis for policy makers. », Nairobi, United Nations Environment Programme.

VADÉN T., LÄHDE V., MAJAVA A., JÄRVENSIVU P., TOIVANEN T., HAKALA E., ERONEN J.T., 2020. « Decoupling for ecological sustainability: A categorisation and review of research literature », *Environmental Science & Policy*, 112, p. 236-244.

WANG Q., LI R., 2016. « Drivers for energy consumption: A comparative analysis of China and India », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, p. 954-962.

WEBER M., 1922. *Essais sur la théorie de la science*, Plon, Paris.

WILLIAMS E., WARR B., AYRES R.U., 2008. « Efficiency Dilution: Long-Term Exergy Conversion Trends in Japan », *Environmental Science & Technology*, 42, 13, p. 4964-4970.

WOOD R., STADLER K., SIMAS M., BULAVSKAYA T., GILJUM S., LUTTER S., TUKKER A., 2018. « Growth in Environmental Footprints and Environmental Impacts Embodied in Trade: Resource Efficiency Indicators from EXIOBASE3: Growth in Environmental Impacts Embodied in Trade », *Journal of Industrial Ecology*, 22, 3, p. 553-564.

WU Y., ZHU Q., ZHU B., 2018. « Comparisons of decoupling trends of global economic growth and energy consumption between developed and developing countries », *Energy Policy*, 116, p. 30-38.

XU X., 2021. « Is burden responsibility more effective? A value-added method for tracing worldwide carbon emissions », *Ecological Economics*, 181, p. 1-11.

XU X., MU M., WANG Q., 2017. « Recalculating CO₂ emissions from the perspective of value-added trade: An input-output analysis of China's trade data », *Energy Policy*, 107, p. 158-166.

YILMAZ Z.I., SARI R., SIVRIKAYA A., FATHURRAHMAN F., 2022. « Rebound Effect of Residential Space Heating: The Case of Ankara », *Energy Research Letters*, 3, p. 1-6.

ZACHARIAH D., 2006. « Labour value and equalisation of profit rates: a multi-country study », *Indian Development Review*, p. 1-20.

ZHANG H., LAHR M.L., 2014. « China's energy consumption change from 1987 to 2007: A multi-regional structural decomposition analysis », *Energy Policy*, 67, p. 682-693.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. COUPLAGE, DECOUPLAGE ET SURCOUPLAGE ENTRE LE PIB (Y) ET LA CONSOMMATION D'ENERGIE (E)	24
TABLEAU 2. CROISSANCE ABSOLUE, PAR TETE ET PAR PIB, DES PRESSIONS ENVIRONNEMENTALES (1995-2011)	41
TABLEAU 3. EMISSIONS DE CO2 SELON LES DIFFERENTS PRINCIPES DE RESPONSABILITE EN 2014 : PRODUCTION, CONSOMMATION ET PAR LA VALEUR AJOUTEE	47
TABLEAU 4. EFFETS DES DIFFERENTS REGIMES DE RESPONSABILITE SUR LE DECOUPLAGE PIB-ENERGIE	50
TABLEAU 5. LES LOYERS IMPUTES ET REELS DANS LE PIB NOMINAL EN FRANCE (1990-2018)	56
TABLEAU 6. LES FRONTIERES DE LA PRODUCTION	62
TABLEAU 7. PRIX RELATIFS ET CROISSANCE DANS UNE ECONOMIE FICTIVE A DEUX BIENS	64
TABLEAU 8. PRIX RELATIFS DE REFERENCE ET MESURE DE LA PRODUCTION REELLE	65
TABLEAU 9. RELATION OBSERVEE ENTRE LES DOMMAGES ET LE PIB SELON LA VALEUR DES COEFFICIENTS DE REGRESSION	73
TABLEAU 10. RESULTATS DE LA LITTERATURE QUANT A L'EXISTENCE D'UNE CEK EN MATIERE D'ENERGIE	78
TABLEAU 11. COMPARAISON DU DECOUPLAGE SELON LES AGREGATS DE PIB ET DE CONSOMMATION D'ENERGIE RETENUS	80
TABLEAU 12. DECOMPOSITION MULTIPLICATIVE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE POUR SIX PAYS EUROPEENS ASSURANT UN DECOUPLAGE ABSOLU	86
TABLEAU 13. DECOMPOSITION ETENDUE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DES SECTEURS PRODUCTIFS BRITANNIQUES (1997-2013)	94
TABLEAU 14. PART DES SERVICES DANS LE PIB NOMINAL ET DANS LE PIB REEL EN % ENTRE 1971 ET 2005 EN FRANCE ET EN GRANDE-BRETAGNE	98
TABLEAU 15. TYPOLOGIE DES DIFFERENTS EFFETS REBONDS	106
TABLEAU 16. LES DIFFERENTS STADES DE MESURE DE L'EFFET REBOND	109
TABLEAU 17. LES DIFFERENTES VALEURS DE L'ELASTICITE	132
TABLEAU 18. IMPACT DE L'HYPOTHESE DE PRODUCTIVITE MARGINALE SUR LES SCENARIOS DE DECOUPLAGE	136
TABLEAU 19. CAPACITE DES DIFFERENTES FONCTIONS DE PRODUCTION A PREDIRE LE PIB REEL PORTUGAIS	150
TABLEAU 20. VALEURS DE MASSE, VOLUME ET ENERGIE POUR UNE POMME ET UNE TRANCHE DE PAIN	164
TABLEAU 21. PRODUCTION TOTALE EN GRAMMES, CENTIMETRES CUBES ET CALORIES ENTRE 2020 ET 2022	164

TABLEAU 22. CROISSANCE ANNUELLE MOYENNE DU RATIO PIB REEL/EXERGIE UTILE	
ENTRE 1950 ET 2009	170
TABLEAU 23. COMPARAISONS DES DIFFERENTS PARADIGMES IDENTIFIES PAR HORNBERG	175
TABLEAU 24. LES DEUX DIMENSIONS DE LA PRODUCTION : MESURE ET SOURCES	178
TABLEAU 25. LE TABLEAU ECONOMIQUE SOUS FORME DE TABLE INPUT-OUTPUT	189
TABLEAU 26. MODELES ESTIMES POUR REGRESSION NON LINEAIRE DU PRIX DU PETROLE PAR RAPPORT AU	
EROI	210
TABLEAU 27. INTENSITE EN ENERGIE INCORPOREE POUR CHAQUE SECTEUR SELON LES 4 SCENARII	223
TABLEAU 28. RESULTAT DES REGRESSIONS ENTRE LA VALEUR ECONOMIQUE ET L'ENERGIE INCORPOREE POUR	
LES 4 SCENARII	224
TABLEAU 29. ECART A LA VALEUR TRAVAIL EN PRESENCE DE COMPOSITIONS ORGANIQUES DIFFERENTES ...	250
TABLEAU 30. PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ÉVALUATION DE LA DIVERGENCE	
ENTRE PRIX ET VALEURS TRAVAIL	256
TABLEAU 31. COMPOSITION TECHNIQUE ET COMPOSITION ORGANIQUE	262
TABLEAU 32. L'ENERGIE DANS LES THEORIES DE LA CROISSANCE NEO-PHYSDCRATIQUES ET CLASSIQUES ...	269
TABLEAU 33. SOURCES DISPONIBLES POUR LES PRIX DE L'ENERGIE	283
TABLEAU 34. RESULTATS DES TESTS DE RACINE UNITAIRE	294
TABLEAU 35. LES DIFFERENTES EQUATIONS ESTIMEES	295
TABLEAU 36. POOL OLS AVEC LES DIFFERENTES VARIABLES EXPLICATIVES.	296
TABLEAU 37. RESULTATS DE LA REGRESSION MULTIVARIEE DU TAUX DE PROFIT SUR LE PRIX RELATIF DE	
L'ENERGIE, LE TAUX D'EXPLOITATION ET LA COMPOSITION TECHNIQUE DU CAPITAL	298
TABLEAU 38. RESULTATS DES DIFFERENTS TESTS PERMETTANT DE DEPARTAGER LES MODELES	300
TABLEAU 39. TEST DE L'HETEROSCEDASTICITE, DE L'AUTOCORRELATION ET DE LA DEPENDANCE	
ENTRE LES SECTIONS	301
TABLEAU 40. RESULTATS DES 3 MODELES : EFFET FIXE, DISROLL & KRAY ET FGLS	302
TABLEAU 41. RESUME DES DIVERGENCES ENTRE LES ANALYSES MARXISTES ET POST-KEYNESIENNES	322

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. TAUX D'INFLATION ANNUEL DU PRIX A LA CONSOMMATION ET DU PRIX DE L'ENERGIE POUR LES 27 PAYS EUROPEENS (2002-2022)	17
FIGURE 2. LES 9 SEUILS ECOLOGIQUES D'APRES LA THEORIE DU DOUGHNUT	19
FIGURE 3. EMISSIONS ANNUELLES DE CO2 DANS LE MONDE, DANS L'UNION EUROPEENNE, EN CHINE ET AUX ETATS-UNIS (1900-2020).	20
FIGURE 4. EVOLUTION DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ENERGIE PRIMAIRE (1850-2019)	22
	23
FIGURE 5. CONSOMMATION FINALE D'ENERGIE EN TWH EN 2015 ET 2050 SELON LES 4 SCENARIOS DE L'ADEME	23
FIGURE 6. COMPARAISONS DU DECOUPLAGE ENERGIE PAR TETE - PIB/PAR TETE EN APPROCHE PRODUCTION ET CONSOMMATION POUR LA PERIODE 1995-2011	27
FIGURE 7. INDEX DU DECOUPLAGE ENTRE LE PIB ET LA CONSOMMATION D'ENERGIE DOMESTIQUE (1965-2015)	39
FIGURE 8. LES TROIS REGIMES DE RESPONSABILITE : PRODUCTION (JAUNE), CONSOMMATION (VERT) ET REVENU (VIOLET).	42
FIGURE 9. RESPONSABILITE DES EMISSIONS CO2 PAR TETE EN APPROCHES PRODUCTION, CONSOMMATION ET REVENU	45
FIGURE 10. INDICE DES PRIX DE L'ALIMENTATION, DES PRODUITS MANUFACTURES ET DE L'ENERGIE EN FRANCE (2000-2022).	66
FIGURE 11. LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS.....	72
FIGURE 12. DECOMPOSITION CONVENTIONNELLE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DES SECTEURS PRODUCTIFS ANGLAIS (1997-2013)	87
FIGURE 13. LES DIFFERENTS STADES DE L'ENERGIE.	90
FIGURE 14. EXERGIE UTILE EN EXAJOULES DANS L'UNION EUROPEENNE A 15 (1960-2019).....	91
FIGURE 15. DECOMPOSITION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE EN PETA-JOULES (PJ) POUR LA SUISSE (2001-2011)	97
FIGURE 16. LES EFFETS DYNAMIQUES D'UNE AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES MACHINES A VAPEUR	104
FIGURE 17. PRODUCTION CONSTANTE ET BAISSSE DE LA QUANTITE DE RESSOURCES.	129
FIGURE 18. REPRESENTATION GRAPHIQUE DE L'ELASTICITE DE SUBSTITUTION.	131
FIGURE 19. LA RELATION ENTRE L'ELASTICITE PRIX ET LA PART EN VALEUR DE L'ENERGIE	135
FIGURE 20. DEPENSES EN ENERGIE (PRIMAIRE ET FINALE) RAPPORTEES AU PIB.....	137

FIGURE 21.	FONCTION DE PRODUCTION LINEX PRODUCTION AVEC EXERGIE UTILE.	148
FIGURE 22.	LE PROCESSUS DE CONVERSION DE L'EXERGIE FINALE EN EXERGIE UTILE.	165
FIGURE 23.	CROISSANCE DE LA PRODUCTION PHYSIQUE ET DE L'ENERGIE FINALE UTILISEE POUR 15 PAYS EUROPEENS (1961-2009).	168
FIGURE 24.	CONSOMMATION MONDIALE D'ENERGIE PAR TETE (1800-2014).	193
FIGURE 25.	FRONTIERES DE DIFFERENTS EROI ASSOCIES A L'EXEMPLE DE L'EXTRACTION ET DU RAFFINAGE DE 100 MJ DE PETROLE BRUT.	197
FIGURE 26.	REPRESENTATION DU SURPLUS AU STADE UTILE DE L'ENERGIE.	198
FIGURE 27.	EVOLUTION DU RATIO D'ACCESSIBILITE MINIMAL (P/UE) PERMETTANT D'OBTENIR UN SURPLUS (1900-2010).	201
FIGURE 28.	ESTIMATIONS DU EROI GLOBAL DU CHARBON, DU GAZ, DU PETROLE ET DE L'ENSEMBLE DES ENERGIES FOSSILES.	202
FIGURE 29.	EVOLUTION DU SURPLUS ET ACCESSIBILITE DE L'ENERGIE.	203
FIGURE 30.	LE MODELE DE CROISSANCE ECONOMIQUE, DU PRE-PIC PETROLIER AU POST-PIC PETROLIER...	206
FIGURE 31.	LES RELATIONS ENTRE EROI ET PRIX DE L'ENERGIE.	209
FIGURE 32.	LE PROCESSUS D'ABSTRACTION DU TRAVAIL CONCRET.	241
FIGURE 33.	LA VALEUR : UN PROCESSUS D'ALLOCATION DU TRAVAIL ENTRE LES BRANCHES.	245
FIGURE 34.	ARTICULATION ENTRE DIMENSIONS MONETAIRES ET TECHNIQUES CHEZ A.SHAIKH.	253
FIGURE 35.	L'ENERGIE COMME FACTEUR LIMITANT DANS UN MODELE CLASSIQUE.	265
FIGURE 36.	ESTIMATION DU TRAVAIL INCORPORE A LA PRODUCTION D'ELECTRICITE FRANÇAISE EN 1990 SELON DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE.	274
FIGURE 37.	TAUX DE PROFIT ET COUT DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE. FRANCE (1949-2006)	280
FIGURE 38.	EVOLUTION DU PRIX DE L'ENERGIE SELON DIFFERENTES SOURCES (FRANCE 2021)	284
FIGURE 39.	INDICE DU PRIX RELATIF DE L'ENERGIE ET INDICE DU PRIX DE L'ENERGIE (FRANCE, 1960-2021)	285
FIGURE 40.	PRIX RELATIF DE L'ENERGIE – (16 PAYS, 1995-2019).	286
FIGURE 41.	TAUX DE PROFIT AUX ETATS-UNIS (1950-2008 ET 1960-2019)	288
FIGURE 42.	TAUX DE PROFIT DES 16 PAYS ETUDIES (1995-2009).	289
FIGURE 43.	LE TAUX D'EXPLOITATION DE LA FORCE DE TRAVAIL DANS L'ESPACE ET LE TEMPS (1995-2019)	290
FIGURE 44.	LA COMPOSITION TECHNIQUE DU CAPITAL (1995-2019)	292
FIGURE 45.	LA RELATION ENTRE COMPOSITION TECHNIQUE DU CAPITAL ET LE TAUX DE PROFIT.	304

FIGURE 46.	PROFIT ET INVESTISSEMENT DES SOCIETES NON FINANCIERES – FRANCE (1949-2008)	311
FIGURE 47.	LE RALENTISSEMENT DU TAUX D'ACCUMULATION DANS LE CAPITALISME CONTEMPORAIN.....	312
FIGURE 48.	TAUX D'ACCUMULATION ET AUTRES FACTEURS CONTRIBUANT AU TAUX DE PROFIT. USA, 1970- 2020	321
FIGURE 49.	PART DU TAUX DE PROFIT EXPLIQUEE PAR LE TAUX D'ACCUMULATION (I/K) ET PAR A/K	321
FIGURE 50.	LE ROLE DE L'ENERGIE DANS LA FORMATION DU TAUX DE PROFIT ET L'ACCUMULATION DU CAPITAL.....	325

LISTE DES ACRONYMES

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AMECO	<i>Annual Macro-Economic database (Union européenne)</i>
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CEK	Courbe Environnementale de Kuznets
CES	<i>Constant Elasticity of Substitution</i>
CGE	<i>Computable General Equilibrium</i>
CN	<i>Changed Needs</i>
CO	monoxyde de carbone
CO2	dioxyde de carbone
COC	Composition organique du capital
CTC	Composition technique du capital
E	Énergie
EECK	<i>Energy-Environmental Kuznets Curve</i> , en français voir CEK
EJ	Exajoule
EMR	<i>Energetic Metabolic Rate</i>
EROI	<i>Energy Returned On Energy Investment</i> , en français voir TRE
EXPL	Taux d'exploitation
FBCF	Formation brute de capital fixe
FIRE	<i>Finance, Insurance, Real Estate</i>
GEMS	<i>Global Environmental Monitoring System</i>
GES	Gaz à Effets de Serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GR	Georgescu-Roegen (auteur)
IDA	<i>Index Decomposition Analysis</i>
INSEE	Institut National des Statistiques et des Études Économiques
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , en français voir GIEC
K	Capital
Ktoe	<i>Kilotonne of Oil Equivalent</i>
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt-heure
MJ	Mégajoules

MROI	<i>Monetary Return on Investment</i>
MVA	<i>Measurable Value Added</i>
NOx	oxydes d'azote
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OEEC	Organisation européenne de coopération économique
OFCE	Observatoire français des conjonctures économiques
OLS	<i>Ordinary Least Square</i>
OPEP	Organisation des pays exportateurs de pétrole
PIB	Produit Intérieur Brut
PJ	Pétajoules
PmE	Productivité marginale de l'énergie
PmK	Productivité marginale du capital
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement, en anglais voir UNEP
SIFIM	Services d'intermédiation financière indirectement mesurés
SMIC	Salaire interprofessionnel minimum de croissance
SNA	<i>System of National Account</i>
SO2	dioxyde de soufre
TEP	Théorème de l'épuisement du produit
TmST	Taux marginal de substitution technique
TWh	Térawatt-heure
TRE	Taux de retour énergétique
U	énergie utile
UNEP	voir PNUE
VES	<i>variable elasticity of substitution</i>
WIOD	<i>World Input-Output Database</i>

TABLE DES MATIERES GENERALE

REMERCIEMENTS	11
SOMMAIRE	13
INTRODUCTION GENERALE	15
<u>CHAPITRE 1. APPREHENDER LE DECOUPLAGE : UNE REFLEXION METHODOLOGIQUE.....</u>	<u>35</u>
INTRODUCTION DU CHAPITRE 1.....	37
1. MESURER LE DECOUPLAGE ABSOLU : ENJEUX RELATIFS A LA CONSTRUCTION DES SERIES DE CONSOMMATION D'ENERGIE ET DE PIB REEL.	38
1.1. L'EXISTENCE DU DECOUPLAGE ABSOLU	38
1.2. LA CONSTRUCTION DES SERIES DE CONSOMMATION D'ENERGIE : LE CHOIX D'UN REGIME DE RESPONSABILITE	41
1.3. LA CONSTRUCTION DES SERIES DE PIB REEL : DEFINITION DES FRONTIERES DE LA PRODUCTION ET CALCUL D'UN DEFLATEUR.....	50
1.3.1 DEFINIR LES FRONTIERES DE LA PRODUCTION	51
1.3.2. PASSER DU PIB NOMINAL AU PIB REEL : LE CHOIX D'UN DEFLATEUR	63
CONCLUSION DE LA PREMIERE SECTION	69
2. EXPLIQUER LES DETERMINANTS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PASSEE : DE LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS A L'ANALYSE DE DECOMPOSITION D'INDEX	70
2.1. LA COURBE ENVIRONNEMENTALE DE KUZNETS : CADRE THEORIQUE ET RESULTATS POUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE	71
2.1.1. LES TRAVAUX FONDATEURS : DEMARCHE, RESULTATS ET THEORISATION.....	71
2.1.2. APPLICATIONS AU CAS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE : THE ENERGY- ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE (EEKC)	75
2.2. LE REGARD PORTE PAR L'INDEX DECOMPOSITION ANALYSIS SUR LA DYNAMIQUE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE.	83
2.2.1. L'ANALYSE DE DECOMPOSITION D'INDEX : DEMARCHE ET USAGE POUR EXPLIQUER LE DECOUPLAGE ABSOLU.....	83
2.2.2.LA NECESSITE DE DECOMPOSITIONS PLUS FINES	86
2.2.3.LES LIMITES D'UNE METHODE STATIQUE : L'EXEMPLE DE L'EFFET REBOND ..	101
CONCLUSION DU CHAPITRE 1 : LA NECESSITE D'ETUDIER LA PLACE DE L'ENERGIE DANS LES THEORIES DE LA CROISSANCE.....	114

CHAPITRE 2. L'ENERGIE ET LES FONCTIONS DE PRODUCTION AGREGEE. EVALUATION DE LA PERTINENCE DU CADRE NEOCLASSIQUE POUR INTEGRER L'ENERGIE A LA THEORIE DE LA CROISSANCE	119
INTRODUCTION DU CHAPITRE 2	119
1. LA THEORIE NEOCLASSIQUE DE LA CROISSANCE ET LA QUESTION ENERGETIQUE	120
1.1. LE MODELE DE SOLOW	121
1.2. L'INTEGRATION DES RESSOURCES NATURELLES DANS LE MODELE DE SOLOW	125
1.3. LES EVALUATIONS EMPIRIQUES DE LA SUBSTITUABILITE ENTRE CAPITAL ET ENERGIE	130
CONCLUSION DE LA PREMIERE SECTION	135
2. ECONOMIE ECOLOGIQUE ET CROISSANCE ECONOMIQUE : D'UN PARADIGME ALTERNATIF A UNE NOUVELLE SYNTHESE AVEC LA THEORIE NEOCLASSIQUE ?	138
2.1. LA THERMODYNAMIQUE COMME FONDEMENT DU NOUVEAU PARADIGME BIOECONOMIQUE CHEZ GEORGESCU-ROEGEN	138
2.2. LA THEORIE NEO-THERMODYNAMIQUE DE LA CROISSANCE : UNE CRITIQUE INTERNE DE LA THEORIE NEOCLASSIQUE PAR L'ECONOMIE ECOLOGIQUE	143
2.3. LA THEORIE NEO-THERMODYNAMIQUE A L'EPREUVE DE LA CONTROVERSE DES DEUX CAMBRIDGE	151
2.3.1. ENJEUX EPISTEMOLOGIQUES AUTOUR DES FONCTIONS DES PRODUCTIONS AGREGES	151
2.3.2. LES REPONSES DE LA THEORIE NEO-THERMODYNAMIQUE A LA CONTROVERSE DES DEUX CAMBRIDGE	157
CONCLUSION DE LA DEUXIEME SECTION	161
3. .. DES IMPASSES DE L'USAGE DE FONCTION DE PRODUCTION AGREGEE A LEUR DEPASSEMENT : UNE EXPLORATION DES ALTERNATIVES.....	162
3.1. L'EXERGIE UTILE COMME MESURE DE LA PRODUCTION PHYSIQUE AGREGEE.....	163
3.2. CALCULER UN RATIO DE DEPENDANCE ENTRE LA PRODUCTION PHYSIQUE ET L'ENERGIE	166
3.3. ARTICULER LA REALITE MONETAIRE ET REALITE PHYSIQUE : UNE TYPOLOGIE DES DIFFERENTES APPROCHES	169
CONCLUSION DE LA TROISIEME SECTION	176
CONCLUSION DU CHAPITRE 2 : LA NECESSITE D'ABANDONNER LE CADRE STANDARD ET DE SE TOURNER VERS D'AUTRES PARADIGMES.....	177

CHAPITRE 3. L'APPROCHE PAR LE SURPLUS. UNE ANALYSE DES PROPOSITIONS NEOPHYSIOCRATIQUES ET CLASSIQUES QUANT AU ROLE DE L'ENERGIE DANS LE PROCESSUS DE CROISSANCE.	182
INTRODUCTION DU CHAPITRE 3	183
1. LA THEORIE PHYSIOCRATIQUE : LE SURPLUS ENERGETIQUE COMME CONDITION DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE	185
1.1. LA MESURE DU SURPLUS : DU PRODUIT NET A L'ENERGIE NETTE	186
1.1.1. LES PHYSIOCRATES : L'AGRICULTURE, SOURCE DU PRODUIT NET	186
1.1.2. LES NEO-PHYSIOCRATES : DE L'ENERGIE NETTE AU EROI	192
CONCLUSION DE LA SECTION 1.1.	204
1.2. DE L'ENERGIE NETTE AU PIB : L'ANALYSE DE LA CROISSANCE ECONOMIQUE	204
1.2.1. LE CANAL DU PRIX DE L'ENERGIE : QUAND LE EROI RALENTIT LA CROISSANCE	205
1.2.2. LA THEORIE DE LA VALEUR-ENERGIE	216
CONCLUSION DE LA PREMIERE SECTION	229
2. LE PARADIGME CLASSIQUE : LE ROLE DETERMINANT DE L'ENERGIE DANS LA FORMATION DU TAUX DE PROFIT ET LA DYNAMIQUE D'ACCUMULATION DU CAPITAL	231
2.1. UNE DISTINCTION RIGOUREUSE ENTRE MONDE PHYSIQUE ET MONDE MONETAIRE : DE L'IMPORTANCE DES CONCEPTS DE VALEUR ET DE RICHESSE	232
2.1.1. LE MONDE PHYSIQUE : LE TRAVAIL ET LA NATURE COMME SOURCES DE LA RICHESSE MATERIELLE	232
2.1.2. LE MONDE MONETAIRE : LA VALEUR COMME PRODUIT DES RAPPORTS SOCIAUX MARCHANDS	234
2.2. L'ARTICULATION ENTRE MONDE PHYSIQUE ET MONDE MONETAIRE : LE TRAVAIL INCORPORE COMME DETERMINANT DU PRIX RELATIF DES MARCHANDISES	237
2.2.1. L'ABSTRACTION DU TRAVAIL ABSTRAIT LORS DE L'ECHANGE	239
2.2.2. DES REGULARITES DANS LA QUANTITE DE TRAVAIL ABSTRAIT	241
2.3. LA VALIDITE DE LA VALEUR TRAVAIL EN DEBAT : PRIX DE PRODUCTION ET ESTIMATIONS EMPIRIQUES	247
2.3.1. DES VALEURS TRAVAIL AUX PRIX DE PRODUCTION : LE PROBLEME DE LA TRANSFORMATION	248

2.3.2. TESTER LA VALEUR TRAVAIL : EVALUATIONS EMPIRIQUES DE LA DIVERGENCE ENTRE PRIX ET VALEURS TRAVAIL	253
2.4. MODELISER LE ROLE DE L'ENERGIE DANS LA CROISSANCE A PARTIR DES VALEURS TRAVAIL ...	259
CONCLUSION DE LA DEUXIEME SECTION.	266
CONCLUSION DU CHAPITRE 3 : LE BESOIN DE TRAVAUX EMPIRIQUES SUPPLEMENTAIRES SUR LES CANAUX DE TRANSMISSION	268
<u>CHAPITRE 4 MESURER LA CONTRIBUTION DE L'ENERGIE À L'ACCUMULATION DU CAPITAL : UNE EVALUATION EMPIRIQUE DU CANAL DU TAUX DE PROFIT.....</u>	271
INTRODUCTION DU CHAPITRE 4	273
1. CONSTRUCTION ET ANALYSE DESCRIPTIVE DES DONNEES	281
1.1. LE PRIX RELATIF DE L'ENERGIE (PR_NRJ)	282
1.2. LE TAUX DE PROFIT (PROFITRATE)	286
1.3. LE TAUX D'EXPLOITATION (EXPL)	289
1.4. LA COMPOSITION TECHNIQUE DU CAPITAL (CTC)	290
2. PRESENTATION DE LA METHODE : CHOIX DES MODELES ET DES ESTIMATEURS.....	292
2.1. STATIONNARITE DES VARIABLES	293
2.2. LE CHOIX DE L'EQUATION ECONOMETRIQUE UTILISEE	294
2.3. LES DIFFERENTS ESTIMATEURS RETENUS.....	296
3. RESULTATS ECONOMETRIQUES : L'EXISTENCE D'UN CANAL DU TAUX DE PROFIT	298
3.1. RESULTATS ET TESTS COMPLEMENTAIRES	298
3.2. INTERPRETATION DES RESULTATS	303
CONCLUSION DES SECTIONS 1, 2 ET 3	305
4. DU TAUX DE PROFIT AU TAUX D'ACCUMULATION : UNE REFLEXION A PARTIR DES TRAVAUX POST-KEYNESIENS	308
4.1. LE PROFIT COMME SOURCE DE L'ACCUMULATION DE CAPITAL.....	309
4.2. LA LOI DE KALECKI : LE TAUX D'ACCUMULATION COMME SOURCE DE REALISATION DU TAUX DE PROFIT	313
4.2.1. LA LOI DE REALISATION DES PROFITS DE KALECKI : UN EXEMPLE A PARTIR DES BILANS COMPTABLES.....	314

4.2.2. LES AUTRES SOURCES DE PROFIT COMPTABLE : LA LOI DE KALECKI ETENDUE	317
4.3. ARTICULATION DE CES DEUX REPRESENTATIONS ET ROLE DE L'ENERGIE DANS L'ACCUMULATION	322
CONCLUSION DU CHAPITRE 4 : VERS UN MODELE DE CROISSANCE POSTCLASSIQUE INTEGRANT LE ROLE DE L'ENERGIE	325
CONCLUSION GENERALE	329
BIBLIOGRAPHIE GENERALE	337
LISTE DES TABLEAUX	359
LISTE DES FIGURES	363
LISTE DES ACRONYMES	367
TABLE DES MATIERES GENERALE	371

Titre : Le découplage entre la consommation d'énergie et le PIB : questionnements théoriques et évaluations empiriques du rôle de l'énergie dans le processus de croissance économique

Mots clés : énergie, croissance économique, découplage, théorie de la valeur, économie écologique

Résumé : Cette thèse étudie la possibilité d'un découplage absolu entre la consommation d'énergie et la croissance économique. Elle se compose de quatre chapitres. Le chapitre 1 dresse un bilan critique des principales méthodes utilisées pour apprécier l'existence du découplage absolu et conclut à la nécessité d'étudier le rôle joué par l'énergie dans le processus de croissance économique. Aussi, les chapitres 2 et 3 sont-ils consacrés à l'analyse des théories de la croissance. Le chapitre 2 traite du cadre néoclassique. Il examine la proposition d'une partie de l'économie écologique d'intégrer les lois de la thermodynamique aux fonctions de production agrégée. Le chapitre 3 porte son analyse sur les courants néo-physiocratiques et classiques.

Il évalue la capacité de leurs théories de la valeur respectives (valeur-énergie et valeur-travail) à articuler correctement les dimensions physiques et monétaires de la production. Sur cette base, il compare la manière qu'ont ces deux modélisations de la croissance de faire apparaître les contraintes énergétiques. Enfin, le chapitre 4 propose une exploration empirique du cadre classique. A partir de données de panel portant sur la période 1995-2019, il vérifie l'existence d'un canal du taux de profit en testant la significativité des variations du prix relatif de l'énergie sur le taux de profit. Ce travail économétrique est complété par une discussion des travaux postkeynésiens quant à la relation entre profit et accumulation du capital.

Title : The decoupling of energy consumption from GDP: theoretical issues and empirical assessments of the role of energy in the economic growth process

Keywords : energy, economic growth, decoupling, value theory, ecological economics

Abstract : This thesis studies the possibility of an absolute decoupling between energy consumption and economic growth. It consists of four chapters. Chapter 1 critically reviews the main methods used to assess the existence of absolute decoupling and concludes that it is necessary to study the role played by energy in the economic growth process. Chapters 2 and 3 are therefore devoted to the analysis of growth theories. Chapter 2 deals with the neoclassical framework. It examines the proposal of a part of ecological economics to integrate the laws of thermodynamics into aggregate production functions. Chapter 3 focuses on the neo-physiocratic and classical schools of thought.

It assesses the ability of their respective theories of value (energy-value and labor-value) to correctly articulate the physical and monetary dimensions of production. On this basis, it compares the way in which these two models of growth reveal energy constraints. Finally, Chapter 4 proposes an empirical exploration of the classical framework. Using panel data for the period 1995-2019, it verifies the existence of a profit rate channel by testing the significance of changes in the relative price of energy on the profit rate. This econometric work is completed by a discussion of post-Keynesian work on the relationship between profit and accumulation.