

UNIVERSITÉ PARIS-13

École doctorale Érasme

Unité de recherche Centre d'Économie de Paris-Nord (UMR CNRS 7234-CEPN)

Thèse présentée par **Louison CAHEN-FOUROT**

Soutenue le **13 octobre 2017**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université Paris-13

Discipline **Sciences économiques**

La soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes

Une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte

Thèse dirigée par Cédric DURAND directeur
Marc LAVOIE co-directeur

Composition du jury

<i>Rapporteurs</i>	Franck-Dominique VIVIEN	professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne	
	Edwin LE HÉRON	professeur à Sciences Po Bordeaux	
<i>Examineurs</i>	Pascale COMBES MOTEL	professeure au CERDI – Université d'Auvergne	présidente du jury
	Hélène TORDJMAN	MCF HDR à l'Université Paris-13	
	Éloi LAURENT	économiste senior à l'OFCE – Sciences Po Paris	
<i>Directeurs de thèse</i>	Cédric DURAND	MCF HDR à l'Université Paris-13	
	Marc LAVOIE	professeur à l'Université d'Ottawa et Université Paris-13	

UNIVERSITÉ PARIS-13

École doctorale Érasme

Unité de recherche Centre d'Économie de Paris-Nord (UMR CNRS 7234-CEPN)

Thèse présentée par **Louison CAHEN-FOUROT**

Soutenue le **13 octobre 2017**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université Paris-13

Discipline **Sciences économiques**

La soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes

Une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte

Thèse dirigée par Cédric DURAND directeur
Marc LAVOIE co-directeur

Composition du jury

<i>Rapporteurs</i>	Franck-Dominique VIVIEN	professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne	
	Edwin LE HÉRON	professeur à Sciences Po Bordeaux	
<i>Examineurs</i>	Pascale COMBES MOTEL	professeure au CERDI – Université d'Auvergne	présidente du jury
	Hélène TORDJMAN	MCF HDR à l'Université Paris-13	
	Éloi LAURENT	économiste senior à l'OFCE – Sciences Po Paris	
<i>Directeurs de thèse</i>	Cédric DURAND	MCF HDR à l'Université Paris-13	
	Marc LAVOIE	professeur à l'Université d'Ottawa et Université Paris-13	

UNIVERSITÉ PARIS-13

Doctoral School Érasme

University Department **Centre d'Économie de Paris-Nord** (UMR CNRS 7234-CEPN)

Thesis defended by **LOUISON CAHEN-FOUROT**

Defended on **13th October, 2017**

In order to become Doctor from Université Paris-13

Academic Field **Economics**

The sustainability of capital accumulation and its regimes

A strong sustainability macroeconomic approach

Thesis supervised by Cédric DURAND Supervisor
Marc LAVOIE Co-Supervisor

Committee members

<i>Referees</i>	Franck-Dominique VIVIEN	Professor at Université de Reims Champagne Ardenne	
	Edwin LE HÉRON	Professor at Sciences Po Bordeaux	
<i>Examiners</i>	Pascale COMBES MOTEL	Professor at CERDI – Université d'Auvergne	Committee President
	Hélène TORDJMAN	HDR Associate Professor at Univer- sité Paris-13	
	Éloi LAURENT	senior economist at OFCE – Sciences Po Paris	
<i>Supervisors</i>	Cédric DURAND	HDR Associate Professor at Univer- sité Paris-13	
	Marc LAVOIE	Professor at Université d'Ottawa et Université Paris-13	

L'Université Paris-13 n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions devront être considérées comme propres à leurs auteurs.

Mots clés: économie écologique, économie post-keynésienne, éco-marxisme, école de la régulation, macroéconomie écologique, carbone, capitalisme, régime d'accumulation, fordisme, néolibéralisme, soutenabilité forte, énergie

Keywords: ecological economics, post-keynesian economics, eco-marxism, régulation school, ecological macroeconomics, carbon, capitalism, accumulation regime, fordism, neoliberalism, strong sustainability, energy

Cette thèse a été préparée au

**Centre d'Économie de Paris-Nord (UMR CNRS 7234-
CEPN)**

Université Paris-13
99 avenue Jean-Baptiste Clément
93430 Villetaneuse
France

☎ 01 49 40 32 55 / 01 49 40 35 27

📠 01 49 40 20 83

✉ cepn-secretariat@univ-paris13.fr

Site <https://cepn.univ-paris13.fr/>



J'ai souvent éprouvé un sentiment d'inquiétude, à des carrefours. Il me semble dans ces moments qu'en ce lieu ou presque : là, à deux pas sur la voie que je n'ai pas prise et dont déjà je m'éloigne, oui, c'est là que s'ouvrirait un pays d'essence plus haute, où j'aurais pu aller vivre et que désormais j'ai perdu. Pourtant, rien n'indiquait ni même ne suggérait, à l'instant du choix, qu'il me fallût m'engager sur cette autre route.

Yves Bonnefoy, *L'arrière-Pays*

Toute la terre habitable a été de nos jours reconnue, relevée, partagée entre des nations. L'ère des terrains vagues, des territoires libres, des lieux qui ne sont à personne, donc l'ère de libre expansion, est close. Plus de roc qui ne porte un drapeau ; plus de vides sur la carte ; plus de région hors des douanes et hors des lois ; plus une tribu dont les affaires n'engendrent quelque dossier et ne dépendent, par les maléfices de l'écriture, de divers humanistes lointains dans leurs bureaux. Le temps du monde fini commence.

Paul Valéry, *Regards sur le monde actuel*

Une génération ne peut assujettir à ses lois les générations futures.

Article 28, *Constitution du 24 juin 1793*

LA SOUTENABILITÉ DE L'ACCUMULATION DU CAPITAL ET DE SES RÉGIMES
Une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte

Résumé

Le sujet de la présente thèse est *La soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes : une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte*. Elle s'articule en deux parties. Deux chapitres composent la première : le chapitre 1 s'inscrit dans le débat sur la possibilité d'un capitalisme stationnaire. Il analyse l'absence des rapports sociaux spécifiques du capitalisme dans les travaux de certains économistes écologiques au moyen d'exemples historiques de crise écologique et des théories éco-marxistes. Le chapitre 2 discute les analyses monétaires de certains économistes écologiques selon lesquelles un état stationnaire est incompatible avec un système dans lequel la monnaie est créée comme une dette portant intérêt en adoptant un point de vue post-keynésien. La deuxième partie est plus empirique et se compose de trois chapitres. Le chapitre 3 examine la relation sociale à l'énergie au sein du régime d'accumulation fordiste et du capitalisme financiarisé et mondialisé. L'approche en termes d'exergie est intégrée à un cadre théorique régulationniste informé par l'approche en termes de démocratie carbone. L'objectif est d'identifier des ruptures dans les modalités d'usage de l'énergie qui accompagnent les transformations observées dans d'autres domaines. Le chapitre 4 prolonge le précédent au moyen d'une analyse économétrique de la relation PIB-CO2 pour la France de 1950 à 2013 en tenant compte de la rupture dans les régularités de l'accumulation du capital entre le régime d'accumulation fordiste et le régime d'accumulation néolibéral ainsi que des possibles asymétries. Le chapitre 5 analyse les ambitions nationales en matière de réduction de gaz à effet de serre, dénommées *volontarisme carbone*, replacées dans le contexte du capitalisme globalisé et financiarisé contemporain.

Mots clés : économie écologique, économie post-keynésienne, éco-marxisme, école de la régulation, macroéconomie écologique, carbone, capitalisme, régime d'accumulation, fordisme, néolibéralisme, soutenabilité forte, énergie

THE SUSTAINABILITY OF CAPITAL ACCUMULATION AND ITS REGIMES
A strong sustainability macroeconomic approach

Abstract

The subject of my PhD is *The sustainability of capital accumulation and its regimes: a strong sustainability macroeconomic approach*. It is composed of two parts. The first one is composed of two chapters that review the literature on two aspects: The first chapter tackles the debate on stationary capitalism. It reviews the way capitalism is taken into account by ecological economists and analyzes it in light of historical examples of ecological crises and of insights from eco-marxist theories. Chapter 2 tackles the debate about the so-called monetary growth imperative analysed from a post-Keynesian point of view. The second part is a more empirical one and is composed of three chapters. Chapter 3 attempts at framing the exergy-useful work approach into a régulationnist theoretical framework informed with insights from the Carbon democracy approach. It investigates the social relationship to energy in the Fordist and Neoliberal accumulation regimes. The fourth chapter attempts at furthering the third chapter by investigating the CO2 - GDP relationship through econometric means taking into account structural breaks between accumulation regimes and possible asymmetries. Chapter 5 investigates the commitment of countries to reduce their greenhouse gas emissions within the context of globalized finance-led capitalism.

Keywords: ecological economics, post-keynesian economics, eco-marxism, régulation school, ecological macroeconomics, carbon, capitalism, accumulation regime, fordism, neoliberalism, strong sustainability, energy

Remerciements ¹

Le moment que chaque doctorant-e attend est arrivé pour moi, celui pour lequel chacun-e entame une thèse de doctorat... Je peux, enfin, écrire mes remerciements !

Les premiers vont, bien sûr, à mes directeurs de thèse, Cédric Durand et Marc Lavoie. Pour m'accompagner dans cette aventure, il était particulièrement important, à mes yeux, d'avoir deux personnes qui représentaient chacune l'une des deux approches qui m'ont le plus structuré intellectuellement depuis ma première année de master. J'eus bien plus que cela : des conseils et des échanges extrêmement enrichissants, une relation chaleureuse, un soutien sans faille ainsi qu'un intérêt constant pour mon travail. Pendant ces cinq années j'ai mesuré à quel point la direction de thèse était importante dans la réussite et l'épanouissement du thésard. Je ne sais pas très bien si je fus un doctorant intéressant ou facile à diriger mais, pour ma part, je mesure la chance que j'eus de les avoir pour directeur et co-directeur. J'associe à ces remerciements Jacques Mazier qui fut mon directeur de mémoire de M2, lequel marqua la première pierre de cette aventure.

Je dois également remercier toutes celles et ceux qui ont contribué à cette thèse par leurs remarques, leurs conseils et leurs réponses à des moments divers : Antonia López-Villavicencio, Jean-Marie Harribey, Robert Guttman, Mathieu Montalban, Pascal Petit, Julien Vauday, Sy-Hoa Ho, Matteo Cavallaro, Lucas Chancel, Matthew Greenwood-Nimmo, Jorge Eduardo Pérez Pérez, Peter Victor, Giuseppe Fontana, Steven Pressman, les membres du tout nouveau *Postgrowth Economics Network* et les participant-e-s des diverses conférences auxquelles j'ai eu la chance de participer.

Je remercie aussi Denis Bitouzé, sans qui cette thèse n'existerait pas, littéralement : il est l'auteur de la classe de thèse yathesis sur L^AT_EX qui reprend toutes les recommandations du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Cette classe de thèse offre un confort de travail sans égal qui permet de se concentrer sur l'écriture sans devoir s'inquiéter de la mise en page et des détails typographiques. Merci Denis de mettre ainsi ton expertise en L^AT_EX à la disposition de tous les doctorants et de venir, chaque année, former les étudiants de Paris-13 à ce logiciel.

Il me faut, d'une manière générale, adresser un salut chaleureux à tous les collègues, enseignants-chercheurs et administratifs (Corinne Gauthier, Pierre Depardieu et Jean-Pierre Kokossou) du Centre d'Économie de Paris-Nord, laboratoire unique en France qui perpétue bon an, mal an, l'existence d'une diversité d'approches en économie. Faire partie de ce laboratoire, où l'on considère les doctorants comme des membres à part entière avec notamment d'excellentes conditions de travail, fut un atout extrêmement précieux.

Paris-13 ce n'est pas que le CEPN, c'est aussi le personnel administratif de l'UFR, c'est aussi le service culturel. Ce service culturel qui permit de merveilleuses rencontres grâce à Annie Selem (et toute son équipe !) qui nous emmena au spectacle, nous fit plonger dans le monde magique du festival d'Avignon et donna un charme particulier à ces années à Paris-13, travaillant infatigablement à amener la culture aux étudiants de la fac du 93.

Je dois aussi saluer mes collègues de Paris-3 où je fus deux ans ATER : Nicolas Prokovas, Patrick

1. Qui sait ? Chaque personne citée dans ces remerciements a, peut-être, une dédicace cachée quelque part dans la thèse qui lui est destinée. Pour le savoir, il suffit de la lire en entier.

Dieuaide, Violaine Delteil ainsi que la bande des chargés de TD de Commerce international et Suzanne Rodin pour son aide précieuse pour toutes les joyeusetés de la vie universitaire.

Enfin, j'ai une pensée particulière pour tous mes étudiants de la L1 à la L3 de Paris-13 et Paris-3 à qui j'ai eu le plaisir d'enseigner pendant cinq ans. Ce fut une source d'aération de l'esprit en même temps qu'un excellent moyen pour moi de devenir meilleur économiste car expliquer aux autres est un bon moyen de parvenir à une meilleure compréhension de sa discipline. J'espère leur avoir apporté autant qu'eux m'auront apporté.

Ces cinq années n'auraient pas été aussi épanouissantes si nous n'avions pas, à Paris-13, une bande de doctorant-e-s joyeux et solidaires qui allégèrent moments de doute et tentations de renoncement en même temps qu'il devinrent des amis et des fidèles compagnons de fête. Comme je travaille lentement, j'ai eu la chance d'en connaître beaucoup : Raquel qui ramène de la cachaça, Fede le Totti de l'hystérèse qui refuse d'admettre que les pizzas base crème fraîche sont les meilleures (tu diras à Livia que c'est maintenant ou jamais pour me répondre), Serge qui connaît autant de bars bon marché qu'il y a d'équations dans ses modèles, Ludwig dont la prestance viennoise n'a d'égale que son aisance à la salsa, Idir qui croit toujours que Zidane est kabyle, Jamel, Léonard « coucou », Sy Hoa grâce à qui je sais que l'on dit « chocolatine » jusqu'au Vietnam, Abdessamad, Nader, Hamed, Yves, Maria, Nicolas un sociologue qui sent le pastis, Alexis un sociologue qui aime Poitiers (*Poitiers*), Victor sociologue et fils du directeur, Simona Simsim ma voisine, Félix « c'est un vieux débat entre opéraïstes de différents courants », Ana Sofia la pourvoyeuse en chef de bonbons, Jeff « les chaussures c'est superflu », Kawtar, Fouad, Besiana, Alex « la thèse est une fête », Catherine, Yasemin, Adriano, Ana Carolina, Joël, Fernanda, Esther, Matteo le juventini, Marcello, Ana « quel est ton cadre théorique ? », Benjamin « n'oublie pas l'apport de Mandel sur les chocs exogènes pour démarrer les phases ascendantes », Steven, Cristiano, Italo, Lidia, Antoine « viens manger un bout de chèvre à Saint-Denis »...

Je remercie aussi Aurore Lalucq de *l'Institut Veblen pour les réformes économiques*, pour l'intérêt constant qu'elle a témoigné à l'égard de mon travail, pour m'avoir donné l'opportunité d'intervenir dans plusieurs séminaires de l'institut, pour les nombreux livres qu'elle m'a donnés et pour avoir disséminé mon nom de-ci de-là.

Comme il n'y a pas que la fac dans la vie, mes parents, Michel et Dominique, furent l'autre pilier de cette aventure. Par construction, rien de tout cela n'aurait été possible sans eux. Surtout, j'ai la chance extraordinaire de venir d'une famille où l'on croit à la valeur du savoir pour lui-même, où prendre le temps d'accomplir son cheminement intellectuel est une fin en soi, où les études ne sont pas vues au prisme du métier auquel elles devront mener, où entamer une thèse n'est pas considéré comme un moyen de repousser l'entrée dans la « vraie » vie. J'ai mesuré chaque jour le privilège que cela constituait sur tous les plans. Ils m'ont été, aussi, d'une aide précieuse dans la dernière ligne droite, relisant et corrigeant patiemment chaque ligne de cette thèse².

Mais il n'y a pas que mes parents. Il y a aussi ma petite soeur, Milèna, qui fut la complice de mon évolution personnelle au cours de ces cinq années et cela, malgré les tics de langage étranges qu'elle a adoptés depuis sa traversée de l'Atlantique.

Il n'y a pas que la famille. Il y a aussi tous les copains et les copines hors la fac qui firent que mon cerveau ne devint pas (complètement) un vieux disque rayé tournant en boucle sur la thèse. Il m'est impossible de citer tout le monde ici, mais quelques un-e-s vécurent ma thèse de près.

Il y a ceux de Bordeaux : Léo qui croit qu'après 20,9 il y a 30, Romain qui pense que la géographie c'est de la science alors que c'est juste du coloriage, Tony qui sème la permaculture et ses téléphones portables, Julien qui a toujours plein de choses à faire, Malefond dit « champion » allez savoir pourquoi, Yoann qui cède au chant des sirènes, Sam qui connaît mes pires secrets de danseur, Sofia qui trouve des dinosaures ou des australopithèques ou des gens d'avant 'fin qui trouve des trucs quoi, Laura qui vit ce qu'est un thésard en pleine crise existentielle sur sa thèse, Jason « Fred » Statham etc.

2. Bien sûr, je suis le seul responsable des éventuelles coquilles qui auraient survécu à la relecture !

Il y a les Parisiens de naissance ou d'adoption : Sophie qui est à la publicité pour Gradignan ce que Trotsky est à la Révolution, Manu qui est aux falafels ce que Cheikh Diabaté fut à l'attaque des Girondins, Sarah qui fait des bons gâteaux, Mark qui est à l'accent anglo-saxon ce que Keynes est à l'économie, Marion qui m'a permis d'ajouter une élégance physique certaine à mon cheminement intellectuel en me faisant découvrir la gym suédoise, Julie grâce à qui j'ai découvert les granges du Nord profond, Prune qui partagea avec moi un FC Évian-Thonon-Gaillard - FC Girondins de Bordeaux au stade de France (oui oui), Léone et sa bonhomie légendaire, Math qui me donna de la force en croyant à mon sujet comme personne, allant jusqu'à affronter avec moi les turpitudes des déclarations des pays pour la COP21 et bien plus encore, Claire et Julien avec qui la complicité née dans quelques contrées nordiques a traversé les ans et les pays (ils savent), Barbara la seule hollandaise sociable (d'après elle), Léa grâce à qui j'ai pu me préparer à la fin de thèse en vivant la sienne, Ikram perchée dans les châteaux d'Ouganda, Ambroise qui est pour le communisme et pour le PSG (non, rien), Sonia qui chante et qui joue, Anya ma complice, Léa ma coloc' avec qui nous avons partagé chaque étape de ma thèse et de la sienne etc.

Il y a les anciens Clermontois : Pierrick qui ne m'a toujours pas remercié de lui avoir trouvé une copine, Estelle-les-deux-marathons, Yves&Marine « c'était la dernière séance », Aurore qui vécut avec moi les prémisses de l'aventure, Hervé qui tente les dreads (aux dires de sa maman) etc.

Il y a les copains et les copines connus dans mes maigres activités militantes ces dernières années : Max « viens juste boire un pastis inversé », Serge « je te ramène une saucisse de Morteau ? », Arthur « Considérations épistémologiques et pratiques de terrain » et tous les copains et les copines de *Pour un Enseignement Pluraliste dans le Supérieur en Économie* (PEPS-Économie) et de *International Student Initiative for Pluralism in Economics* (ISIPE) qui ont été une source d'enrichissement et de réflexion absolument unique. Il y a aussi Camille « manif&gym suédoise », Antoine l'insoumis et les copains et copines d'ANPE etc.

Et puis, *last but not least*, il y a Lily qui découvre petit à petit qu'un thésard est un être à peu près normal, qui remet à jour mon vocabulaire et qui, surtout, fait des derniers instants de ma thèse une période si spéciale...

Sommaire

Résumé	xv
Remerciements	xvii
Sommaire	xxi
Liste des tableaux	xxiii
Table des figures	xxvii
À l'ère du monde fini	1
I Capital, monnaie, soutenabilité : une discussion critique de l'Économie écologique	19
Introduction à la première partie	21
1 Le capitalisme et la soutenabilité : une critique éco-marxiste de l'Économie écologique	23
2 La monnaie et la croissance : une critique post-keynésienne de l'Économie écologique	53
Conclusion de la première partie	67
II Dynamiques du capital, de l'énergie et du carbone entre régimes d'accumulation et capitalismes contemporains	71
Introduction à la deuxième partie	73
3 Le rapport social à l'énergie du fordisme au capitalisme néolibéral : une étude empirique et macroéconomique comparée dans les pays riches (1950-2010)	75
4 Carbone et régimes d'accumulation : rupture et asymétries dans la relation PIB-CO2 entre fordisme et néolibéralisme	99
5 <i>Volontarismes carbone</i> et capitalismes contemporains	139
Conclusion de la deuxième partie	159

Embrasser le monde fini	161
Bibliographie	169
A Annexe au chapitre 2 : équations intermédiaires	185
B Annexe au chapitre 3 : tests de rupture structurelle	187
C Annexe au chapitre 4 : régressions complémentaires	193
D Annexe au chapitre 5 : données, analyse en composantes principales et classification	199
E Macroéconomie écologique à l'ère du capitalisme financiarisé : une proposition de modélisation	217
Table des matières	229

Liste des tableaux

1.1	EROI par type d'énergie.	49
2.1	Positions de certains économistes écologiques quant à l'existence d'un impératif à la croissance émanant des sphères réelles et monétaires et comparaison avec notre propre position.	67
3.1	Définition des différentes variables énergétiques.	84
3.2	Mesure des variables en approches production et consommation.	86
3.3	Croissance annuelle moyenne de la quantité d'exergie entre 1950 et 2009.	88
3.4	Croissance annuelle moyenne de la productivité du <i>travail utile</i> entre 1950 et 2009.	89
3.5	Part des émissions de CO2 importées (net des émissions exportées) dans les émissions totales de CO2 induites par la demande finale (approche consommation) en 1970 et 2010, en pourcentage.	90
3.6	Part du CO2 importé dans les émissions totales de CO2 induites par la demande finale en 2009 pour différentes bases input-output, en pourcentage.	90
3.7	Croissance annuelle moyenne en pourcentage de la productivité du travail entre 1950 et 2015.	93
4.1	Variables, données et sources.	111
4.2	Tests de racine unitaire.	112
4.3	Tests de racine unitaire pour les variables en différence.	112
4.4	Tests de rupture structurelle à date inconnue.	114
4.5	Tests de Wald sur la symétrie des coefficients de long terme (W_{l-t}) et de court terme (W_{c-t}).	115
4.6	Récapitulatif des meilleurs modèles en termes de symétrie et d'asymétrie des coefficients.	115
4.7	Résultats de la régression avec le CO2 en approche production.	117
4.8	Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche production.	118
4.9	Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche production.	118
4.10	Résultats pour la régression avec CO2 en approche production et le prix du pétrole comme variable de contrôle.	119
4.11	Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche production et le prix du pétrole en variable de contrôle.	120
4.12	Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche production et le prix du pétrole en variable de contrôle.	120
4.13	Résultats de la régression avec le CO2 en approche consommation.	121
4.14	Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche consommation.	121
4.15	Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche consommation.	122
4.16	Résultats de la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle.	123

4.17	Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle.	123
4.18	Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle.	124
4.19	Tests de normalité des résidus de Shapiro-Wilk et de la <i>skewness</i> et de la <i>kurtosis</i>	124
4.20	Synthèse des résultats par spécifications et périodes pour les variables de PIB.	132
4.21	Sens de la relation entre le PIB et les émissions de CO2	133
4.22	Synthèse des valeurs des coefficients pour le terme à correction d'erreur et les variables de PIB à toutes les périodes pour les spécifications avec le CO2 en approche production. . .	135
4.23	Synthèse des valeurs des coefficients pour le terme à correction d'erreur et les variables de PIB à toutes les périodes pour les spécifications avec le CO2 en approche consommation. . .	135
5.1	Moyennes des objectifs de réduction d'émission de GES déclarés pour la COP21.	142
5.2	Variables et sources.	149
5.3	Résultats de la classification, valeurs moyennes et écart-types des variables pour chaque classe et pour l'échantillon total.	154
5.4	Résultats de la classification, valeurs moyennes et écart-types des variables pour chaque classe et pour l'échantillon total (suite)	154
5.5	Caractérisation des <i>volontarismes carbone</i> en fonction du taux de réduction d'émission de référence pour chaque classe selon le GIEC.	156
5.6	Synthèse du chapitre 4.	160
5.7	Résumé des résultats du chapitre 5.	160
5.8	Tests de causalité entre l'efficacité thermodynamique et la productivité horaire (EU15 1960-2009)	165
B.1	Tests de Wald (W_i) et de maximum de vraisemblance (L_i) de rupture structurelle à date inconnue.	189
B.2	Suite des tests de rupture structurelle à date inconnue.	190
B.3	Synthèse des résultats des tests de rupture structurelle	191
B.4	Propriétés des séries du ratio énergie / PIB utilisée, test d'autocorrélation et coefficient de détermination de l'estimation.	191
C.1	Tests de racine unitaire pour $co2int$	195
C.2	Tests de racine unitaire pour $\Delta co2int$	195
C.3	Tests de rupture structurelle à date inconnue pour la période 1951-2013 et la spécification avec le CO2 en approche production, l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole.	196
C.4	Tests de Wald sur la symétrie des coefficients de long terme (W_{l-t}) et de court terme (W_{c-t}).	196
C.5	Régressions pour les spécifications avec l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole.	197
C.6	Tests de diagnostic pour les spécifications avec l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole.	197
D.1	Données brutes pour l'analyse en composantes principales et la classification par classe puis ordre alphabétique.	200
D.2	Données brutes pour l'analyse en composantes principales et la classification par classe puis ordre alphabétique (suite).	201
D.3	Valeurs propres, pourcentages de variance et pourcentages de variance cumulatifs des axes factoriels (composantes)	202
D.4	Coordonnées et contributions des variables aux axes.	202

D.5	Cosinus carrés et sommes des cosinus carrés des variables.	203
D.6	Coordonnées et contributions des pays aux axes.	206
D.7	Cosinus carrés et sommes des cosinus carrés des pays.	207
D.8	Matrice des corrélations de Pearson.	210
D.9	Matrice des corrélations de Pearson (suite).	210
D.10	Caractérisation des classes en termes des axes factoriels obtenus par l'analyse en composantes principales.	210
D.11	Valeurs-test de la classification.	211
D.12	Valeurs-test de la classification (suite).	211
D.13	Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (1/3).	211
D.14	Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (2/3).	212
D.15	Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (3/3).	213
D.16	Calcul du taux de référence d'après le scénario RCP2.6 du GIEC et comparaison avec les <i>volontarismes carbone</i> (1/2).	215
D.17	Calcul du taux de référence d'après le scénario RCP2.6 du GIEC et comparaison avec les <i>volontarismes carbone</i> (2/2).	216
E.1	Matrice des stocks	227
E.2	Matrice des flux	227

Table des figures

1	Émissions mondiales de gaz à effet de serre et de CO2 de 1970 à 2016	3
2	Parts de l'énergie fossile et de l'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie mondiale de 1970 à 2014 (année la plus récente disponible).	4
3	Inspirations théoriques de la thèse.	13
1.1	Consommation totale d'énergie de l'Angleterre, de l'Allemagne et de la France de 1800 à 1900.	29
1.2	Émissions de CO2 du Royaume-Uni (depuis 1751), de l'Allemagne (depuis 1792) et de la France (depuis 1810) pendant la Révolution industrielle.	29
1.3	Production industrielle par secteur en Grande-Bretagne de 1730 à 1830; base 100 en 1780.	32
1.4	Consommation intérieure de matières en millions de tonnes.	42
1.5	Indice EROI pour le charbon, le pétrole et le gaz de 1800 à 2012.	50
1.6	Taux de rendement énergétique du capital investi pour les États-Unis de 1861 à 2014.	51
2.1	Complétion possible du cadre épistémologique de l'Économie écologique.	68
3.1	Intensité du PIB en énergie.	77
3.2	Total des émissions de CO2 pour les cinq pays mesurées en approches production et consommation (milliers de tonnes, 1950-2011).	91
3.3	Moyenne géométrique de l'intensité du PIB en CO2 mesurée en approches consommation et production pour les cinq pays de 1950 à 2011 (milliers de tonnes de carbone par millions de dollars à prix 2014).	92
3.4	Taux de croissance annuels moyens sur 5 ans de la quantité d'exergie et de la productivité du travail entre 1950 et 2009.	94
3.5	Part du capital en pourcentage de la valeur ajoutée (1960-2014) mesurée au coût des facteurs.	94
3.6	CO2 importé (en % des émissions totales en approche consommation) et part du capital (en % de la valeur ajoutée) entre 1970 et 2011.	95
3.7	Productivité du <i>travail utile</i> et part du capital dans le partage de la valeur ajoutée de 1960 à 2009.	95
4.1	PIB décomposé en sommes partielles cumulatives des variations supérieures et inférieures à la croissance de long terme.	108
4.2	Émissions de CO2 de la France entre 1950 et 2013 en approches production et consommation. Unité : milliers de tonnes de CO2.	110
4.3	Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour 1951-2013, pour le régime d'accumulation fordiste et pour le régime d'accumulation néolibéral pour la spécification avec le CO2 en approche production.	125

4.4	Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour 1951-2013 et pour les deux régimes d'accumulation pour la spécification CO2 en approche production avec le prix du pétrole en variable de contrôle.	126
4.5	Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour la spécification avec le CO2 en approche consommation sans et avec le prix du pétrole concernant le régime d'accumulation néolibéral.	128
5.1	Les facteurs du <i>volontarisme carbone</i> et leurs effets hypothétiques	148
5.2	Corrélation entre efficacité thermodynamique et productivité horaire	164
5.3	Croissance de la productivité horaire et gains thermodynamiques pour l'UE15 de 1960 à 2009	165
C.1	Corrélation entre les émissions de CO2 domestiques et l'énergie utilisée.	193
C.2	Comparaison des données d'énergie utilisée de la Banque mondiale et de Podobnik (2006).	194
D.1	Plans 1 : 2 et 1 : 3 pour les variables.	204
D.2	Plans 1 :4 et 1 :5 pour les variables.	205
D.3	Plans 1 : 2 et 1 : 3 pour les pays.	208
D.4	Plan 1 : 4 et 1 : 5 pour les pays.	209

À l'ère du monde fini ³

La finitude du monde est intemporelle mais récemment seulement elle est devenue un élément structurant de la psyché humaine des sociétés modernes ⁴. Ce travail de recherche porte sur la soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes et adopte un prisme macroéconomique en termes de soutenabilité forte. Cette dernière désigne l'une des deux grandes approches de la soutenabilité. Son acception *forte*, qui correspond à l'orientation de l'Économie écologique (que nous présentons plus loin), considère que les types de capitaux ne sont pas substituables entre eux, c'est-à-dire qu'à la dégradation de l'environnement et à la raréfaction des ressources il n'est pas possible de substituer du capital manufacturé, du capital humain ou du capital financier. Cette approche de la soutenabilité vient en contrepoint de la soutenabilité dite *faible* qui fait de la substituabilité des capitaux un élément fondamental : dans le cadre de la soutenabilité faible, seul le stock agrégé de capital doit demeurer constant. Dans le cadre de la soutenabilité forte, un stock suffisant de ressource naturelle et une qualité suffisante de l'environnement doivent être maintenus pour assurer la viabilité du système (AYRES, van den BERGH *et al.*, 1998). De façon générale, ma recherche portera sur la façon dont le capitalisme organise la nature et évolue en fonction des contraintes environnementales : je pars du postulat que les contraintes environnementales peuvent être aménagées mais non dépassées. Dès lors, l'acception de la soutenabilité sous-jacente à ma thèse est celle de la soutenabilité forte. Celle-ci implique que le capitalisme est *in fine* borné par les contraintes environnementales. Tel ne serait pas le cas si les capitaux étaient parfaitement substituables.

Ce sujet inclut plusieurs termes qu'il me paraît utile de définir dès à présent ⁵. Le terme de soutenabilité renvoie ici à la soutenabilité environnementale, c'est-à-dire simplement la capacité de l'activité économique à se perpétuer dans les limites écologiques de la planète. L'accumulation du capital désigne le processus historique dynamique par lequel la richesse produite augmente et est distribuée entre des classes sociales aux intérêts divergents. Cette accumulation prend place dans une organisation particulière de la société et de l'économie, le capitalisme. À la suite de plusieurs auteurs, je définis celui-ci comme un système socioéconomique où la propriété des moyens de production est privée et où la production est organisée afin de dégager un profit selon une division sociale du travail entre producteurs

3. Dans la thèse, j'ai suivi la convention d'utiliser la première personne du pluriel pour parler en mon nom, notamment parce que deux des cinq chapitres sont co-écrits. Toutefois, comme cette introduction se fonde en partie sur mon parcours personnel, j'ai décidé d'y employer la première personne du singulier.

4. La Terre constitue un système ouvert recevant l'énergie solaire et, à ce titre, peut ne pas être considérée comme un monde aux ressources finies. Toutefois, l'énergie solaire ne suffit pas, à mon avis, à remettre en cause sa finitude : voir notamment la note de bas de page 11 page 43.

5. Un certain nombre de ces définitions seront rappelées dans les chapitres qui font plus particulièrement appel à telle ou telle de ces notions.

décentralisés et reliés entre eux via la monnaie par un rapport marchand — la vente des marchandises produites — et un rapport salarial — la vente de la force de travail (AGLIETTA, 2003; DURAND, 2010). Un régime d'accumulation du capital est, quant à lui, défini comme un ensemble de

« régularités assurant une progression générale et relativement cohérente de l'accumulation du capital, c'est-à-dire permettant de résorber ou d'étaler dans le temps les distorsions et déséquilibres qui naissent en permanence du processus lui-même. Ces régularités concernent :

- un type d'évolution d'organisation de la production et de rapport des salariés aux moyens de production ;
- un horizon temporel de valorisation du capital sur la base duquel peuvent se dégager les principes de gestion ;
- un partage de la valeur permettant la reproduction dynamique des différents groupes sociaux ou classes ;
- une composition de la demande sociale validant l'évolution tendancielle des capacités de production ;
- une modalité d'articulation avec les formes non capitalistes, lorsque ces dernières ont une place importante dans la formation économique étudiée »

(BOYER, 2015, p. 61)

Comme l'environnement n'est pas un tout homogène mais revêt au contraire un caractère multidimensionnel qui rend impossible d'aborder uniment la soutenabilité de l'accumulation du capital, la thèse se concentrera largement sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂. Cela se justifie de trois façons. Il y a d'abord une raison pragmatique à ce choix : pour les pays à haut revenu, nous disposons de séries longues pour les émissions de CO₂ et l'énergie qui permettent de couvrir toute la période du capitalisme depuis la première révolution industrielle. Cela permet un recul historique précieux en même temps que l'utilisation de ces données pour des analyses économétriques en série temporelle.

Il y a ensuite deux raisons de fond. La première est que le changement climatique est probablement la manifestation la plus évidente et la plus claire de la façon dont le capitalisme influe sur l'environnement. Comme nous le verrons dans le chapitre 1, la concomitance de l'augmentation des émissions de CO₂ et de l'avènement du capitalisme industriel offre un exemple très clair de l'impact écologique de ce type d'organisation socioéconomique. De ce point de vue, il semblait donc pertinent d'aborder la soutenabilité de l'accumulation du capital sous l'angle du carbone et de la consommation d'énergie. La seconde raison de fond est que le changement climatique causé par le CO₂ contenu dans les énergies fossiles est — sans doute — le problème environnemental le plus important auquel est actuellement confrontée l'humanité. Le rapport 2014 du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou *International Panel on Climate Change* : IPCC) rappelle ainsi que

« L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie et, aujourd'hui, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont les plus élevées jamais observées. (...) Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. (...) Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, qui ont augmenté depuis l'époque préindustrielle en raison essentiellement de la croissance économique et démographique, sont actuellement plus élevées que jamais, ce qui a entraîné des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux sans précédent

depuis au moins 800 000 ans.(...) Environ la moitié des émissions anthropiques de CO2 cumulées entre 1750 et 2011 ont été produites durant les 40 dernières années de cette période. » (IPCC, 2014, pp. 2 - 4)

D'après le GIEC, les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique atteignent 49 gigatonnes équivalent CO2 en 2010. Or, pour conserver une probabilité supérieure à 66% de rester dans les limites d'un réchauffement climatique de 2 degrés celsius par rapport à la période 1861-1880, le GIEC estime que la quantité totale de GES émise depuis 1870 doit demeurer inférieure à 2900 gigatonnes. En 2011, le GIEC indique que le cumul des émissions de CO2 depuis 1870 était de 1900 gigatonnes. Au rythme annuel actuel d'émissions de gaz à effet de serre (dont le CO2 représentait 61% en 2012 d'après les données de la base Edgar et de la *BP Review 2017*⁶), il faudra donc entre 20 et 21 ans pour atteindre ce plafond, environ 30 ans si l'on ne tient compte que des émissions de CO2 (33,4 Gt en 2016). Au niveau mondial, aucune tendance ne peut être décelée qui laisse penser à une inversion, comme les données représentées sur le graphique 1 le montrent.

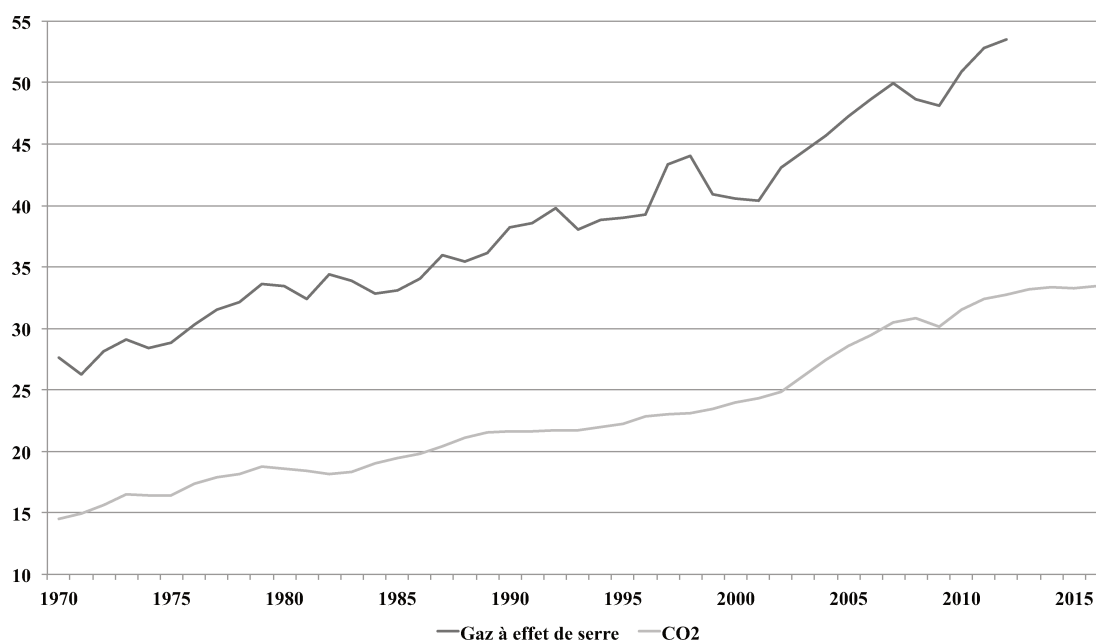


FIGURE 1 – Émissions mondiales de gaz à effet de serre et de CO2 de 1970 à 2016 (2012 pour les GES). Unité : Gigatonnes équivalent CO2. Sources des données : Edgar v. 4.2 FT2012 pour les émissions de gaz à effet de serre et *BP Review 2017* pour les émissions de CO2.

Bien que les émissions globales de CO2 stagnent depuis 2013, cela n'arrête pas la croissance de la concentration atmosphérique du CO2⁷. En outre, même si l'humanité cessait totalement d'émettre du CO2 dès à présent, la quantité correspondant à un réchauffement moyen de 1,5 degrés au-dessus

6. Les gaz à effet de serre sont le CO2, le méthane, le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux et les gaz de la famille des F-gaz dont les hydrofluorocarbures, les perfluorocarbures et l'hexafluorure de soufre.

7. Cf. Justin Gillis, Carbon in Atmosphere Is Rising, Even as Emissions Stabilize, *nytimes.com*, 26 juin 2017, <https://www.nytimes.com/2017/06/26/climate/carbon-in-atmosphere-is-rising-even-as-emissions-stabilize.html?mcubz=1>, dernier accès au lien le 22 août 2017.

des niveaux pré-industriels a déjà été émise⁸. De plus, si elle atteint presque 20% de la consommation mondiale d'énergie finale, la part de l'énergie renouvelable n'a augmenté que de 1,8 points de pourcentage depuis 1990 : même si une tendance à la hausse est claire depuis 2007, cela permet simplement — jusqu'à présent — de stabiliser la consommation d'énergie fossile qui représente encore 80% de la consommation totale d'énergie (graphique 2).

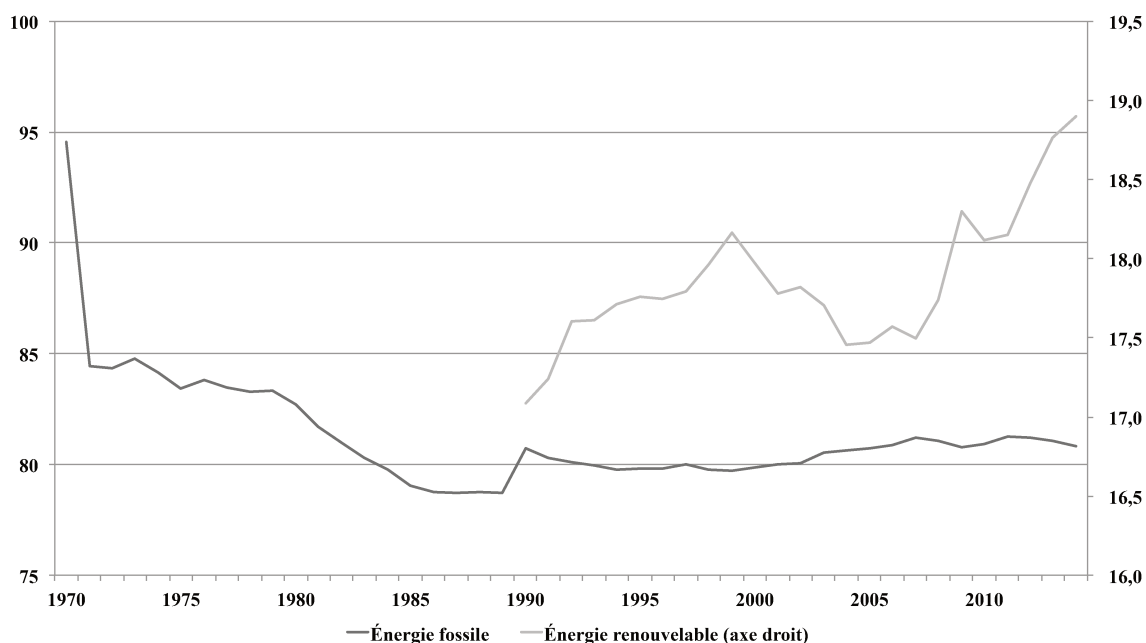


FIGURE 2 – Parts de l'énergie fossile et de l'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie mondiale de 1970 à 2014 (année la plus récente disponible). Unité : pourcentage. Source des données : *World Development Indicators*, Banque Mondiale

Ces constatations pessimistes pourraient être nuancées par la signature de l'Accord de Paris lors de la 21^e Conférence des Parties (COP21) de décembre 2015. Toutefois, les contributions volontaires des États telles que déclarées en préparation de la COP21 sont bien en deçà des exigences climatiques, comme l'indique le texte de l'accord lui-même :

« les niveaux des émissions globales de gaz à effet de serre en 2025 et 2030 estimés sur la base des contributions prévues déterminées au niveau national ne sont pas compatibles avec des scénarios au moindre coût prévoyant une hausse de la température de 2°C, mais se traduisent par un niveau prévisible d'émissions de 55 gigatonnes en 2030, et note également que des efforts de réduction des émissions beaucoup plus importants que ceux associés aux contributions prévues déterminées au niveau national seront nécessaires pour contenir l'élévation de la température de la planète en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels en ramenant les émissions à 40 gigatonnes ou en dessous de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels » (IPCC, 2014, §17, p. 4)

8. Cf. Sylvestre Huet, COP 21 : viser 1,5°C ou 2°C?, liberation.fr, 4 décembre 2015, <http://sciences.blogs.liberation.fr/2015/12/04/viser-15c-et-non-2c-fausse-bonne-idee/>, dernier accès au lien le 22 août 2017.

Corroborant l'avertissement contenu dans l'Accord de Paris, l'étude de RAFTERY *et al.* (2017) se fondant sur les projections actuelles en matière de population, de progression du PIB et d'amélioration de l'intensité carbone du PIB indique que la probabilité de limiter le changement climatique sous la barre des 2° celsius est de moins de 5%. Selon les auteurs, l'augmentation de la température la plus probable se situera dans un intervalle de 2 à 4,9° celsius.

Bien sûr, la situation mondiale masque des situations très diverses aux niveaux national et régional. Toutefois, comme nous le verrons aux chapitres 3 et 5, les situations nationales les plus vertueuses doivent elles-mêmes être relativisées; la notion de découplage — c'est-à-dire la possibilité de poursuivre la croissance économique tout en diminuant les impacts environnementaux — doit ainsi être maniée avec prudence. Le découplage absolu, une hausse du PIB accompagnée d'une baisse des prélèvements sur l'environnement et des rejets polluants, n'a jamais été atteint (OZKAYNAK *et al.*, 2012). On observe bien des situations de découplage relatif lorsque le PIB croît plus vite que l'utilisation de matière ou que les émissions de polluants. Cependant, ces observations peuvent se révéler un trompe-l'œil. KOVACIC *et al.* (2017) montrent ainsi que le découplage relatif observé entre énergie et PIB pour quatorze pays européens entre 1995 et 2013 n'est dû qu'au processus de financiarisation qui a permis aux secteurs financier et non-financier d'accroître leurs marges via des comportements rentiers d'investissement financier et non à une amélioration des processus de production vers une meilleure efficacité énergétique. Leurs données mettent en lumière que le métabolisme énergétique (mesuré comme la quantité d'énergie consommée par heure travaillée dans les secteurs considérés) est demeuré constant dans les secteurs productifs des économies européennes sur la période. Nous reviendrons sur ce phénomène de trompe-l'œil au chapitre 3.

Problématique générale de la thèse : interconnexions et interdépendances entre accumulation du capital et dynamiques environnementales

Ces résultats suggèrent que le découplage relatif observé résulte non pas d'une restructuration de fond des systèmes productifs qui œuvrerait à la diminution du métabolisme social des économies mais, *a contrario*, de la transition vers un régime d'accumulation tiré par la finance. Par métabolisme social, j'entends ici la façon dont les sociétés organisent leurs échanges de matière et d'énergie avec l'environnement pour reproduire leur système socioéconomique (MARTINEZ-ALIER, KALLIS *et al.*, 2010; MURADIAN *et al.*, 2012).

La nécessité de prendre en compte les formes socioéconomiques précises dans lesquelles se forment les relations société-nature et se produisent les crises a été soulignée par plusieurs économistes écologiques. Ainsi OZKAYNAK *et al.* (2012) pointent-ils le manque de prise en compte du cadre politique et socioéconomique dans lequel les préconisations de l'Économie écologique sont décidées et opérationnalisées : les économies de marché capitalistes. Ces auteurs posent clairement la question de la compatibilité des propositions de l'Économie écologique avec le capitalisme. Comme l'expliquent ANDERSON et M'GONIGLE

(2012), le problème n'est pas l'activité économique en elle-même mais la croissance et l'accumulation du capital. Celles-ci sont inhérentes au système et non de simples additions dont il s'agirait de s'affranchir⁹. BUCH-HANSEN (2014) souligne, quant à lui, le déficit de prise en compte de la diversité des capitalismes dans la littérature sur l'état stationnaire et la décroissance¹⁰. À l'instar de OZKAYNAK *et al.* (2012), BUCH-HANSEN insiste sur le fait qu'aucun changement institutionnel n'intervient dans un vide socio-politique et que les auteurs de l'état stationnaire et de la décroissance devraient prendre en compte les dépendances de sentier et les modèles existants dans leurs analyses. Dans un article de 2012, ÉLIE *et al.* (2012) montrent en effet que la diversité des dispositifs institutionnels de régulation environnementale rejoint dans une certaine mesure la classification en cinq capitalismes de AMABLE (2005). Enfin, dans leur article introductif à la *macroéconomie écologique* émergente, REZAI et STAGL (2016) relèvent que les crises sont produites par des structures socioéconomiques spécifiques et que la tâche d'une telle *macroéconomie écologique* devrait être d'informer sur les interconnexions et les racines communes des différentes dimensions de la crise — écologique, économique, sociale — ainsi que d'évaluer la soutenabilité des réponses apportées.

Ces travaux illustrent l'importance d'analyser de façon conjointe l'évolution des sociétés et de la nature et invitent à s'interroger sur l'articulation entre les régimes d'accumulation du capital et l'environnement. La présente recherche s'inscrit dans cette perspective et étudiera les interconnexions et interdépendances entre accumulation du capital et dynamiques environnementales pour tenter d'en saisir les influences réciproques. Cette problématique générale se décline en deux perspectives : dans une perspective plutôt théorique, la thèse analysera les compatibilités et incompatibilités entre les rapports sociaux fondamentaux du capitalisme, le système monétaire et la soutenabilité environnementale. Dans une perspective plutôt empirique, la thèse analysera la co-évolution entre les différents régimes d'accumulation du capital et les dynamiques de l'énergie et du carbone. Notons que cette problématique appelle certains positionnements méthodologique et théorique.

Méthodologie et méthodes de la thèse

D'après SPASH (2012), la méthodologie est l'ensemble des principes et des pratiques qui forgent la recherche et qui déterminent l'usage et l'interprétation des méthodes utilisées. Afin de clarifier la façon dont la problématique sera traitée, j'explique successivement le positionnement méthodologique de la thèse ainsi que le choix des méthodes.

Positionnement méthodologique

En sciences économiques, les sophismes de composition constituent un problème bien connu : considérer par erreur que ce qui est vrai au niveau individuel, et seulement à ce niveau, l'est également

9. À ce titre, il est intéressant de noter que, contrairement à une idée reçue, la croissance démographique joue un rôle relativement faible dans le changement climatique (IPCC, 2014; RAFTERY *et al.*, 2017)

10. Il faut cependant noter que certains auteurs de l'état stationnaire s'appuient en partie sur la diversité des formes institutionnelles du capitalisme comme nous le verrons au chapitre 1.

pour le tout (SAMUELSON, 1955). La controverse du capital, qui portait notamment sur l'impossibilité d'utiliser une fonction de production agrégée, et les sept paradoxes de la macroéconomie¹¹ montrent que macroéconomie et microéconomie sont liées mais que la première est autonome par rapport à la seconde. En sciences naturelles, les sophismes de composition sont également possibles si l'on considère un élément d'un écosystème pris isolément sans tenir compte de son rôle dans le fonctionnement de l'ensemble, comme il ressort de la première loi de l'écologie (COMMONER, 1972) : « toutes les parties du complexe vital sont interdépendantes (...) ». Cette loi « est l'expression d'un réseau serré et complexe d'interconnexions à l'intérieur de l'écosphère, qui rattachent les uns aux autres divers organismes vivants et relie des groupements, des espèces et des organismes individuels à leur environnement physico-chimique » (ibid., p. 35). En conséquence, aussi bien les écosystèmes que l'économie ne peuvent être réduits à un ensemble d'agents isolés dont l'addition des comportements individuels formerait le tout : les interdépendances et interactions réciproques dans un système complexe engendrent des propriétés émergentes qui forgent un tout irréductible à la somme des parties.

Si l'on veut analyser leurs dynamiques conjointes, il est donc nécessaire d'aborder systèmes socio-économiques et écosystèmes comme des tous : il n'est pas possible de prendre l'un de leurs éléments isolément. Bien sûr, cette affirmation est directement contredite par le développement de la problématique où j'expliquais que le caractère multidimensionnel de l'environnement rendait impossible d'aborder la question de la soutenabilité dans son ensemble : toutefois, par leur importance et leurs conséquences systémiques, carbone et énergie peuvent être considérés comme des éléments totalisants qu'il est possible de mettre directement en relation avec l'économie prise comme un tout. Ce ne serait pas le cas, par exemple, d'une espèce animale ou végétale considérée isolément.

Par conséquent, la problématique qui précède implique un positionnement méthodologique systémique et holiste, c'est-à-dire qui porte une « interprétation globalisante du fonctionnement et de l'évolution de la société. Elle suppose que le tout social et culturel est d'une nature différente des éléments qui le composent ... » (ÉCHAUDEMAISON *et al.*, 2001). Dans l'analyse des interrelations entre société et nature, le holisme des sciences sociales s'accompagne donc du holisme des sciences naturelles, apparu dans la deuxième moitié du xx^e siècle et qui a, notamment, nourri l'Économie écologique (DOUAI et PLUMECOCQ, 2017). Dès lors, l'individualisme méthodologique de l'Économie néoclassique¹² fait d'individus atomisés, isolés et seulement en interaction stratégique les uns avec les autres n'apparaissait pas comme une approche méthodologiquement pertinente pour mon travail de thèse. Par Économie néoclassique, j'entends l'approche dont la méthodologie se fonde sur le triptyque individualisme méthodologique — équilibre général — marginalisme. Il est bien évident que de nombreux raffinements ont été apportés à ce

11. Ces sept paradoxes sont les suivants : paradoxe de l'épargne : un accroissement des taux d'épargne individuels aboutit à une production moindre et à un volume d'épargne global inchangé ; paradoxe des coûts : des salaires réels plus élevés aboutissent à des taux de profit plus élevés via la stimulation de la demande ; paradoxe des déficits publics : les déficits publics accroissent les profits privés ; paradoxe de la dette : le désendettement peut aboutir à des ratios d'endettement plus élevés à cause de la chute de l'activité économique ; paradoxe de la tranquillité : c'est dans les périodes de stabilité que se forment les périodes d'instabilité car les agents ont des comportements plus risqués ; paradoxe de la liquidité : la recherche de la liquidité aboutit à des actifs moins liquides ; paradoxe du risque : la couverture du risque individuel accroît le risque de l'ensemble du système, le paradoxe de la demande tirée par les profits : la modération salariale généralisée déprime la demande mondiale alors même que celle-ci est tirée par les profits dans chaque pays pris individuellement (LAVOIE, 2014).

12. J'ai mis une majuscule lorsque le terme désigne une tradition de pensée en sciences économiques.

triptyque mais il me paraît toujours définir le cœur de cette approche. Les approches non néoclassiques dont il sera question plus loin — souvent qualifiées d'hétérodoxes — sont donc celles dont la méthodologie se situe hors de ce triptyque. Il faut souligner qu'Économie néoclassique et Économie hétérodoxe ne sont pas symétriques : la première constitue un ensemble divers théoriquement et empiriquement mais méthodologiquement unifié alors que la seconde désigne un ensemble d'approches distinctes tant théoriquement que méthodologiquement, chacune ayant sa méthodologie propre. Ce positionnement méthodologique oblige donc à clarifier le positionnement théorique de la thèse mais, avant cela, il me faut préciser brièvement le choix des méthodes utilisées.

Le choix des méthodes

Les méthodes utilisées sont à la fois qualitatives et quantitatives. Loin de l'opposition factice entre qualitatif et quantitatif, je pense que les deux dimensions sont complémentaires : les méthodes qualitatives permettent une analyse complexe et nuancée que les méthodes quantitatives, par leur caractère synthétique inhérent à toute modélisation, accommodent mal. À l'inverse, ces dernières permettent de compléter l'analyse qualitative en faisant ressortir les traits principaux d'une relation et en étayant une possible causalité par les corrélations mises en lumière¹³. La dimension qualitative s'articulera autour d'une approche historique accompagnée de l'exposition de faits stylisés (chapitres 1 et 3), définis par CSEREKLYEI *et al.* (2016) à la suite de SUMMERS (1991) comme

« des régularités empiriques pouvant être observées clairement sans utilisation de techniques économétriques sophistiquées. Il ne s'agit pas de relations vérifiées en tous lieux et en tout temps mais simplement de tendances statistiques et de caractéristiques historiques. Ces régularités ne sont pas forcément des relations structurelles mais peuvent être le résultat de processus complexes. » (p. 223)¹⁴

La dimension quantitative, quant à elle, s'articulera essentiellement autour de l'usage de l'économétrie et de l'analyse géométrique des données (chapitres 4 et 5) mais la modélisation structurelle sera également brièvement sollicitée (chapitre 2 et annexe E). Ces méthodes seront systématiquement utilisées dans le cadre d'une approche holiste, conformément aux développements précédents, laquelle s'accompagne d'un relativisme historique, inhérent aux sciences sociales et induit par la définition des faits stylisés : ce qui est vrai ne l'est que dans le cadre d'un contexte historique donné et ne constitue pas une vérité générale et universelle. Autrement dit, un fait n'est pas valable en tout lieu et en tout temps mais est *relatif* à un contexte historique donné.

Positionnement théorique de la thèse

Pour répondre à la problématique, il est nécessaire de disposer de cadres théoriques qui envisagent l'économie et la nature comme deux sphères interdépendantes et qui offrent une théorie cohérente de l'accumulation du capital et de ses régimes. Ma thèse s'inspire donc des apports de l'Économie écologique, de l'École de la régulation, de l'Économie post-keynésienne et de l'Éco-marxisme, c'est-à-dire quatre

13. Bien sûr, mettre en évidence une corrélation ne suffit pas à *démontrer* une causalité.

14. Lorsqu'elles sont tirées d'écrits en anglais, les citations ont été traduites par mes soins.

approches qui se situent hors du cadre méthodologique néoclassique et qui ont notamment en commun d'adopter un holisme méthodologique¹⁵.

L'Économie écologique

L'Économie écologique apparaît à la fin des années 1980 dans le contexte d'un questionnement portant sur les rapports société-nature suite à l'émergence de nouvelles conceptions de la pollution et de l'environnement, des problèmes des ressources alimentaires en relation avec l'accroissement de la population mondiale et à la crise énergétique des années 1970. Pour COSTANZA (1989), l'Économie écologique doit être un champ d'étude général, interdisciplinaire et holiste qui ambitionne d'intégrer les problèmes écologiques à l'économie et les problèmes économiques à l'écologie. Pour MARTINEZ-ALIER (2014), elle « doit recenser et concilier les contradictions qui surgissent entre les différentes disciplines traitant les divers aspects de la soutenabilité écologique » (p. 94). FROGER *et al.* (2016) ajoutent qu'elle « mêle des principes provenant des sciences de la nature (le métabolisme, la co-évolution...) avec une réflexion élargie sur l'économie, dans le cadre d'une démarche holiste considérant les phénomènes dans leur globalité et non pas de façon disjointe » (p. 11). Dans la lignée des travaux de GEORGESCU-ROEGEN (1995), une caractéristique essentielle de l'Économie écologique est l'intégration des deux premières lois de la thermodynamique à l'économie. La première loi indique que l'énergie proprement dite ne se perd pas dans le processus de transformation-production, ce qui est perdu au fur et à mesure — c'est là la seconde loi — est la qualité de l'énergie, ou partie utile de l'énergie pouvant fournir un travail physique : plus une énergie est transformée plus sa qualité s'altère et l'énergie utile disponible diminue. À partir des lois de la thermodynamique, les économistes écologiques affirment donc notamment l'impossibilité d'une croissance infinie dans un monde fini. L'Économie écologique s'articule autour de quelques autres principes fondamentaux plus ou moins consensuels selon les courants qui la composent : la vision pré-analytique de l'économie comme encadrée dans la nature, la nécessaire compréhension des interactions entre économie et écosystèmes en termes physiques et en termes de co-évolution, l'incapacité de la croissance d'assurer soutenabilité environnementale, bien-être et qualité de vie, le pluralisme des valeurs environnementales et de leur prise en compte dans la décision publique, la non-substituabilité des types de capitaux (toutefois le terme de capital naturel est communément utilisé par les économistes écologiques) ainsi qu'un certain pessimisme technologique (DOUAI, 2017). Le positionnement de l'Économie écologique, au carrefour des sciences naturelles et des sciences sociales (dont les différentes approches des sciences économiques) fait d'elle un ensemble très divers et peu unifié sur les plans théorique et méthodologique et il est donc difficile de parler d'école de pensée *stricto sensu* (GOWDY et ERICKSON, 2005). Parmi les différentes branches de l'Économie écologique, celle à laquelle cette recherche s'identifie le mieux est la *socioéconomie écologique*, dont l'enjeu principal est de « repolitiser l'histoire et les enjeux environnementaux, de sorte que le sujet central de la soutenabilité ne soit pas une humanité globale et abstraite ou une somme de comportements individuels, mais bien aussi la dynamique

15. Il faut néanmoins remarquer que certains courants de l'Économie écologique comme *la nouvelle économie des ressources naturelles* et *les nouveaux pragmatiques* se rapprochent nettement de l'Économie néoclassique par leurs présupposés théoriques et méthodologiques (DOUAI et PLUMECOCQ, 2017 ; SPASH et RYAN, 2012).

des structures sociales et des institutions qui régissent nos rapports à la nature » (DOUAI, 2017, p. 10). Si les économistes écologiques soulignent l'importance d'une approche en termes de co-évolution, il faut toutefois noter que celle-ci reste largement à mettre en œuvre au niveau macroéconomique dans les programmes de recherche.

L'Économie post-keynésienne

Le deuxième cadre théorique sur lequel cette recherche se fonde est l'Économie post-keynésienne. Cette approche, qui prend ses racines dans les écrits de Keynes et de ses collègues de Cambridge (Kalecki, Robinson, Kaldor, Kahn, Sraffa) et qui s'est institutionnalisée dans les années 1970 avec la création du *Cambridge Journal of Economics* et du *Journal of Post Keynesian Economics*, offre une théorie macroéconomique et monétaire complète et cohérente (LAVOIE, 2014). Celle-ci s'articule autour de concepts clefs tels que la demande effective, la monnaie endogène ou l'incertitude radicale. La demande effective affirme que l'offre s'ajuste à la demande à court et à long termes. Là où l'Économie néoclassique considère la rareté des ressources comme contrainte économique première, les post-keynésiens considèrent que la contrainte économique est d'abord celle de la rareté de la demande : ni travail ni capital ne sont considérés comme rares. De même que l'offre de bien et services est endogène en cela qu'elle répond à une demande exprimée par les agents et anticipée par les entreprises, l'offre de monnaie est, en outre, endogène car la monnaie est créée via le crédit bancaire lorsqu'une demande solvable est exprimée. Enfin, dans le monde ainsi analysé par les post-keynésiens, les agents ne connaissent pas les distributions de probabilité associées aux événements perturbateurs et ne peuvent donc pas, sur cette base, fonder leurs anticipations. Il s'agit donc d'un univers d'incertitude et non de risque, selon la distinction knightienne qui qualifie de risque ce qui est probabilisable et d'incertitude ce qui ne l'est pas (KNIGHT, 1921). Pour réduire l'incertitude, les agents forment des conventions et se plient aux règles du jeu social, c'est-à-dire aux institutions. Il en émerge une dépendance de sentier qui évolue au fil du temps historique, irréversible. Suivant KALECKI (1971), les post-keynésiens voient, *ipso facto*, le long terme non pas comme un horizon temporel indépendant mais comme la suite d'une série de petits changements qui s'additionnent à chaque période et qui modifient à chaque instant la situation future du monde. Celui-ci est donc considéré comme non-ergodique, c'est-à-dire qu'il ne se reproduit jamais à l'identique. L'insistance sur l'incertitude, le temps historique et la non-ergodicité font de l'Économie post-keynésienne une base théorique et méthodologique adéquate pour étudier les relations société-nature (KRONENBERG, 2010). Pendant longtemps les problématiques environnementales furent ignorées, l'habitus des post-keynésiens étant articulé autour de la croissance, de l'emploi et de la distribution (MEARMAN, 2005). Toutefois, la macroéconomie post-keynésienne fournit aujourd'hui le cadre théorique et méthodologique principal de la macroéconomie écologique en émergence à travers la modélisation stock-flux cohérente qui constitue l'espace privilégié d'intégration de l'Économie écologique et de l'Économie post-keynésienne (HARDT et O'NEILL, 2017).

L'École de la régulation

Le troisième cadre théorique qui irrigue le présent travail, particulièrement la seconde partie de la thèse, est l'École de la régulation (ou l'Économie politique des capitalismes pour reprendre le titre qu'a donné Robert Boyer à sa récente introduction au champ (BOYER, 2015)). Apparue en France dans les années 1970 comme une théorie de la crise, sa problématique fondamentale est d'analyser les mécanismes susceptibles d'assurer la cohérence et la viabilité temporaires d'une économie capitaliste, étant donné la multiplicité des formes institutionnelles qui la composent. La notion de régulation désigne ici l'institutionnalisation de compromis sociaux entre différentes classes sociales aux intérêts divergents qui va donner corps à un type particulier de capitalisme *régulé* par les institutions émergentes. Le moment de la crise est alors celui de la remise en question plus ou moins profonde de ces institutions et compromis sociaux. Les crises forgent des formes institutionnelles qui vont codifier des rapports sociaux fondamentaux à la source des différents types de régime d'accumulation du capital :

- le rapport monétaire : la monnaie constitue l'équivalent général et le lien entre les unités économiques décentralisées. Dans une économie marchande, elle permet de prendre part au rapport social fondamental qu'est le rapport marchand ;
- le rapport salarial : relation entre capital et travail dans l'organisation du travail et les modalités de rémunération du travail et du capital ;
- les formes de l'État : modalités d'intervention de l'État dans l'économie (exemple : État producteur ou État technocratique organisateur du marché) ;
- les formes de la concurrence : types de relation entre les centres d'accumulation (exemple : les entreprises). Elles peuvent être de nature concurrentielle, monopolistique etc. ;
- L'insertion dans le régime international : relations entre l'État-nation et le reste du monde.

À partir de ces formes institutionnelles, les régulationnistes distinguent classiquement deux régimes d'accumulation dans les pays à haut revenu : le fordisme et le néolibéralisme. Le premier se caractérise par un approfondissement de la division du travail, la mécanisation des processus de production et la séparation entre conception et production, des gains de productivité importants qui se traduisent par un rapport salarial en faveur du travail, une forme de compétition oligopolistique, un régime monétaire fondé sur le crédit et une stabilité monétaire internationale grâce aux Accords de Bretton-Woods. L'État-nation est le cadre dans lequel s'opèrent les ajustements de l'offre et de la demande et le processus d'accumulation est essentiellement tiré par la consommation domestique. Enfin, ce régime d'accumulation est également fondé sur une énergie abondante et bon marché. Le second, quant à lui, se caractérise par l'érosion de l'État-producteur au profit de l'émergence d'un État organisateur des marchés, les flux de biens et services de capitaux sont déréglementés, l'État-nation n'est plus l'espace premier des ajustements de l'offre et de la demande et la finance devient un secteur important de l'économie en même temps que le principe organisateur de la gestion des entreprises non financières. Les gains de productivité ralentissent de même que l'accumulation du capital productif et le rapport salarial est moins favorable au travail : le compromis social fordiste s'érode. L'École de la régulation offre donc une analyse de long terme du capitalisme et de ses mutations et, à ce titre, constitue un cadre pertinent pour une approche en termes de co-évolution qui prenne en compte les formations socioéconomiques dans lesquelles se forment

les relations société-nature et les crises. À l'instar de l'Économie post-keynésienne, les problématiques environnementales ont été largement ignorées par les régulationnistes pendant longtemps¹⁶, au moins d'un point de vue macroéconomique, mais quelques travaux récents tendent à combler ce manque (BOYER, 2015). Il est toutefois à noter que le nationalisme méthodologique de la Régulation peut également être considéré comme une limite à la prise en compte des problèmes environnementaux globaux.

L'Éco-marxisme

Enfin, le dernier cadre analytique dont nous nous inspirons est celui de l'Éco-marxisme. Si l'on peut trouver les fondements d'une pensée écologiste dans les écrits de Marx et Engels (BELLAMY FOSTER, 2011), ce courant ne s'est véritablement développé que depuis les années 1980, notamment avec la création du journal *Capitalism Nature Socialism* en 1988. Il s'articule autour de deux grandes problématiques dites de la seconde contradiction du capitalisme et de la rupture métabolique. La première, théorisée par O'CONNOR (1988), indique que la détérioration tendancielle des ressources naturelles, base matérielle du processus de production et de reproduction du capital, aboutit à renchérir l'accès à ces mêmes ressources; celui-ci requiert dès lors davantage de capital pour les exploiter et les restaurer, faute de quoi il ne pourrait plus assurer la propre reproduction du capital. La crise écologique est alors de nature à aggraver les contradictions endogènes du capitalisme. La seconde problématique — la thèse de la rupture métabolique —, elle, fut notamment développée par BELLAMY FOSTER (1999, 2002) à partir des écrits de Marx : cette approche montre que la captation des éléments nutritionnels produits par la nature engendre un appauvrissement des sols car ces nutriments, souvent envoyés à des centaines, voire des milliers, de kilomètres, ne lui sont pas retournés sous forme de déchets organiques qui pourraient la nourrir en retour. Il y a donc rupture métabolique entre la société et la nature car le rythme de consommation des nutriments excède celui de la régénération des sols. Bien qu'ils soient souvent présentés comme deux courants opposés de l'Éco-marxisme, je considère au contraire que ces deux approches sont loin d'être incompatibles : en effet, une multiplicité de ruptures métaboliques locales peut constituer la manifestation microéconomique d'un phénomène de type seconde contradiction au niveau macroéconomique car ces ruptures sont de nature à compliquer l'accès aux ressources nécessaires à l'activité économique. La complémentarité de ces deux approches permet, ainsi, de mettre en évidence la dépendance de l'accumulation du capital à la reproduction de ses conditions de production, ici les conditions environnementales de la production, en même temps que la contradiction existante entre la logique de la reproduction du capital et celle de la reproduction de ses conditions de production.

Ces quatre approches offrent donc les outils théoriques nécessaires à l'analyse de la co-évolution de l'accumulation du capital et de la soutenabilité environnementale. Toutefois, si l'Économie post-keynésienne et l'École de la régulation entretiennent des relations de longue date, lorsque j'ai commencé ma thèse (en 2012) l'Économie écologique et l'Économie post-keynésienne commençaient tout juste à se découvrir mutuellement via quelques travaux essentiellement épistémologiques et méthodologiques (BERR, 2009; HOLT, 2005, 2009; HOLT *et al.*, 2009; KRONENBERG, 2010) et quelques développements théoriques microéconomiques (LAVOIE, 2009). Les problématiques environnementales étaient également

16. Quelques contributions sont tout de même à noter à partir du milieu des années 1990, *confer* le chapitre 3.

très peu présentes dans les travaux régulationnistes. Bien sûr, cette thèse n'a pas la prétention d'aboutir à un cadre analytique intégré. Cependant, mettre en dialogue ces différentes approches constitue une démarche relativement nouvelle et, partant, contribue à la macroéconomie écologique en émergence. De l'Économie écologique naît la conception de l'économie encastrée dans la nature et celle de l'accumulation du capital bornée par les lois de la thermodynamique ; de l'Économie post-keynésienne surgit la théorie macroéconomique et monétaire, tandis que l'École de la régulation fournit l'analyse de long terme des mutations du capitalisme et que de l'Éco-marxisme advient la théorisation des relations dynamiques entre reproduction du capital et reproduction des conditions environnementales de la production. La figure 3 résume ce que la thèse emprunte à chacune de ces approches.

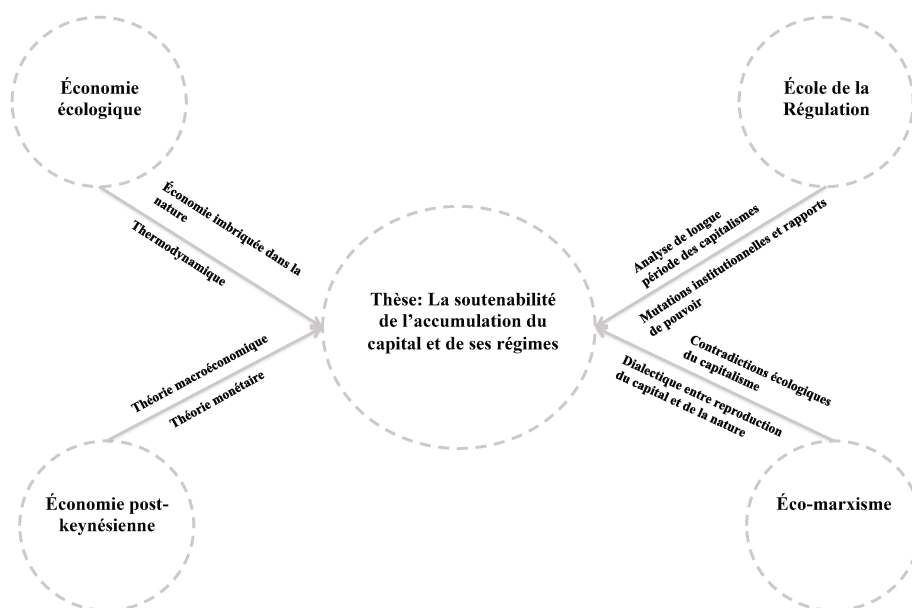


FIGURE 3 – Inspirations théoriques de la thèse.

Le sujet de ma thèse ainsi que mes choix méthodologiques et théoriques sont, bien sûr, en grande partie le résultat de mon parcours universitaire dans son entièreté. Pour achever d'explicitier la raison du sujet et l'inscription de ma thèse dans certains courants, il me paraît donc important de les poser brièvement en perspective de la construction de mon identité comme économiste.

La construction de mon identité d'économiste

Cette thèse de doctorat est, en effet, l'aboutissement d'un cheminement intellectuel qui s'est poursuivi tout au long de mon parcours étudiant. Alors que j'étais étudiant à l'Université Bordeaux IV – Montesquieu (aujourd'hui Université de Bordeaux) en filière *Administration économique et sociale*, où nous étudions aussi bien le droit que l'économie, mon intérêt me portait vers l'économie mais mon manque d'enthousiasme pour le formalisme mathématique me poussait vers le droit. Ma troisième année de

licence, effectuée en Erasmus à la faculté d'économie de l'université de Lund, en Suède, fut, à cet égard, un premier moment déterminant : je suivis exclusivement des cours d'économie et compris, alors, que j'étais capable, avec un peu de travail, de m'entendre avec la formalisation et les techniques quantitatives. Cela me décida à poursuivre dans la voie de l'économie plutôt que dans celle du droit.

Ma première année de master, au sein du master d'économie appliquée de Bordeaux IV, fut une année d'intense stimulation intellectuelle grâce aux enseignements ressortissant à une pluralité de domaines : économie spatiale, économie du développement, économie de l'environnement, économie des ressources naturelles, macroéconomie, analyse des systèmes économiques, etc. Ces enseignements furent particulièrement importants dans la mesure où ils marquèrent ma découverte de l'économie de l'environnement et des ressources naturelles, d'une part, et de l'économie hétérodoxe, d'autre part : le cours de macroéconomie était dispensé par Frédéric Poulon et s'inscrivait dans le cadre de l'école française du circuit monétaire tandis que le cours d'analyse des systèmes économiques était dispensé par des économistes d'inspiration régulationniste. En outre, cette année 2008-2009 fut extraordinaire parce que deux événements décisifs pour la structuration intellectuelle d'un jeune étudiant en économie se déroulaient simultanément : la crise financière née de l'explosion des *subprimes*, d'une part, et le grand mouvement étudiant contre la loi de réforme des universités dite loi LRU, d'autre part. La première constitue jusqu'à aujourd'hui un vecteur d'apprentissage *in situ* de la macroéconomie, de l'économie monétaire et des théories des crises. Le second fut une occasion unique de confronter des connaissances académiques au débat politique ; cela demeure, à mes yeux, la voie royale pour s'approprier les connaissances, dépasser le caractère strictement scolaire de l'apprentissage et développer, *de facto*, un recul critique. J'avais, au reste, déjà pu vérifier, en première année de licence, une telle alacrité intellectuelle lors du mouvement contre le « Contrat Première Embauche ».

Comme moyens d'interroger les savoirs académiques que j'étais en train d'acquérir, ces événements me permirent de réaliser à quel point les sciences économiques¹⁷ ne sont pas un corpus de savoirs neutres et unifiés mais s'inscrivent au contraire dans des visions distinctes de la société et, donc, dans des traditions différentes de philosophie politique. Ce moment décida aussi de ma préférence pour l'économie hétérodoxe, en particulier pour l'Économie post-keynésienne et l'École de la régulation. Celles-ci me paraissaient mieux accepter leur caractère de science sociale consciente de ses racines idéologiques et politiques que l'Économie néoclassique dont la prétention à la pureté a-idéologique m'a toujours paru une forme d'ignorance de sa propre nature : celle d'une science sociale mathématisée (mais les approches hétérodoxes sont également emplies de mathématiques et de statistiques) mais aussi se fondant toujours sur des hypothèses obéissant à une certaine vision de l'humain et de la société, c'est-à-dire à une idéologie plus ou moins consciente comme toute approche en sciences sociales. En outre, Économies post-keynésienne et régulationniste me permettaient de commencer à comprendre la crise financière et ses conséquences. Les explications qu'elles produisaient me semblaient plus satisfaisantes que celles offertes par l'Économie néoclassique. Enfin, il faut le dire, le cadre de pensée offert par ces approches était plus adapté à mes préférences politiques même si la diversité de l'Économie néoclassique est telle qu'il m'aurait été parfaitement possible d'y trouver de quoi satisfaire mes opinions.

17. Précisément parce que les sciences économiques ne constituent pas un corpus de savoirs unifiés, sur aucun des trois plans théorique, empirique et méthodologique, je préfère le pluriel au singulier pour refléter cette diversité.

La deuxième année de master fut l'occasion de poursuivre ce cheminement en approfondissant mes connaissances théoriques, empiriques et pratiques en économie de l'environnement et des ressources naturelles au Centre d'Étude et de Recherche pour le Développement International (CERDI - Université d'Auvergne) dans le cadre du master *Développement durable dans les pays en développement et en transition*. Cette année fut intellectuellement importante à trois égards au moins : elle me permit de poursuivre ma formation dans un cadre exclusivement néoclassique — ce qui revêtait en soi un intérêt heuristique à mes yeux — , en m'ouvrant davantage encore aux méthodes quantitatives grâce à l'importance accordée, par ce centre, à l'économétrie; enfin, elle m'offrit ma première expérience de recherche en m'ouvrant les portes d'un stage à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour étudier les programmes de paiements pour services environnementaux à Madagascar. Ce stage fut également l'occasion d'approfondir mes connaissances dans une autre approche économique de l'environnement, l'Économie écologique, les services écosystémiques étant l'une des principales problématiques du champ. Au terme de ce stage je savais que je voulais travailler sur les problématiques environnementales mais, la crise aidant, je désirais d'abord revenir vers la macroéconomie et l'économie monétaire. Cela me mena au master *Économie internationale, Finance et Régulation* de l'université Paris-13. Je savais qu'y étaient représentées l'Économie post-keynésienne et l'École de la régulation et que je pourrais y réaliser une thèse en phase avec mes préférences théoriques et méthodologiques. À la suite de mon mémoire sur une approche macroéconomique post-keynésienne de la soutenabilité effectué sous la direction de Jacques Mazier, j'eus la chance d'obtenir un contrat doctoral pour enclencher le présent travail en septembre 2012 sous la direction de Cédric Durand et la co-direction de Marc Lavoie, deux enseignants-chercheurs qui représentaient chacun l'un des deux courants m'ayant le plus structuré intellectuellement lors de mon parcours d'étudiant.

Structure et plan d'une thèse hétérogène : un compromis entre les trois articles et la monographie

Cette thèse se compose de cinq chapitres. Elle n'est ni la réunion de trois articles ni une somme constituée d'une monographie progressant pas à pas au fil des chapitres. Elle se pose comme un compromis pragmatique entre la coutume moderne des trois articles et la tradition de la monographie. La première me paraît trahir l'esprit de la thèse qui privilégiait le développement sur la durée de la pensée complexe d'un jeune esprit en formation pour marquer son entrée dans le monde de la recherche; la réunion de trois articles obéit, en effet, à une idéologie productiviste de la recherche transformée en processus taylorien qui ne respecte pas le temps long de la réflexion et de la collecte des données, servi par des chercheurs devenus, presque, des ouvriers spécialisés de la publication comme en témoignent certaines pratiques récentes¹⁸. La seconde représente l'écueil d'une somme de travail si imposante que personne ne la lira. Aussi, mon travail tente-t-il d'accorder la pertinence d'un premier approfondissement à la mesure

18. Cf. Étienne Gless, *Ipag : les secrets d'une progression "fulgurante" en recherche*, EducPro.fr, 9 octobre 2014 <http://www.letudiant.fr/educpros/enquetes/ipag-les-secrets-d-une-progression-fulgurante-en-recherche.html>, visité le 7 août 2017.

d'un écrit susceptible d'être publié, la logique de la publication demeurant un aspect fondamental de la recherche et un objectif légitime et obligé du chercheur.

S'ils composent un tout qui s'articule autour d'une problématique générale commune, chacun des chapitres a donc été pensé et écrit de façon indépendante des autres, même si, bien sûr, des renvois sont insérés ici et là vers le reste de la thèse. Autrement dit, chacun des chapitres est un article, ou un article en devenir et possède son autonomie à l'égard du tout qui les englobe. Je revendique donc une thèse assez hétérogène, avec deux parties bien distinctes : la première, plutôt théorique, discute la façon dont l'Économie écologique aborde la question du capitalisme et du système monétaire pour appréhender ces derniers dans une perspective de soutenabilité, la seconde, plutôt empirique, abordera les dynamiques du carbone et de l'énergie intégrées à l'analyse en termes de régimes d'accumulation et de diversité des capitalismes.

Le chapitre 1 s'inscrit dans le débat sur la possibilité d'un capitalisme stationnaire. Il analyse l'absence des rapports sociaux spécifiques du capitalisme dans les travaux de certains économistes écologiques et en propose une mise en perspective au regard d'exemples historiques de crise écologique et des théories éco-marxistes. Certains économistes écologiques affirment en effet la possibilité d'un capitalisme sans croissance ou concluent simplement que la question du capitalisme n'est pas pertinente. Les éco-marxistes, à l'inverse, en font une question centrale et font valoir qu'un capitalisme stationnaire est une contradiction dans les termes dès lors que l'on prend explicitement en compte ses rapports sociaux spécifiques. Ce chapitre montre que la question du capitalisme constitue bien un angle mort de l'analyse de certains économistes écologiques, *a fortiori* si l'on s'appuie sur certains concepts centraux de l'Économie écologique comme ceux de la thermodynamique. À partir de ces concepts et des rapports sociaux fondamentaux qui forgent le mode de production capitaliste, ce chapitre montre également qu'accumulation infinie du capital et soutenabilité environnementale sont, *in fine*, incompatibles.

Le chapitre 2 discute les analyses monétaires de certains économistes écologiques qui s'articulent autour des postulats suivants : une économie stationnaire (et *a fortiori* une économie en décroissance) est incompatible avec un système dans lequel la monnaie est créée comme une dette portant intérêt. Pour questionner la pertinence de la relation monnaie-dette/taux d'intérêt/croissance ainsi envisagée, ce chapitre adopte une vision critique de ces analyses du point de vue de l'Économie post-keynésienne. En effet, les propositions de ces économistes écologiques sont en contradiction directe avec l'analyse post-keynésienne de la relation monnaie-croissance. Cette discussion critique sera conduite à partir de la théorie de la monnaie endogène et d'un modèle simple cambridgien-kaleckien où monnaie-dette et taux d'intérêt positif sont compatibles avec un économie stationnaire.

Le chapitre 3 examine la relation sociale à l'énergie au sein du régime d'accumulation fordiste et du capitalisme financiarisé et mondialisé qui s'est mis en place depuis les années 1970. L'objectif est d'identifier des ruptures dans les modalités d'usage de l'énergie qui accompagnent les transformations observées dans d'autres domaines. Pour cela, nous procédons à une analyse empirique et comparative de l'utilisation de l'énergie dans les principales économies à haut revenu (Allemagne, États-Unis, France, Japon et Royaume-Uni) entre 1950 et 2010. Le fordisme se caractérise par une utilisation extensive de l'énergie et une utilisation intensive du travail. Les forts gains de productivité de ce dernier sont

alimentés notamment par une augmentation rapide de la quantité d'énergie incorporée au processus de production. À partir de 1970, le ralentissement de la croissance de la quantité d'énergie coïncide avec le ralentissement de la productivité du travail et contribue à l'érosion du compromis social fordiste. L'émergence du néolibéralisme se traduit par une restauration de la part du capital dans le partage de la valeur ajoutée et s'accompagne, d'une part, d'une utilisation de plus en plus intensive de l'énergie, la productivité de celle-ci se mettant à augmenter fortement dans les principaux pays à haut revenu ; d'autre part, par la délocalisation de l'utilisation de l'énergie.

Le chapitre 4 prolonge le précédent au moyen d'une analyse économétrique de la relation PIB-CO2 pour la France de 1950 à 2013 en tenant compte de la rupture dans les régularités de l'accumulation du capital entre le régime d'accumulation fordiste et le régime d'accumulation néolibéral. L'analyse est menée au moyen d'une technique récente en co-intégration non linéaire asymétrique qui permet de tenir compte des tendances de court et de long terme et des asymétries possibles dans la relation. Ce chapitre indique que, dans les deux régimes, l'asymétrie joue en faveur de la croissance supérieure à sa moyenne de long terme dont les effets sont sensiblement plus élevés que ceux d'une croissance inférieure et cela à court comme à long termes. En outre, d'un point de vue théorique, la relation est mieux capturée en tenant explicitement compte des régimes d'accumulation comme le montrent les valeurs des coefficients et du terme à correction d'erreur. Enfin, la présence de co-intégration est cohérente avec l'absence de découplage absolu entre PIB et émissions de CO2.

Le chapitre 5 s'intéresse aux ambitions nationales en matière de réduction de gaz à effet de serre, dénommées *volontarisme carbone*, replacées dans le contexte du capitalisme globalisé et financiarisé contemporain. Ce chapitre permet d'esquisser une typologie des pays de l'OCDE et des BRICS du point de vue des facteurs hypothétiques du volontarisme carbone : la structure productive de l'économie, la position relative dans les chaînes globales d'émission de gaz à effet de serre, le niveau de revenu et de développement capitaliste, la demande politique d'environnement, la structure de classe des émissions de gaz à effet de serre et la financiarisation de l'économie. Les pays les moins volontaires sont ceux situés au début des chaînes globales de gaz à effet de serre et qui dépendent étroitement de leur secteur primaire. Ces pays affichent une faible demande politique d'environnement et une structure de classe des émissions plus inégale. Les pays les plus volontaires ont une demande politique d'environnement plus élevée, une structure de classe des émissions plus égalitaire, leur économie apparaît moins financiarisée et le secteur tertiaire y est plus important. Ces pays sont également importateurs nets d'émission de gaz à effet de serre.

Il est à noter que cette thèse passe sous silence un aspect important de la relation entre économie et carbone : les marchés de droits à polluer et la financiarisation du CO2. C'est un choix délibéré : s'il s'agit d'une problématique essentielle qui signale notamment l'avènement d'un capitalisme *vert* qui fait de la crise écologique une nouvelle sphère d'accumulation (KEUCHEYAN, 2017), il existait déjà nombre de travaux sur le sujet. La perspective adoptée dans les chapitres de la thèse est, elle, davantage nouvelle : comme il n'existe pas encore de littérature constituée à l'entrecroisement de l'Économie écologique, de l'Économie post-keynésienne, de l'École de la régulation et de l'Éco-marxisme, il m'a semblé plus enthousiasmant de m'engouffrer dans la brèche. En outre, cela permettait de conserver la cohérence du

prisme macroéconomique de la thèse.

Première partie

Capital, monnaie, soutenabilité : une discussion critique de l'Économie écologique

Introduction à la première partie

L'objectif de cette première partie est de discuter de façon critique, mais amicale, la littérature en Économie écologique sur les questions du capitalisme et du lien monnaie-croissance dans une perspective de soutenabilité. Le chapitre 1 s'inscrit dans le débat sur la possibilité d'un capitalisme stationnaire. Il analyse l'absence des rapports sociaux spécifiques du capitalisme dans les travaux de certains économistes écologiques au moyen d'exemples historiques de crise écologique et des théories éco-marxistes. Le chapitre 2 s'inscrit dans le débat autour de la possibilité d'un état stationnaire en présence de monnaie-dette et de taux d'intérêt positifs.

Ces deux chapitres composent un ensemble qui, de manière complémentaire, discute les thèses de certains économistes écologiques sur le capitalisme, la monnaie et la croissance. Ils traiteront notamment des divergences majeures avec les écomarxistes et les post-keynésiens. Certains économistes écologiques affirment la possibilité d'un capitalisme sans croissance ou concluent simplement que la question du capitalisme n'est pas pertinente. Les éco-marxistes, à l'inverse, en font une question centrale et font valoir qu'un capitalisme stationnaire est une contradiction dans les termes dès lors que l'on prend explicitement en compte ses rapports sociaux spécifiques. En matière monétaire, certains économistes écologiques affirment que la création de monnaie par la dette portant intérêt oblige à une croissance continue de la production car le remboursement des intérêts induit l'émission continue de monnaie nouvelle. Les post-keynésiens renversent la causalité et montrent que c'est la croissance de la production qui entraîne celle de la masse monétaire. La modélisation post-keynésienne permet également de montrer qu'un état stationnaire est compatible avec la monnaie-dette et un taux d'intérêt positif sous certaines conditions.

Plutôt que de procéder à une revue de littérature classique, nous avons donc fait le choix d'entrer directement en discussion avec les économistes écologiques sur les deux questions du capitalisme et du lien monnaie-croissance. En effet, la seconde partie de la thèse se place à l'entrelacs de plusieurs traditions théoriques dont la mise en dialogue n'est que récente et n'a pas encore produit un corpus de littérature suffisant pour une revue de littérature systématique. Il nous a donc paru plus intéressant de consacrer la première partie à des débats actuels mettant aux prises différentes traditions théoriques dans lesquelles s'inscrit ce travail de thèse. Cela permet, en outre, d'éviter l'aspect contemplatif des revues de littérature classiques consacrant de longues pages à l'énumération exhaustive des points de vue et résultats existants sur un sujet précis sans que l'auteur de la revue ne puisse réellement intervenir dans la discussion.

Cette première partie est également l'occasion de poser les jalons de l'approche macroéconomique,

historicisée et systémique que ce travail de thèse s'est efforcé d'adopter.

Le capitalisme et la soutenabilité : une critique éco-marxiste de l'Économie écologique

1.1 Introduction

Les limites planétaires — changement climatique, acidification de l'océan, couche d'ozone, nitrogène biogéochimique et cycle du phosphore, utilisation globale d'eau douce, changement de l'usage des sols, taux de perte de biodiversité, pollution chimique et concentration atmosphérique en aérosols — sont en passe d'être atteintes voire sont déjà franchies pour trois d'entre elles — le climat, la biodiversité et les cycles du nitrogène et du phosphore (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009). Bien qu'elles masquent d'importantes inégalités dans la distribution sociale et spatiale de la destruction des conditions environnementales de l'existence — qui désignent l'accès aux aménités environnementales et aux ressources naturelles (LAURENT, 2017) — ces tendances historiques posent la question de la compatibilité de notre système socioéconomique, le capitalisme, avec les limites écologiques. On définit le capitalisme comme un système socioéconomique où la propriété des moyens de production est privée et où la production est organisée afin de dégager un profit, c'est-à-dire d'accumuler du capital, selon une division sociale du travail entre producteurs décentralisés et reliés entre eux par des relations de marché. Les deux rapports sociaux fondamentaux du capitalisme sont donc le rapport marchand et le rapport salarial. Le rapport marchand désigne le fait de produire pour vendre afin de pouvoir subvenir à ses besoins. Le rapport salarial désigne le rapport de production entre capital et travail, le premier possédant les moyens de production, le second vendant sa force de travail en échange d'un salaire. Une séparation monétaire est donc introduite entre travailleur et outil de travail. Dans le mode de production capitaliste, ces rapports sociaux sont généralisés à l'ensemble de la production et définissent son organisation. Notre hypothèse est qu'ils

entraînent structurellement des dynamiques destructrices pour l'environnement même si cela ne signifie pas que le capitalisme s'effondrera demain ni qu'il soit impossible de le rendre davantage soutenable. Ils doivent donc être au cœur d'une analyse des liens économie-environnement.

Malgré les tendances historiques mentionnées ci-dessus, la question du capitalisme n'a pas fait l'objet en Économie écologique d'un traitement systématique et d'une élaboration théorique. Pourtant, le projet épistémologique de l'Économie écologique est de produire un savoir économique qui tiennent pleinement compte de l'encastrement de la société et de l'économie dans la nature (VICTOR, 2008). À titre d'exemple, une courte recherche bibliométrique avec le mot clef *capitalism* pour le journal *Ecological Economics* dans la base de données *Science Direct* renvoie vers 206 articles sur les 131 volumes que compte la revue à date de septembre 2016. Nous notons toutefois à partir de 2009 une augmentation du nombre annuel d'articles avec ce mot-clef : entre 10 et 15 jusqu'à 2016 alors que nous n'en comptons que de 4 à 8 sur la période 1998-2007¹. Un rapide examen de quelques livres importants du champ confirme le constat : le mot apparaît dix fois index inclus dans le recueil de 385 pages édité par KRISHNAN *et al.* (1995) réunissant les résumés des articles fondateurs de l'Économie écologique. L'introduction à l'Économie écologique de COMMON et STAGL (2005) ne contient aucune occurrence du mot en 560 pages, lequel apparaît huit fois au cours des 328 pages de l'introduction de COSTANZA, CUMBERLAND *et al.* (2015), dont quatre fois dans des références bibliographiques. Le terme apparaît huit fois en 260 pages dans le *Managing without growth* de VICTOR (2008), dont trois fois dans des références bibliographiques et il ne figure pas à l'index. Enfin, le manuel de DALY et FARLEY (2010) affiche treize mentions en plus de 500 pages, dont onze dans des titres de références bibliographiques. Chacun de ces ouvrages inclut bien sûr des discussions critiques du développement, de la croissance ou du commerce international. Cependant, aucun n'adopte une perspective systémique reliant chacun de ces aspects au mode de production capitaliste ni n'inclut par conséquent une discussion de ce mode de production dans une perspective écologique.

Proposer une explication de ce constat n'est pas l'objet de ce chapitre mais on peut néanmoins s'interroger sur ses raisons. Peut-être une partie de l'explication réside-t-elle dans le contexte historique : l'Économie écologique comme champ disciplinaire à part entière émerge à la fin des années 1980 et au début des années 1990, à une période où il était particulièrement difficile d'envisager un discours critique sur le capitalisme. Une autre partie de l'explication réside sans doute dans la pensée de certains inspirateurs de l'Économie écologique comme Nicolas Georgescu-Roegen, Herman Daly ou Joan Martinez-Alier, qui reprochaient au marxisme de considérer la nature comme un don gratuit à l'instar de l'Économie néoclassique (BURKETT, 2004). Comme nous le verrons, les travaux d'histoire environnementale laissent pourtant peu de doute sur les origines capitalistes de la crise écologique contemporaine. Ils invitent à déconstruire les récits naturalisants et anhistoriques de cette dernière et à dépasser la critique de la croissance elle-même pour interroger plus fondamentalement l'entité socioéconomique qui la génère.

Néanmoins, la question du capitalisme n'est pas totalement absente des travaux menés par les économistes écologiques. Elle a notamment été abordée dans le cadre d'une controverse entre ces derniers et des économistes et sociologues éco-marxistes autour de la possibilité d'un capitalisme stationnaire, autrement dit la possibilité qu'une économie soutenable soit une économie capitaliste (BELLAMY FOSTER,

1. *Science Direct* ne renvoie pas les chiffres par année au-delà de 1998 mais indique que le nombre total d'articles avec le mot-clef *capitalism* est de 38 de 1989 à 1997, soit une moyenne de 5 par an.

2015a,b; BLAUWHOF, 2012; DALY, 2010; T. JACKSON, 2011, 2015; LAWN, 2011; R. SMITH, 2010a,b). La position des économistes écologiques examinés ici est qu'un capitalisme stationnaire est possible ou que la question du capitalisme n'est simplement pas pertinente. Selon nous, de telles positions ne sont tenables qu'à condition de passer outre ce qui fait la spécificité historique du capitalisme : ses rapports sociaux propres, le rapport marchand et le rapport salarial.

La problématique de ce chapitre est donc de faire ressortir la nécessité d'une approche systémique et historique qui tienne pleinement compte des rapports sociaux spécifiques à ce mode de production. Pour cela, nous opérons d'abord un détour historique pour mettre en perspective du temps long l'importance de les prendre en compte (section 1.2). Nous abordons ensuite dans la section 1.3 la controverse entre économistes écologiques et éco-marxistes pour expliciter l'incomplétude du cadre analytique des premiers. Enfin, la section 1.4 discute certains apports de la théorie éco-marxiste à l'analyse des liens économie-environnement.

1.2 De l'île de Pâques au changement climatique : naturalisation des crises écologiques et capitalisme

Cette section propose une mise en perspective historique de la crise écologique contemporaine. Pour cela, on déconstruit les explications universelles des crises environnementales en forme de métaphore de l'île de Pâques que l'on retrouve dans les récits dominants des transitions énergétiques du capitalisme. La mise en miroir de la métaphore de l'île de Pâques et de ces récits permet, d'une part, de montrer qu'ils ne peuvent s'appliquer à une société pré-capitaliste et, d'autre part, qu'ils traduisent mal les processus ayant mené aux énergies fossiles dans le capitalisme. Pour autant, il ne s'agit pas d'entretenir le mythe d'une harmonie totale entre l'humain et la nature qui aurait perduré jusqu'aux débuts du capitalisme : il est bien évident que l'espèce humaine n'a pas attendu l'époque moderne pour altérer son environnement. Nous étayerons simplement l'idée que la crise écologique actuelle est historiquement située : elle ne peut s'appréhender comme l'aboutissement d'une trajectoire linéaire des rapports entre l'humain et son environnement mais est au contraire un produit des rapports sociaux du mode de production capitaliste.

1.2.1 Anthropocène et écocide

Notre propos s'inscrit donc à rebours du récit en termes d'anthropocène (CRUTZEN, 2002). Le concept d'anthropocène est intéressant car il implique un dépassement du dualisme société (ou économie) - nature (MOORE, 2015). Toutefois, le récit dominant qui en est fait tend à passer outre les relations sociales constitutives de toute société qui modifient les conditions mêmes d'existence du genre humain et son rapport à l'environnement (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016; MALM et HORNBORG, 2014). Celui-ci fait de « l'entreprise humaine » (W. STEFFEN, CRUTZEN *et al.*, 2007, p. 614) le moteur de la destruction environnementale depuis l'apparition de l'espèce. L'histoire y est linéaire, déterministe et dominée par les sciences naturelles : l'humanité forme un tout indifférencié, uniforme et homogène comme un agent représentatif. En d'autres termes, le récit dominant de l'anthropocène « dépolitise et naturalise notre géohistoire plus qu'il ne permet de la comprendre ou de l'expliquer » (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016, p.

14). L'ère de la « géologie du genre humain », pour reprendre le titre du bref article de CRUTZEN (2002), aurait débuté à la fin du XVIII^e siècle au moment de l'invention de la machine à vapeur. Néanmoins, contrairement aux approches historiques sur lesquelles nous nous appuyons plus loin, la perspective dominante de l'anthropocène place ce dernier en continuité directe de *l'entreprise humaine* qui aurait débuté des milliers d'années plus tôt : la maîtrise du feu « nous ancrera fermement dans la voie menant à l'anthropocène » (W. STEFFEN, CRUTZEN *et al.*, 2007, p. 614). Cela entraîna un changement de régime alimentaire qui permit l'évolution du corps et du cerveau, laquelle mena à l'apparition du langage et de l'écriture, autorisant ainsi la communication et le partage de la connaissance. De là émergèrent les processus d'innovation et d'apprentissage et la civilisation moderne (W. STEFFEN, CRUTZEN *et al.*, 2007; W. STEFFEN, GRINEVALD *et al.*, 2011). Ainsi, dès lors que l'humain acquit une supériorité technique décisive sur le reste du vivant, l'histoire de la relation à son environnement eut été déterminée :

« Avant l'usage répandu des énergies fossiles, les sources d'énergies disponibles pour l'être humain étaient très limitées. L'énergie hydraulique et éolienne n'étaient disponibles que dans certains endroits favorables, et seulement dans les sociétés où les technologies des moulins à eau et à vent et de la voile avaient été développées ou importées. L'énergie musculaire tirée des animaux, et à travers eux des plantes, était limitée par les terres arables, souvent par des pénuries d'eau et partout par des inefficacités biologiques indépassables : la photosynthèse des plantes capte moins d'un pour cent de l'énergie solaire arrivant sur Terre, et les animaux se nourrissant de ces plantes ne gardent qu'environ un dixième de l'énergie chimique qui y est stockée. Tout cela résultait sur un goulot d'étranglement pour la population humaine, l'économie globale et la capacité de l'humanité à façonner le reste de la biosphère et à influencer le fonctionnement du système Terre. L'invention (ou le raffinement) de la machine à vapeur par James Watt dans les années 1770 et 1780 et le tournant vers les énergies fossiles firent sauter ce goulot » (W. STEFFEN, CRUTZEN *et al.*, 2007, p. 616).

Auparavant, l'incapacité à faire sauter le goulot d'étranglement opposé par la nature aurait conduit à l'effondrement de certaines civilisations. Dans leur livre à propos de l'île de Pâques, BAHN et FLENLEY (1992) écrivent ainsi

« La personne qui abattit le dernier arbre put voir qu'il s'agissait du dernier. Mais elle l'abattit quand même. C'est ce qui est si effrayant. La convoitise de l'être humain est sans limite. Son égoïsme paraît être génétique. L'égoïsme conduit à la survie. L'altruisme conduit à la mort. Le gène de l'égoïsme gagne. Mais dans un écosystème limité, l'égoïsme conduit à augmenter les déséquilibres de population, à son effondrement et finalement, à l'extinction » (cité dans HUNT (2007, p. 486)).

DIAMOND (2006) a popularisé et généralisé ces thèses en expliquant que l'effondrement des sociétés découle d'une séquence écocide *expansion - surexploitation - (possible) effondrement*. Cette séquence se manifeste par la déforestation et la restructuration des habitats naturels, l'épuisement des sols, une mauvaise gestion de l'eau, une chasse et une pêche excessives, une croissance démographique, des espèces invasives, l'impact individuel des humains sur leur environnement, un changement climatique anthropique, l'utilisation d'énergies fossiles, l'appropriation humaine de la photosynthèse, des pollutions et des émissions de produits toxiques. Diamond mentionne aussi les changements climatiques naturels. Selon l'auteur, la résilience des sociétés, c'est-à-dire leur effondrement ou non, dépend des relations guerrières et commerciales avec les peuples voisins et de la réponse collective aux problèmes environnementaux. Diamond se défend ainsi de tout déterminisme. Néanmoins, les rapports sociaux

et l'organisation économique n'entrent véritablement en compte qu'au moment du dénouement — la réponse collective aux problèmes environnementaux et les relations de voisinage — mais ne déterminent pas la dynamique écocide, qui, elle, préexiste quelle que soit la société considérée.

Le cas de l'île de Pâques constitue l'archétype de cette séquence écocide et fournit la métaphore au cœur de l'imaginaire du récit dominant de l'anthropocène. Suivant ce cadre analytique, la spécificité de la crise environnementale actuelle réside donc dans des symptômes inédits plutôt que dans sa genèse, laquelle est le résultat de la même séquence écocide qui a mené à l'effondrement des sociétés anciennes étudiées par l'auteur. La civilisation pascuane se serait effondrée car la croissance démographique, au-delà de la capacité de charge de l'île, aurait eu raison des forêts *jusqu'au dernier arbre*. Cela aurait entraîné une disparition de la faune et de la flore et un épuisement des sols menant à l'effondrement de la société (DIAMOND, 1995). Pour déconstruire cette explication naturalisante des crises écologiques il est donc intéressant, dans un premier temps, d'examiner ce qui s'est vraiment passé chez les Pascuans.

L'île de Pâques : une fiction mythologique ?

La métaphore de l'île de Pâque semble découler d'une interprétation de l'histoire discutable plutôt que d'un savoir scientifique solidement établi. Davantage qu'une tendance naturelle de l'être humain à la destruction de son environnement, deux facteurs principaux paraissent avoir mené à la disparition de la civilisation pascuane : la prolifération des rats et l'arrivée des Européens.

La chronologie de la déforestation et de la colonisation de l'île indiquent que la période de déforestation n'est pas contemporaine d'un effondrement de la population humaine et n'y est pas associée comme dans le scénario diamondien (HUNT, 2007). Si la déforestation a commencé environ un siècle après la colonisation humaine de l'île, aux alentours de 1200, son étude dans le reste de la Polynésie suggère un autre modèle explicatif. Elle serait due à une prolifération de rats du Pacifique se nourrissant principalement de feuilles et de graines. Trouvant à leur arrivée une île abondante en certaines espèces végétales telles que le palmier *Jubaea*, les rats — dotés d'une fécondité exceptionnelle — se seraient reproduits à une vitesse exponentielle et destructrice pour l'écosystème de l'île. Ils en auraient alors bouleversé l'équilibre écologique jusqu'à la disparition des forêts. Bien sûr, il ne s'agit pas d'affirmer que les rats agissent seuls : l'abattage du bois et l'usage du feu causèrent des atteintes aux forêts de l'île et il n'y eut pas de période prolongée où les populations de l'île n'eurent aucun impact sur leur environnement. D'ailleurs, Diamond inclut bien les espèces invasives dans sa liste de facteurs provoquant l'effondrement des sociétés et il évoque le rôle des rats dans la destruction de l'environnement pascuan. Néanmoins, leur prolifération semble bien ici le facteur premier et non un facteur résiduel à côté d'abus humains : la recherche hawaïenne a montré que les rats pouvaient entraîner la déforestation de larges aires côtières en moins de deux siècles. Or, la majorité des plantes éteintes de l'île de Pâques étaient vulnérables aux rats et les fluctuations climatiques naturelles n'ont pas joué de rôle significatif dans le déclin ou l'extinction de la végétation de l'île (*ibid.*).

De plus, il n'existe pas de preuve d'un épuisement des sols d'une mesure suffisante pour affecter la production agricole. Certaines régions connurent une diminution de l'intensité de l'usage des sols avant les premiers contacts avec les Européens en 1722 — ce qui peut avoir mené à des conflits lors de la

renégociation de l'usage des sols dans d'autres parties de l'île. Cependant, cela reflète sans doute plus une contrainte qu'une dégradation environnementales. Enfin, il y eut une continuité démographique au-delà de la période de déforestation, jusqu'à la rencontre avec les Européens. Tout cela conduit à remettre en cause la notion d'effondrement comme un concept analytique utile pour comprendre la destinée des Pascuans, du moins jusqu'à leur rencontre avec les Occidentaux (STEVENSON *et al.*, 2015).

Se dessine donc une autre image que celle d'un être humain naturellement disposé à abîmer son environnement jusqu'au *dernier arbre* et sa propre extinction : il s'agit plutôt d'une dialectique complexe entre une population humaine et son milieu ayant perduré plusieurs siècles. Cette dialectique fut seulement interrompue par un facteur exogène, l'arrivée des Européens. La rencontre avec ces derniers, synonyme de contamination par des maladies inconnues et d'esclavage, fut fatale à la population pascuane (HUNT, 2007) : sa disparition est donc « sans doute moins du fait d'un suicide environnemental que d'un crime colonial » (FREZZOZ, GRABER *et al.*, 2014, p. 92). DIAMOND (2006) raconte d'ailleurs comment les Pascuans furent déportés en esclavage jusqu'en 1863.

La métaphore de l'île de Pâques constitue, en outre, « une projection des valeurs occidentales qui insistent sur l'autodestruction de la culture Rapa Nui par rapport à sa quasi-annihilation par les Occidentaux. » (VAN TILBURG (1994), cité dans HUNT (2007, p. 498)). Universalisée, elle conduit alors à un impensé : que le destin des sociétés ne soit pas déterminé par un facteur transhistorique — une *nature humaine* supposée, calquée sur la rationalité occidentale du capitalisme amenant à l'expansion, à la surexploitation voire à l'effondrement faute de réponse collective — mais dépende de facteurs socioéconomiques historiquement situés. Cet impensé est porteur d'ethnocentrisme et d'anachronisme car la mise au travail de la nature dans le capitalisme et les rapports sociaux qui la sous-tendent sont propres à ce mode de production : ils ne peuvent être projetés de façon universelle dans l'espace et dans le temps.

De l'île de Pâques à la Révolution industrielle : la rationalité capitaliste universalisée

Comme la métaphore de l'île de Pâques, l'historiographie dominante de l'adoption des énergies fossiles s'inscrit dans une vision linéaire et déterministe de l'histoire. Cette adoption s'opéra lorsque le charbon devint la force motrice primaire dans la Grande-Bretagne du jeune capitalisme industriel. Émergea alors *l'économie fossile* (MALM, 2013) : l'économie fondée sur la combustion du carbone fossilisé sous ses différentes formes comme énergie première pour actionner les machines industrielles et nourrir la croissance de la production. Ce moment marque la genèse du changement climatique. La figure 1.1 montre la consommation d'énergie pour l'Angleterre, l'Allemagne et la France tout au long du XIX^e siècle et la figure 1.2 page ci-contre montre leurs émissions de CO₂ depuis 1751 jusqu'à 1900. Sans surprise, les trajectoires des courbes des deux graphiques sont extrêmement similaires.

Cette historiographie s'appuie sur un cadre théorique ricardien-malthusien : l'expansion économique était limitée par les sources d'énergies traditionnelles et renouvelables telles que la nourriture (via la force humaine et animale), le bois, l'eau et le vent. L'augmentation de la fourniture de ces ressources se heurtait à des rendements décroissants liés à la rareté croissante des terres les plus fertiles et des bons emplacements en bord de rivière, malgré des progrès technologiques qui pouvaient périodiquement et

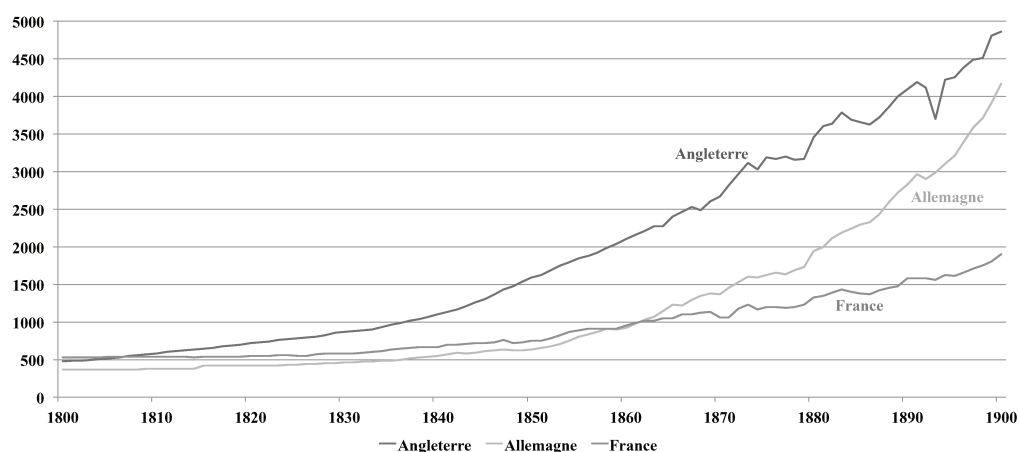


FIGURE 1.1 – Consommation totale d'énergie de l'Angleterre, de l'Allemagne et de la France de 1800 à 1900. Unité : pétajoules. Source : KANDER *et al.* 2013 et ENERGY HISTORY.

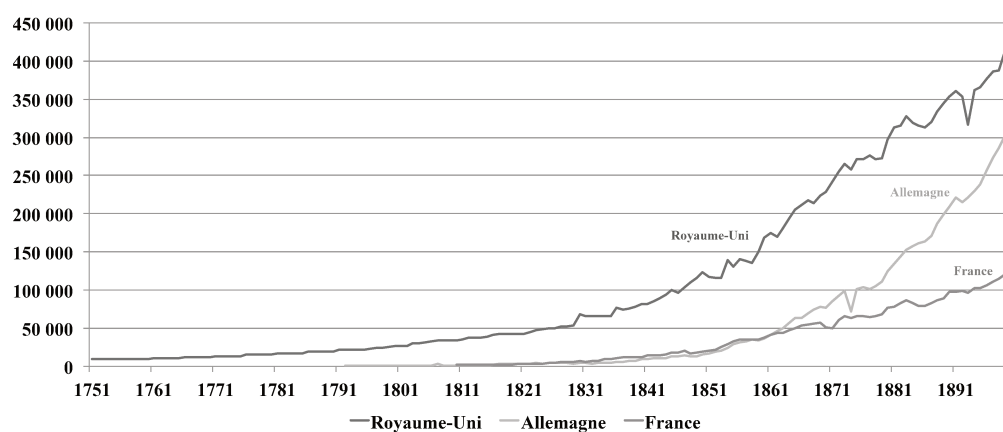


FIGURE 1.2 – Émissions de CO2 du Royaume-Uni (depuis 1751), de l'Allemagne (depuis 1792) et de la France (depuis 1810) pendant la Révolution industrielle. Unité : milliers de tonnes de CO2. Source : BODEN *et al.*, 2016.

provisoirement infléchir la tendance. De plus, la fourniture d'énergie ne pouvait suivre l'augmentation constante de la population, amenant à une diminution de la quantité d'énergie disponible par tête pour tous les supports énergétiques sauf la nourriture. L'aboutissement de ces dynamiques devait donc être la stagnation des profits et des salaires. C'était sans compter sur le progrès technique et la découverte des moyens d'utiliser le charbon comme force motrice à travers l'engin à vapeur à la fin du XVIII^e siècle, qui permit de s'émanciper des énergies renouvelables utilisées jusqu'alors. Ainsi la croissance économique continue et auto-entretenu devint-elle possible (KANDER *et al.*, 2013; WRIGLEY, 1962, 1988).

On retrouve dans cette analyse les trois temps du récit diamondien. Les temps de l'expansion et de la surexploitation : la population et les besoins croissants impliquèrent une insuffisance des ressources renouvelables pour faire face à la demande nouvelle. Le temps de la réponse collective qui détermine l'effondrement ou la survie : la stagnation des profits et des salaires et un possible effondrement ne

furent évités que par l'adoption d'une ressource fossile disponible en abondance, le charbon. Ainsi, conformément à la logique diamondienne, la particularité du destin des sociétés anglaise et européenne du capitalisme industriel naissant ne repose pas sur une organisation socioéconomique spécifique, mais dans le dénouement. Ici, la réponse collective des sociétés fut l'adoption du charbon et mena à la prospérité. Là-bas, elle avait été l'*abattement du dernier arbre* et mena à l'effondrement. Dans les deux cas le même facteur transhistorique est toujours à l'œuvre : une *nature humaine* postulée, incarnée dans l'*entreprise humaine* qui pousse à l'expansion constante de la production et de la population. Dans le récit ricardien-malthusien-diamondien l'entreprise humaine n'est limitée que par la nature extra-humaine dans un dualisme théorique propre à la rationalité capitaliste². Dans cette perspective, l'énergie fossile libéra l'être humain de la contrainte environnementale en permettant de s'émanciper du temps de la photosynthèse, des aléas du vent et des caprices de l'eau. Les désirs réfrénés d'accumulation furent alors libres de se matérialiser, donnant lieu au formidable essor économique qui prit corps avec la Révolution industrielle.

On mesure pleinement la puissance idéologique de cette conception de l'humain et de l'histoire si on la pose en miroir de la fable du troc popularisée par Adam Smith (GRAEBER, 2011) : l'invention de la monnaie aurait libéré la nature marchande de l'être humain en facilitant les échanges, auparavant menés dans des économies de troc où la nécessaire correspondance des besoins de chaque partie impliquée dans les transactions les limitait considérablement. Les recherches historiques et anthropologiques ne mirent jamais au jour de sociétés de troc. Elles ont montré que la monnaie découle de la dette et non de l'échange. La fable du troc demeure pourtant la thèse populaire pour expliquer son apparition — en particulier dans les manuels d'économie (GRAEBER, 2011 ; HUDSON, 2002 ; TESTART, 2001). La métaphore de l'île de Pâques, la trame ricardienne-malthusienne et la fable du troc forment ainsi un tout complémentaire : libérés par la monnaie puis le charbon, le marchand et l'accumulateur se rencontrent enfin dans le mouvement irrésistible de l'entreprise humaine intemporelle. Dans la mythologie ainsi formée, la rationalité capitaliste devient un trait naturel de l'être humain en tout lieu et en tout temps. Toutes les sociétés humaines des origines à aujourd'hui peuvent dès lors s'appréhender sous cet angle et la séquence écocide peut être universalisée, de l'île de Pâques des temps anciens à la Grande-Bretagne du jeune capitalisme industriel. La conception idéologique de l'agent accumulateur et marchand devient vérité scientifique et il ne peut exister, alors, de spécificité historique à la crise écologique actuelle qui n'est que l'aboutissement de l'anthropocène.

Parce qu'elle participe de cette mythologie, l'explication ricardienne-malthusienne du passage à l'énergie fossile pendant l'industrialisation de l'Europe n'est pas plus satisfaisante que l'explication écocide de la disparition des Pascuans. Bien sûr, l'adoption des énergies fossiles fait suite à une longue série d'évolutions techniques visant entre autres à répondre aux pénuries d'énergie, de terre et de ressources (DEBEIR *et al.*, 2013). Cependant, elle ne peut s'interpréter selon une perspective purement évolutionniste et linéaire qui naturalise le passage aux énergies fossiles : « l'agir géologique de l'espèce humaine est le fruit de processus culturels, sociaux et historiques » (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016, p. 84).

2. Ce dualisme économie-nature n'est pas à proprement parler une invention contemporaine du capitalisme : la distinction entre nature et culture remonte à la Grèce antique (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016). La nouveauté réside dans son articulation avec la société de marché et avec les rapports sociaux capitalistes. Cela engendre une mise au travail spécifique de la nature qui ne se retrouve pas dans les sociétés pré-capitalistes (DELÉAGE, 1989 ; MOORE, 2015 ; POLANYI, 2009).

L'histoire de l'énergie

« n'était pas écrite à l'avance : les transitions/additions n'obéissent ni à une logique interne de progrès technique (les premières machines à vapeur étaient très coûteuses et très inefficaces), ni à une logique de pénurie et de substitution (les États-Unis, qui possèdent d'immenses forêts, recourent massivement au charbon au XIX^e siècle), ni même à une logique qui serait simplement économique. L'histoire de l'énergie est aussi et surtout celle de choix politiques, militaires et idéologiques qu'il faut analyser en historien, c'est-à-dire en les rapportant aux intérêts stratégiques de certains groupes sociaux » (ibid., p. 128).

Nous le verrons, cette dimension est totalement absente du cadre d'analyse des économistes écologiques que nous mentionnons dans ce chapitre. De même, l'explication ricardienne-malthusienne ne tient pas compte des rapports sociaux ayant pu engendrer cette transition autrement que sous la forme des droits de propriété — perçus comme nécessaires à l'essor de la croissance (BARCA, 2011) : revient alors l'impossibilité de penser les transitions énergétiques comme des processus sociaux. Ces auteurs n'envisagent pas les sociétés comme des systèmes énergétiques spécifiques, c'est-à-dire comme un ensemble interdépendant de dispositifs techniques permettant de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Ces dispositifs émergent à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux particuliers qui se développent et se renforcent par le contrôle qu'ils exercent sur le système énergétique. Ce dernier n'est donc en définitive que le mode de production vu au prisme de l'énergie (DEBEIR *et al.*, 2013 ; TANURO, 2012) et n'est jamais discuté en tant que tel chez les économistes écologiques évoqués.

1.2.2 Aux origines capitalistes du changement climatique

Le schéma linéaire de l'anthropocène ne peut s'appliquer à une société pré-capitaliste telle que l'île de Pâques : il constitue une projection ethnocentrée et anachronique sur l'histoire des Pascuans. Il s'applique également mal aux sociétés capitalistes car l'adoption des énergies fossiles n'est pas le fait de *l'entreprise humaine* mais d'une classe sociale particulière. Pour le comprendre, nous devons nous déplacer dans l'espace et dans le temps, vers les vertes prairies de la campagne anglaise et les hauts venteux de la lande écossaise de la révolution industrielle adolescente : c'est entre 1820 et 1840 que s'effectua la transition vers le charbon comme principale énergie motrice. On s'appuie largement ici sur les travaux d'Andreas MALM (2013, 2014, 2016) qui font suite à ceux de BARCA (2011), DEBEIR *et al.* (2013) et MITCHELL (2009, 2013). Ces travaux déconstruisent d'abord les explications habituelles de la transition vers le charbon qui mettent en avant une dynamique ricardienne, des raisons techniques et le prix relatif du charbon. Ils proposent ensuite une autre explication : la transition vers l'énergie carbonée serait le fruit des relations de concurrence et du rapport salarial que cristallisa l'industrie du coton. L'énergie hydraulique qui la propulsait nécessitait en effet une gestion coopérative impossible entre capitalistes concurrents et renforçait le pouvoir de négociation des travailleurs.

Pour WRIGLEY (1962) l'industrie du coton n'est pas représentative du processus d'ensemble dans la mesure où son usage du charbon était restreint et que son développement à grande échelle pouvait se poursuivre assez longtemps sans poser de difficulté majeure en termes de matière première. Les développements subséquents des transports terrestres et de force motrice, en particulier de la machine

à vapeur, ne seraient donc pas liés à l'industrie du coton. Plusieurs raisons justifient au contraire de s'y intéresser particulièrement. Le coton était d'abord l'industrie principale du capitalisme industriel naissant. L'industrie cotonnière amena de nouvelles technologies, une nouvelle organisation du travail, des gains de productivité et des taux de profits élevés engendrant une accumulation de capital qui allait être réinvestie dans le développement industriel britannique. Cette industrie afficha les principaux taux de croissance jusque tard dans le XIX^e siècle et c'est par elle que la croissance continue de l'économie arriva avant de se répandre dans les autres secteurs — comme le montre la figure 1.3. Autrement dit, c'est par cette industrie que le processus d'industrialisation s'amorça : elle fut donc le lieu de cristallisation d'un certain nombre d'enjeux autour des énergies motrices utilisées et de la transition vers l'économie fossile (R. V. JACKSON, 1992 ; MALM, 2016).

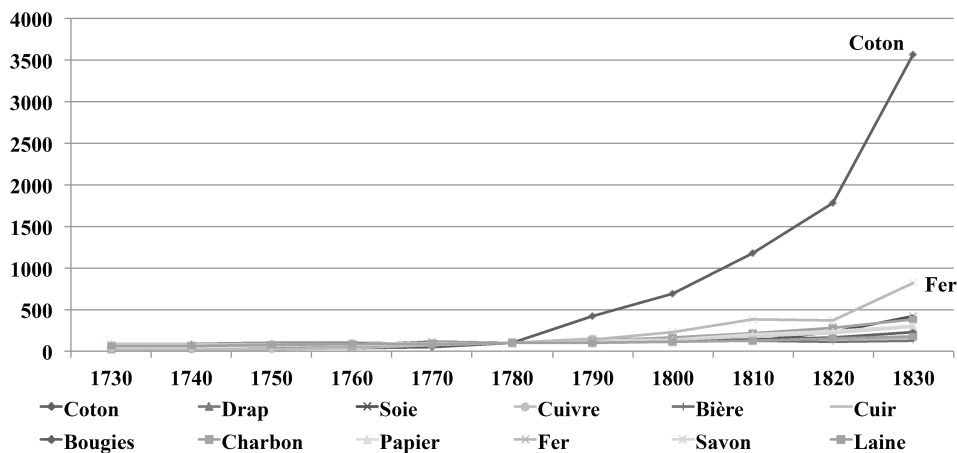


FIGURE 1.3 – Production industrielle par secteur en Grande-Bretagne de 1730 à 1830 ; base 100 en 1780. Sources : graphique adapté de MALM (2016) à partir des données de JACKSON (1992).

De plus, c'est véritablement l'industrie du coton qui assura à la machine à vapeur son envol et son adoption comme la force motrice première de l'économie. Près d'un tiers des machines à vapeur installées par Watt & Bolton en 1800 l'était dans le coton, faisant de ce secteur le plus important pour la mise en place de ces engins. L'eau restait néanmoins, de très loin, la première énergie motrice de cette industrie (MALM, 2013, 2016 ; WRIGLEY, 1962). Comme l'explique STEINBERG (1986, p. 273) cité dans BARCA (2011, p. 1312) :

« Les rivières et non les engins à vapeurs devraient être le centre de l'attention pour étudier les débuts de l'industrialisation. Une nouvelle technologie et une nouvelle culture matérielle évoluèrent pour exploiter plus efficacement les ressources des rivières. Le système légal changea également, encourageant l'utilisation de l'eau pour plus d'énergie et de profits. Ces développements étaient tous partie intégrante d'un long processus par lequel la nature fut de plus en plus considérée comme un ensemble distinct de marchandises — fait de bois, de terre et d'eau. La révolution industrielle redéfinit l'environnement : c'était à présent une vaste "ressource naturelle". »

Ce sont les convertisseurs anciens améliorés qui permirent l'avènement de la grande industrie : bien avant l'adoption du charbon, la production textile en Angleterre fut multipliée par neuf entre 1760

et 1787. L'accumulation primitive de capital industriel dans la Grande-Bretagne de la fin du xviii^e siècle et du jeune xix^e siècle eut donc une ressource renouvelable, l'eau, comme force motrice. En France également l'énergie hydraulique fournit la base énergétique de la première révolution industrielle (DEBEIR *et al.*, 2013). L'histoire n'en n'étant pas à une ironie près, cette première phase d'accumulation fut donc *écologique*. Cela confirme que l'industrie du coton pouvait opérer sans mal en s'appuyant sur une autre énergie que le charbon, du moins jusqu'au point où la demande exigerait de surpasser les capacités offertes par l'eau. Mais ces capacités furent-elles exploitées jusqu'à la limite de leur développement ?

Les insuffisances des explications traditionnelles de la transition vers l'énergie carbonée

Les données historiques indiquent en premier lieu que le raisonnement ricardien est fragile : jamais il n'y eut d'épuisement des emplacements possibles en bord de rivière pour installer des moulins et des roues à eau. Comme le montre MALM (2013) en croisant plusieurs sources, en 1838, alors que la transition au charbon était bien avancée dans l'industrie cotonnière, une petite partie seulement des emplacements possibles avait été utilisée pour installer des roues et des moulins à eau afin de produire du coton. Ainsi la proportion d'emplacements utilisés oscillait-elle entre 0,8 et 7,2% le long des rivières desservant les principales régions cotonnières anglaises. Il en ressort que l'énergie hydraulique aurait pu être développée bien davantage sans surcoût particulier. En Écosse, le constat est le même, le potentiel hydraulique n'ayant jamais été pleinement exploité. Autrement dit, il n'y eut jamais de limite physique à la disponibilité d'eau à bas coût.

En second lieu, les données indiquent que la transition de l'eau au charbon ne fut pas motivée par des raisons techniques. Dans les années 1820, la puissance moyenne délivrée par les roues à eau et les machines à vapeur dans l'industrie cotonnière était d'environ 20 chevaux-vapeurs. Cependant, les machines les plus puissantes étaient toujours celles actionnées par l'eau et non par le charbon : ces dernières atteignaient rarement 60 chevaux-vapeurs quand les premières pouvaient atteindre des puissances allant de 300 à 500 chevaux-vapeurs. Cette suprématie en termes de puissance se poursuivit jusqu'en 1840, époque à laquelle les possibilités de développement de la puissance hydraulique étaient loin d'être épuisées. La puissance des machines à vapeur surpassa celle des machines actionnées par l'eau dans la deuxième moitié du xix^e siècle, à une période où la transition vers le charbon était terminée depuis longtemps (*ibid.*).

La transition énergétique de l'industrie cotonnière peut-elle, alors, s'expliquer par les prix relatifs de l'eau et du charbon ? Les données historiques indiquent que l'eau fut longtemps moins chère que le charbon et assura une rentabilité longtemps supérieure, même en tenant compte de l'investissement initial en équipements hydrauliques, de la location des terrains où ils étaient installés, des coûts de maintenance etc. Les archives montrent ainsi que l'eau fut sensiblement meilleur marché que le charbon jusqu'en 1870 au moins, soit bien longtemps après la transition énergétique. En 1840, c'est-à-dire à la fin de la transition vers le charbon, un cheval-vapeur de puissance généré par ce dernier revenait en moyenne à 86 livres contre 59 livres pour un cheval-vapeur généré par l'énergie hydraulique (*ibid.*).

Il apparaît, dès lors, que la transition de l'énergie hydraulique vers l'énergie carbonée comme force motrice première de l'industrie ne s'explique pas plus en termes de rentabilité économique qu'elle ne

peut l'être par des raisons techniques. Nous pouvons donc prendre Wrigley au mot et aller plus loin que lui : non seulement l'industrie du coton pouvait se développer longuement sans le charbon mais encore ne fut-elle en réalité *jamaïs* dépendante du charbon pour son expansion. Comment, alors, expliquer cette transition ?

De l'eau au charbon : les rapports de production capitalistes à l'origine de l'économie fossile

Les relations de concurrence entre capitalistes fournissent une partie de l'explication. L'approvisionnement en eau nécessitait des investissements substantiels dans l'infrastructure hydraulique pour assurer un flux continu et régulier d'énergie motrice aux fabriques installées le long des cours d'eau. Ces investissements devaient se faire en commun : un groupe de capitalistes cotonniers était supposé s'entendre pour financer les aménagements le long du cours d'eau fournissant l'énergie hydraulique. Cela requérait donc une structure adéquate, telle qu'une société *ad hoc* avec une mise initiale et des cotisations finançant notamment la maintenance des équipements. Ces sociétés étaient régies par des actes officiels émis par le Parlement, précisant notamment leur mode de gestion, la puissance totale délivrée ou les cotisations. La gestion de la ressource s'articulait autour d'assemblées générales, lieu des délibérations collectives des industriels participants avec un système de vote basé sur les cotisations de chacun. Gérée selon des principes démocratiques et régie par le pouvoir législatif, l'eau était donc, dans une certaine mesure, un commun. Cependant, la gestion commune s'accordait mal avec les intérêts particuliers de chacun des industriels car l'énergie échappait à leur contrôle individuel. Bientôt virent le jour des conflits autour de la répartition de l'énergie hydraulique, autour des aménagements supplémentaires, autour des cotisations ; les uns suspectant les autres d'agir pour leur nuire. Le charbon, à l'inverse, n'imposait aucune coordination ni coopération entre capitalistes cotonniers : il suffisait de s'en fournir autant que de nécessaire sur le marché, sans devoir rendre des comptes à l'État et encore moins à ses concurrents directs (MALM, 2016). En résumé, l'énergie hydraulique requérait un mode de fonctionnement en contradiction fondamentale avec les rapports de concurrence entre capitalistes.

Le rapport salarial entre capitalistes et travailleurs du coton constitue le second facteur qui conduit les industriels cotonniers à jeter leur dévolu sur le charbon. La contradiction au cœur de ces rapports se cristallisa autour de deux dimensions : l'espace et le temps. En termes d'espace, l'utilisation de l'eau comme énergie motrice obligeait à situer les fabriques en bord de rivière, dans des zones parfois non peuplées. L'installation de la fabrique se doublait donc de la construction d'habitats, d'un commerce et des lieux de socialisation basiques de l'époque (église ou chapelle etc.). Il fallait, en outre, faire venir les travailleurs jusqu'à la fabrique. En d'autres termes, le travail venait à l'énergie et non l'inverse. Cela ne posa pas de problème majeur au début de l'industrie cotonnière. Cependant, la contradiction devint apparente quand émergea le *travail organisé*³, les travailleurs du coton étant les plus revendicatifs. En 1830 — moment où la transition énergétique pris son essor — des grèves éclatèrent, touchant de plein fouet les fabriques de coton propulsées par l'énergie hydraulique. La répression qui s'en suivit se heurta à la difficulté de remplacer les ouvriers grévistes qui furent renvoyés (MALM, 2013, 2016). Surgit alors la nécessité d'accéder à une masse de travailleurs rompus au travail en usine et disponibles en quantité.

3. Pour reprendre l'expression de Ernest Everhard et ses camarades dans *Le Talon de fer* de Jack LONDON (2003).

Autrement dit, les besoins du capitalisme cotonnier imposèrent autant que possible de rendre l'offre de travail inélastique aux conditions de travail et de revenu. L'eau comme énergie ne s'y prêtait guère. À l'inverse, le charbon était transportable par chemin de fer sur des distances importantes, adapté au stockage et mobilisable à discrétion. Passer d'une ressource flux — l'eau — à une ressource stock — le charbon — permettait donc de renverser la nature de la relation spatiale entre énergie et travail : si le travail ne vient pas à l'énergie, l'énergie viendra au travail. Le charbon permit d'établir les fabriques au cœur des villes, là où se situait l'*armée de réserve*.

En termes de temporalité, bien que domptable au prix d'investissements substantiels et collectifs qui se heurtaient aux relations de concurrence entre capitalistes, l'eau imposait son rythme à la production, au gré des courants, de la météo et des périodes d'étiage. Il en résultait des interruptions fréquentes dans la fabrication du coton. Là encore, ce n'était pas problématique tant que cette production obéissait à la logique de la petite production marchande orientée vers des marchés et des besoins locaux. À l'inverse, quand la production marchande se généralisa — c'est-à-dire quand l'organisation propre au mode de production capitaliste se répandit et que la production eut pour but la réalisation du capital sur des marchés de plus en plus lointains et de plus en plus concurrentiels — le rythme de la production ne pouvait plus subir les aléas des éléments : la contrainte posée par le temps écologique de l'eau devint un obstacle à surmonter. Cela posait deux difficultés essentielles. La première était la fragmentation de la journée de travail : pour respecter les standards en vigueur dans la première moitié du XIX^e siècle, les travailleurs devaient étaler leurs 12 heures minimum de travail quotidien entre tous les moments du jour et de la nuit, selon des rythmes variables obéissant à la disponibilité de l'eau. Ces conditions de travail furent à l'origine des grèves et de revendications telles que la journée de 10h, impensable aux yeux des capitalistes cotonniers. Quand la journée de dix heures fut finalement accordée, en 1848, la transition vers le charbon était déjà terminée. La deuxième difficulté était que la production ne pouvait être accélérée ou ralentie à discrétion selon les besoins. En permettant une journée de travail continue dont le rythme pouvait être modifié à discrétion, le charbon offrait aux capitalistes le moyen de résoudre ces deux difficultés.

Là où la spatialité de l'eau impliquait un rapport salarial plus difficile pour le capital, celle du charbon permit aux capitalistes d'accéder à l'armée de réserve des villes. Là où la temporalité de l'eau dictait le temps économique de la production, le temps figé du charbon permit à celui-ci de devenir son propre maître. La voie était ouverte pour que le temps abstrait du capital devint le métronome des temps concrets de la nature et de la vie sociale.

Bien sûr, on peut objecter à ce qui précède que d'autres industries, celles qui requièrent des températures très élevées telle la métallurgie, seraient venues au charbon quoi qu'il arrive et donc que l'explication par l'industrie cotonnière est insuffisante. D'abord, celle-ci ne constitue pas une explication unique : il est vrai que l'adoption du charbon fait suite à une longue suite d'innovations énergétiques qui visaient notamment à résoudre certaines pénuries. Néanmoins, le constat *a posteriori* de l'utilisation du charbon dans les industries lourdes ne fournit aucune explication de la transition *vers* cette énergie (MALM, 2016), sinon une explication téléologique qui n'informe pas sur les *modalités* de cette transition. C'est, en outre, sous-estimer le choix décisif fait par l'industrie cotonnière, qui constitua véritablement

le « rite de passage » (MALM, 2013, p. 20) pour la machine à vapeur comme force motrice première de l'industrie. Si l'eau avait été préférée au charbon comme source primaire d'énergie, il est possible que l'économie eut suivi un sentier de développement complètement différent : les connaissances pour un usage industriel et domestique des énergies renouvelables comme force motrice ou source de chaleur, en particulier l'énergie solaire, connurent un fort développement à partir du XIX^e siècle jusqu'au début du XX^e siècle. Émergea alors un ensemble de techniques souvent présentées aujourd'hui comme des découvertes récentes. L'histoire des énergies renouvelables est d'abord celle « de lignées techniques négligées et de potentialités non advenues » (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016, p. 131), à cause de choix au moins autant politiques et idéologiques que techniques ou économiques (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016; TANURO, 2012).

Du charbon au pétrole : l'approfondissement de l'économie fossile

L'histoire ne s'arrête bien sûr pas là. Au mitan du vingtième siècle l'économie fossile va muter : le pétrole allait devenir la forme énergétique dominante, sans toutefois que le charbon soit abandonné⁴. Les raisons de cette mutation sont au centre du chapitre 3. Le charbon permit, en Europe, à ses travailleurs et à ceux des secteurs associés comme le chemin de fer de faire avancer un certain nombre de revendications socio-politiques à l'origine de l'émergence des démocraties occidentales (DEBEIR *et al.*, 2013; MITCHELL, 2009, 2013). À l'inverse, le pétrole était beaucoup moins sujet à intervention humaine et était disponible en abondance et à bas coût jusqu'aux chocs pétroliers de 1973 et 1979. Il était aussi beaucoup plus aisément transportable sur des milliers de kilomètres, par oléoducs et voies maritimes. Il permit donc de casser le pouvoir des travailleurs du charbon. Il était également bien adapté à la mobilité naissante du capital après 1971 et la chute de Bretton Woods. De là allait émerger le *great doubling*, soit le doublement de la force de travail mondiale résultant de la globalisation et des ouvertures à l'économie de marché des anciennes économies soviétiques (FREEMAN, 2007). De ce fait, l'énergie fossile tirée du pétrole permit aussi les conditions de mise en concurrence des travailleurs du monde entier et s'avéra l'un des moyens de rétablir des taux de profits déclinant pendant les Trente glorieuses. Enfin, le pétrole permit un approfondissement sans précédent de l'économie fossile, via la diffusion des normes de consommation de masse — dont la voiture individuelle constitue sans doute le symbole le plus éclatant — d'abord en Occident puis progressivement dans les pays de la périphérie du capitalisme à mesure qu'y émergeait une nouvelle classe moyenne (KOCH, 2011). Comme l'étayeront les développements du troisième chapitre, de l'eau au charbon et du charbon au pétrole les transitions énergétiques du capitalisme trouvèrent dans une large mesure leurs origines dans les rapports sociaux spécifiques à ce mode de production. Les conceptions purement utilitariste et évolutionniste des transitions énergétiques ne peuvent donc en saisir les dimensions fondamentales (BARCA, 2011).

Le détour historique que nous venons d'opérer offre une première réponse à notre problématique. Il montre la nécessité d'une approche tenant compte des rapports sociaux propres au capitalisme pour comprendre les dynamiques énergétiques, donc celles du carbone, et plus largement l'exploitation de la

4. En 2013 le charbon représentait 41,1% de la production totale d'électricité dans le monde (*World Development Indicators*, Banque Mondiale). Certains, comme Bonneuil et Fressoz, préfèrent d'ailleurs parler d'addition énergétique plutôt que de transition énergétique.

nature à l'époque moderne. Le récit dominant de l'anthropocène, la métaphore de l'île de Pâques et l'analyse ricardienne-malthusienne de la transition au charbon représentent une déformation naturalisante de l'histoire des rapports entre l'humain et son environnement. Ceux-ci n'étaient pas scellés dès la maîtrise du feu. La disparition des Pascuans n'est pas le résultat d'une séquence écocide produit de *l'entreprise humaine*. Le franchissement des limites climatiques n'est ni anhistorique ni une évolution naturelle. Elle est historiquement située dans un mode de production particulier dont les rapports sociaux invariants doivent être pris en compte.

1.3 Les économistes de l'état stationnaire ou la négation du capitalisme

Le capitalisme, répétons-le, constitue, de par sa nature, un type ou une méthode de transformation économique et, non seulement, il n'est jamais stationnaire, mais il ne pourrait jamais le devenir.

Joseph A. Schumpeter, *Capitalisme, socialisme et démocratie*, pp. 115-116

Dans cette section, nous discutons la position de certains économistes écologiques sur la question du capitalisme et la controverse qui les a opposés à des auteurs éco-marxistes. Selon nous, le cadre analytique de ces économistes écologiques présente un angle mort majeur : celui des rapports sociaux invariants du mode de production capitaliste. Leur position quant à la possibilité d'un capitalisme stationnaire tient seulement car elle évacue ces invariants d'où émergent croissance et accumulation du capital. Cela aboutit à vider le capitalisme de sa substance, donc de sa spécificité historique. Dès lors, c'est la crise écologique contemporaine qui se trouve déhistoricisée, au risque de la naturaliser. L'analyse qui en découle est alors insatisfaisante tant théoriquement qu'historiquement.

1.3.1 Le point de départ de la controverse entre économistes écologiques et éco-marxistes

La controverse débute avec l'article de R. SMITH (2010a) qui développe une critique marxiste des thèses des économistes écologiques sur l'état stationnaire, en particulier les thèses de Herman Daly. En Économie écologique, un état stationnaire est défini comme une économie où le flux de matières premières et de rejets polluants est constant, où la production de nouveaux biens correspond à la consommation et la dépréciation physique des biens anciens et où la population est constante. En d'autres termes, il s'agit d'une économie sans croissance de son empreinte physique ni de son PIB réel (LAWN, 2011). Son cadre d'analyse amène Smith à conclure qu'un capitalisme stationnaire est une contradiction dans les termes. Selon lui, *l'impératif de croissance* provient de trois sources principales dans le mode

de production capitaliste : la dépendance au marché de producteurs spécialisés au sein de la division sociale du travail et obligés de vendre leur force de travail pour acquérir les moyens de leur subsistance ; la concurrence entre producteurs qu'entraîne l'organisation marchande de la production ; la structure juridique des entreprises et leurs objectifs, qui les obligent à croître pour satisfaire aux attentes de leurs actionnaires. En conséquence « croître ou mourir » (R. SMITH, 2010a, p. 31) est donc une loi d'airain des sociétés de marché capitalistes. Ce point de vue est également celui de BELLAMY FOSTER (2015b), pour qui concevoir un capitalisme stationnaire implique de passer outre les rapports de classe qui induisent l'accumulation infinie de capital comme traits distinctifs du système. Nous revenons sur cette question plus loin dans le chapitre. DALY (2010) se contente de répondre qu'une économie stationnaire n'est ni du capitalisme ni du socialisme mais simplement une économie où le marché demeure l'institution allouant les ressources. Pour R. SMITH (2010b), les institutions préconisées par Daly sont propres au mode de production capitaliste. La position de Daly découle d'un problème de définition commun à tous les économistes écologiques discutés dans ce chapitre.

1.3.2 Un problème de définition du capitalisme et du capital

Dans sa recension de la controverse, BLAUWHOF (2012) signale à juste titre que marxistes et économistes écologiques n'utilisent pas les mêmes définitions du capitalisme (ni du socialisme⁵). Comme il n'existe pas de cadre théorique d'analyse systématique du capitalisme, il n'existe pas de définition établie du capitalisme chez les économistes écologiques. Pour Daly, le capitalisme est une économie de marchés non régulés. Pour LAWN (2011), le capitalisme est une économie où la majeure partie des biens et services sont produits pour le marché et où les moyens de production sont privés. Pour T. JACKSON (2011), il s'agit simplement d'un système de propriété privée des moyens de production. Pour les marxistes le capitalisme est un système où la production de biens et services est le fait de travailleurs salariés au profit des propriétaires du capital, ce profit étant réalisé par la vente des biens et services sur un marché plus ou moins concurrentiel. Autrement dit, le capitalisme est un mode de production où le rapport salarial et le rapport marchand sont les deux rapports sociaux fondamentaux : le salariat s'est généralisé, de même que la production marchande. Là réside la différence entre le capitalisme et les modes de production antérieurs, où rapport marchand et rapport salarial étaient marginaux et encadrés dans d'autres rapports sociaux (POLANYI, 2009). Comme indiqué dans l'introduction, c'est la définition du capitalisme que nous retenons. Le rapport salarial est absent des définitions de Daly, Lawn et Jackson, et le rapport marchand est également absent de celle de Jackson. Ces oublis, loin d'être anecdotiques, sont centraux dans la position des économistes écologiques sur la compatibilité entre capitalisme et état stationnaire.

Économistes écologiques et marxistes ne s'accordent pas non plus sur la définition du capital : pour les premiers, le capital est un stock statique alors que pour les seconds il est la valeur en mouvement (BLAUWHOF, 2012). Cette définition du capital comme stock est revendiquée par COSTANZA, CUMBERLAND

5. Daly et Lawn identifient le socialisme au soviétisme et le définissent comme un système où l'État détient les moyens de production, planifie la production, les prix et la distribution des biens et services. Les marxistes définissent le socialisme comme un système économique démocratique et sans classe basé sur des associations libres de producteurs (impliquant notamment la gestion démocratique des unités de production) (BLAUWHOF, 2012). La question de l'éco-socialisme, qui apparaît aussi dans la controverse, va au-delà de l'objet de ce chapitre.

et al. (2015). Le capital y est défini comme un « stock, accumulation ou héritage » (p. 129) et peut prendre quatre formes : le capital construit, le capital humain, le capital social et le capital naturel. Nous pouvons noter l'absence du capital financier dans ces quatre formes. Selon les auteurs, c'est une conceptualisation du capital « bien plus large que celle associée au capitalisme » (*ibid.*, p. 129), sans préciser cette dernière. Pourtant, dans sa conception marxiste, le capital peut également prendre différentes formes jusqu'à sa réalisation sous forme argent une fois la plus-value réalisée : comme valeur en mouvement, il peut être ressource naturelle, force de travail, marchandise ou connaissance. COSTANZA, CUMBERLAND *et al.* (*ibid.*) parlent bien d'accumulation, mais n'en discutent pas le processus ni les implications en termes de croissance économique. La conceptualisation du capital comme un ensemble de stocks statiques empêche de concevoir un cadre analytique liant entre elles ses différentes formes dans un processus dynamique d'accumulation. Par conséquent, les rapports sociaux qui sont la source et le produit de ce processus sont également absents de l'analyse.

1.3.3 Un relativisme institutionnaliste excessif

L'article de LAWN (2011) est une réponse à la critique de R. SMITH (2010a) et aux travaux éco-marxistes qui concluent à l'insoutenabilité du capitalisme. Il constitue sans doute le traitement le plus achevé de la question du point de vue de l'Économie écologique. Sa thèse centrale est qu'un capitalisme sans croissance est parfaitement possible dès lors qu'il a été institutionnellement pensé pour l'être. Selon l'auteur, la loi d'airain du capitalisme n'est pas de « croître ou mourir », mais de faire des « profits et mourir » (LAWN, 2011, p. 9). Des institutions à la *Daly* rendraient ainsi parfaitement possible un système dont la fin demeure la réalisation d'un profit tout en étant compatible avec les limites écologiques de la planète : un système de *cap-and-trade* généralisé assurerait que l'économie ne dépasse pas un seuil imposé par l'État pour l'utilisation des ressources naturelles ; un système d'État employeur en dernier ressort assurerait le plein-emploi tout en agissant comme outil de discipline des salariés pour éviter une trop forte pression haussière sur les salaires ; un contrôle de la masse monétaire en circulation par les autorités publiques serait instauré pour éviter l'impératif monétaire de croissance (auquel Lawn croit⁶). Le tout s'articulerait avec des réglementations concurrentielles et industrielles adéquates pour éviter que les acteurs de marché n'acquiescent trop de pouvoir. Le gouvernement s'assurerait également que tous les individus ont accès aux services de base et que la propriété du capital est équitablement répartie, une idée que l'on retrouve également chez DALY et FARLEY (2010) et T. JACKSON (2015)⁷.

Cette vision est partagée par T. JACKSON (2011, 2015) pour qui l'important est l'agencement institutionnel du capitalisme et non le capitalisme lui-même. S'appuyant sur l'approche en termes de diversité des capitalismes, T. JACKSON (2011) souligne qu'il existe plusieurs types de capitalisme parmi les nations industrialisées (les économies de marché libérales et les économies de marché coordonnées) : s'ils ont tous en commun d'être articulés autour de la croissance économique, le contenu de leur croissance diverge. Il s'appuie ensuite sur les quatre capitalismes de BAUMOL *et al.* (2007) — le capitalisme coordonné

6. L'existence d'un impératif monétaire à la croissance fait l'objet d'un débat à part entière en Économie écologique et est traitée au chapitre 2.

7. Ces auteurs mentionnent la répartition équitable du capital telle une mesure de politique économique comme une autre sans paraître voir qu'il s'agit, *grosso modo*, du problème central des sociétés capitalistes depuis leur apparition.

par l'État, le capitalisme oligarchique, le capitalisme des grandes entreprises et le capitalisme entrepreneurial — pour conclure que le capitalisme n'est pas nécessairement articulé autour de la croissance. Cependant, Jackson va plus loin : selon lui, l'existence d'actionnariat salarié ou de contrôle par le secteur public dans les économies contemporaines rend inopérante la distinction classique entre capitalisme et socialisme. La principale conclusion de la discussion du capitalisme chez Jackson est donc... qu'elle n'est pas pertinente puisque le capitalisme peut être aussi bien un système en croissance qu'un système en stagnation et que sa nature est incertaine. Daly, Lawn et Jackson réduisent donc l'état stationnaire à une question d'architecture institutionnelle sans prise en compte aucune des rapports sociaux qui fondent le mode de production capitaliste. Chez ces auteurs, la question est purement technocratique, elle n'est ni historique ni théorique : le capitalisme peut être n'importe quel système où existent un marché et la propriété privée et il peut être soutenable à condition d'avoir les bonnes institutions.

Il s'agit là, selon nous, d'un relativisme institutionnaliste excessif qui expose ces auteurs à la critique adressée par BRENNER et GLICK (1991) à la Théorie de la Régulation : une prise en compte insuffisante des rapports sociaux capitalistes invariants qui forment la base des différentes configurations institutionnelles qui, elles, les régulent et donnent corps aux différents types de capitalisme. L'accumulation du capital est régulée par les différents arrangements institutionnels du capitalisme mais elle ne naît pas dans ces institutions : elle naît au cœur des rapports sociaux qui fondent ce mode de production. La généralisation du rapport marchand induit un rapport de concurrence entre possesseurs du capital qui, pour rester concurrentiels et accumuler du capital, doivent réinvestir une partie du surplus approprié sous forme de profit. La généralisation du rapport salarial induit un conflit de répartition du surplus entre salariés et possesseurs du capital qui n'est soluble que dans la croissance de la richesse produite. Celle-ci permet une augmentation du revenu de chaque classe sociale, même en situation de répartition inégale. Elle donne les moyens de participer à la société de marché et permet de fonder un compromis social incarné dans un cadre institutionnel stabilisé. Il faut donc distinguer entre les effets dus aux médiations institutionnelles et les effets dus aux rapports sociaux invariants du capitalisme. C'est ce que Lawn ne voit pas lorsqu'il explique que

« la nature d'un système capitaliste dépend de l'architecture institutionnelle qui le sous-tend et lui donne sa forme. [...] Malheureusement, beaucoup d'observateurs échouent à voir que l'actuel "impératif de croissance" est le résultat de systèmes capitalistes partout pensés institutionnellement pour croître »
(LAWN, 2011, p. 1).

On retrouve la même confusion chez T. JACKSON (2011). En affirmant que les faibles taux de croissance des mauvais capitalismes de BAUMOL *et al.* (2007) prouvent que le capitalisme peut parfaitement fonctionner sans croissance, l'auteur confond intention et résultat : les institutions de ces « mauvais » capitalismes n'ont, bien sûr, pas pour but d'atteindre la stagnation. Il est donc abusif de mobiliser les analyses institutionnalistes pour conclure que la question du capitalisme dans une perspective d'état stationnaire n'est pas pertinente⁸. Historiquement, les capitalismes sans croissance sont des capitalismes de crise, fragiles économiquement et instables socialement et politiquement (HARRIBEY, 2011).

8. *A fortiori* si l'on considère également d'autres cadres d'analyse institutionnaliste non mobilisés par Jackson, tel que celui des cinq capitalismes de AMABLE (2005) ou l'analyse en termes de régimes d'accumulation de la Théorie de la Régulation (BOYER, 2015). Tous fournissent une analyse des cadres institutionnels de la croissance dans différents types de capitalisme. Il n'existe pas de tradition institutionnaliste qui permette à Jackson de tirer la conclusion que capitalisme et croissance sont dissociables.

Les économistes de l'état stationnaire ne voient pas les invariants du capitalisme : si *toutes* les architectures institutionnelles du capitalisme sont articulées autour de la croissance, les déterminants fondamentaux de *l'impératif de croissance* (et non de la croissance) se situent ailleurs que dans ces architectures elles-mêmes. Les institutions régulant le rapport salarial ont muté entre fordisme et néolibéralisme mais le rapport salarial demeure. De même, les institutions régulant l'intensité de la concurrence et l'étendue des marchés ont muté sur la même période mais les rapports de concurrence entre propriétaires du capital et le rapport marchand généralisé demeurent. Différentes configurations institutionnelles peuvent engendrer des taux et des compositions différenciés de l'accumulation du capital et de la croissance, mais les rapports sociaux de base qui les engendrent demeurent. Ils ne constituent pas une option parmi d'autres : ils sont constitutifs du capitalisme et lui sont spécifiques. Les économistes écologiques ont donc tort de dire que croissance et capitalisme ne vont pas nécessairement de pair. *L'impératif de croissance* doit se comprendre non pas comme une garantie de croissance dans un système capitaliste mais comme un *besoin* de croissance. Ce dernier est une propriété émergente des rapports sociaux capitalistes et non celle d'une configuration institutionnelle déterminée *a priori*. Même fortement régulés, conserver les rapports sociaux capitalistes signifie donc conserver au cœur de l'organisation de la production les racines de l'insoutenabilité des sociétés actuelles.

1.3.4 Réconcilier contrainte physique et contrainte marchande ?

À l'appui de son argumentation, Lawn affirme qu'il serait tout à fait possible de continuer à faire croître les profits, donc d'accumuler du capital, tout en maintenant constant le PIB réel. C'est le PIB en valeur qui croîtrait par une hausse des prix via un développement qualitatif des biens et services et une meilleure efficacité dans l'usage des ressources (même si celle-ci est limitée par les deux premières lois de la thermodynamique)⁹. À condition d'avoir les bonnes institutions, croissances de l'empreinte physique et du PIB réel ne seraient donc pas des caractéristiques intrinsèques du capitalisme, mais seulement des options parmi d'autres. Autrement dit, il serait possible de réconcilier contrainte physique et contrainte marchande en conservant les invariants du capitalisme.

Ce raisonnement se heurte à deux problèmes. Premièrement, augmenter les profits dans une économie stationnaire nécessite une augmentation constante des prix et la stagnation des salaires (ou la stagnation des prix et la réduction des salaires) : cela entraînerait un déficit de demande empêchant la réalisation des profits. Résoudre ce problème sans croissance de la production nécessiterait soit d'augmenter les salaires, donc de réduire le profit (ce que les capitalistes n'accepteraient pas), ou de consommer intégralement les profits sans réinvestissement net, ce qui n'a pas de sens du point de vue des capitalistes dans la perspective d'accumuler du capital et de rester concurrentiel (BLAUWHOF, 2012). Une voie médiane serait de compenser la modération salariale par le crédit, mais l'expérience historique récente indique que cela rendrait alors les économies très instables. Dans le cas d'un état stationnaire, les conflits de répartition des richesses seraient donc exacerbés et encore bien plus forts que ce qu'ils ne sont dans un

9. La première loi de la thermodynamique indique que l'énergie ne se perd pas dans le processus de production-transformation. Ce qui se perd — c'est la seconde loi — est l'énergie utile, celle qui peut fournir un travail physique : au fur et à mesure du processus de production-transformation sa qualité s'altère jusqu'à la rendre inutilisable pour tout travail physique.

capitalisme en croissance¹⁰. Au-delà d'un seuil limite de compression des salaires réels — par exemple au seuil du salaire de subsistance — une augmentation des profits passerait donc inévitablement par une augmentation de la production, donc par une croissance du PIB réel.

Deuxièmement, il n'est pas possible dans ces conditions de maintenir le flux d'intrants et d'extrants physiques constant : cela suppose une croissance de l'efficacité de l'usage des ressources supérieure à la croissance du PIB réel. Cela n'a pas été le cas historiquement, comme l'illustrent les données reproduites sur la figure 1.4 : la consommation de matières n'a cessé de croître et, effet-crise mis à part, aucune tendance à la baisse ne semble se dessiner. Autrement dit, il n'y a pas de tendance vers un découplage absolu de la production et de l'usage des ressources naturelles.

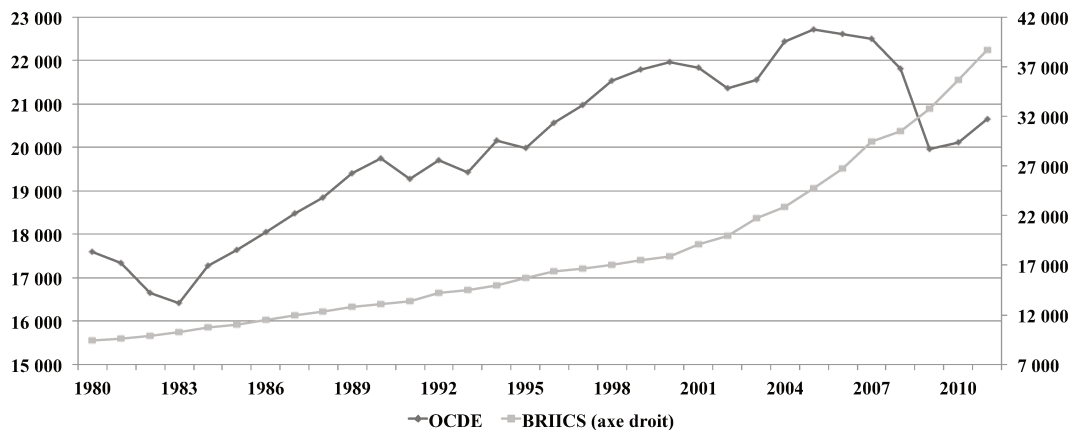


FIGURE 1.4 – Consommation intérieure de matières en millions de tonnes. Source des données : OCDEStat

Un découplage absolu entre la production et ses conditions environnementales requièrent deux conditions : un mix énergétique entièrement renouvelable et un recyclage de *l'ensemble* du stock de matière nécessaire, et ce à l'infini ou un nombre suffisant de fois pour que les flux nets de matière entrante soient négatifs ou nuls. La production pourrait alors être découplée des intrants et extrants environnementaux et pourrait croître indéfiniment. Il n'y aurait plus de rupture métabolique entre l'économie et l'environnement (BELLAMY FOSTER, 2011), c'est-à-dire que le temps de détérioration des conditions environnementales de la production serait supérieur ou égal à leur temps de régénération. Comme le reconnaît Lawn lui-même, les deux premières lois de la thermodynamique rendent impossible d'atteindre une efficacité de 100% de l'usage des ressources de même qu'elles interdisent d'atteindre un nombre de cycles de recyclage très important en raison des pertes entropiques. Autrement dit, il serait impossible pour une économie de fonctionner avec un même stock de matières *ad infinitum* (MURADIAN *et al.*, 2012)¹¹. Une entrée nette de matière dans le système de production est donc nécessaire : si celle-ci suit

10. Nous revenons sur ce point dans le chapitre 2 : nous montrons qu'il peut y avoir un profit net agrégé en état stationnaire mais que ce dernier doit demeurer en toute logique constant. Il n'y a donc plus d'accumulation de capital mais simplement le maintien du stock de capital accumulé précédemment.

11. Il est toutefois juste de noter que le stock de déchets peut lui-même être traité pour être rendu de nouveau disponible à la production. La seule condition est que la Terre reçoive l'énergie nécessaire au processus de récupération. Cela est le cas car elle n'est pas un système thermodynamique fermé mais reçoit l'énergie solaire. Ce processus de récupération génère lui-même des pertes

un rythme dicté par le temps du capital il est peu probable qu'un équilibre métabolique entre économie et environnement émerge. Mettre le temps économique en concordance avec les temps naturels implique que l'accumulation du capital et la réalisation des profits se fassent selon la temporalité des seconds (nous revenons sur la discordance des temps à la section 1.4). L'incertitude sur la réalisation effective du capital serait alors élevée. La préférence pour le présent ôterait toute incitation à investir, sauf à retenir un taux d'actualisation quasi-nul, ce qui apparaît irréaliste dans un système dont la fin est l'accumulation de capital¹². Même avec une valeur ajoutée largement dématérialisée, une économie en croissance infinie se heurtera donc toujours, dans un futur plus ou moins lointain, aux limites écologiques opposées par les conditions environnementales de la production. Pour aboutir, une transition énergétique devrait donc nécessairement passer par une reconfiguration des rapports sociaux spécifiques du capitalisme suivant une logique de satisfaction des besoins socio-écologiques et non seulement par leur remédiation via de nouvelles institutions. Seule leur non-prise en compte permet de conclure que le capitalisme peut être viable et stable en situation de stagnation : dépourvu de ses invariants ce mode de production peut alors être tout et rien à la fois et ne connaît plus *d'impératif de croissance*.

1.3.5 Quelques incohérences et un paradoxe de certains économistes écologiques

Cette incomplétude du cadre d'analyse de certains économistes écologiques aboutit à trois incohérences et un paradoxe. La première incohérence, théorique, est de conclure que le mode de production dont émergent croissance et dynamiques destructrices pour l'environnement n'est pas en cause. Chez les auteurs de l'état stationnaire, le problème n'est pas d'ordre socioéconomique mais d'ordre éthique, moral ou culturel : il faut renoncer à l'obsession de la croissance, remplacer les valeurs matérialistes et consuméristes par celles de la sobriété volontaire (VICTOR, 2008). Si les capitalistes devaient s'opposer à la mise en place d'un état stationnaire à la *Daly* « cela n'aurait rien à voir avec sa viabilité et tout à voir avec l'avarice et un manque de considération pour les générations futures » (LAWN, 2011, p. 14).

La deuxième incohérence est une incohérence des imaginaires : alors même qu'ils insistent sur la nécessité d'un changement culturel, éthique ou moral ces auteurs préconisent d'approfondir le rapport marchand à la nature. Celui-ci engendre une vision de l'environnement comme ensemble de ressources

qui alimentent le stock de déchets. Ces pertes nouvelles peuvent être compensées si le stock de déchets à traiter est suffisamment important mais ce dernier ne peut donc jamais être totalement éliminé (AYRES, 1999). Néanmoins, pour faire disparaître les contraintes physiques à la production, il faudrait, d'une part, que les pertes engendrées par la production et le recyclage n'excèdent pas le rythme de récupération du stock de déchets et, d'autre part, que ces derniers soient recyclables dans leur totalité. Il ne s'agit donc pas d'affirmer que la matière n'importe pas : l'affirmation « matter matters too » de Georgescu-Roegen est tout à fait juste. Néanmoins, la matière n'entre en compte qu'en temps que support de l'énergie : elle ne se dilue pas d'elle-même mais seulement quand l'objet qu'elle compose échange de l'énergie avec son environnement. Cela rend caduque la proposition d'une quatrième loi de la thermodynamique formulée par Georgescu-Roegen qui étendrait la seconde loi à la matière : le principe d'entropie énoncé par la deuxième loi de la thermodynamique est suffisant. Nous remercions vivement Christophe Goupil et Éric Herbert, physiciens à Paris-7, pour leurs éclaircissements à propos du débat autour d'une quatrième loi de la thermodynamique.

12. Cela fait écho à certaines critiques adressées au rapport de N. STERN (2006) quant au choix effectué en matière de taux d'actualisation pour l'évaluation de la valeur actuelle des dommages liés au changement climatique (GODARD, 2007). Retenir une valeur très faible revient à faire primer une considération éthique — l'égal traitement de toutes les générations actuelles et futures — sur un critère économique — la réalisation des profits dans un horizon temporel raisonnable (du point de vue du capital) — dans la calibration du taux d'actualisation. Pour cette raison, un taux d'actualisation tel que celui retenu par le rapport Stern (valeur centrale de 1,4%) ne nous apparaît guère raisonnable sur le plan de l'analyse scientifique même s'il peut être souhaitable d'un point de vue éthique et écologique. *A fortiori* si l'on considère que l'horizon temporel des profits s'est raccourci avec l'émergence du régime d'accumulation tiré par la finance depuis les années 1970.

naturelles quantifiables, divisibles et capitalisables. Plus largement, le rapport marchand engendre des fictions culturelles autour desquelles s'articule la rationalité capitaliste et qui donnent corps au traitement de la terre, de la monnaie et du travail comme des marchandises (MAUCOURANT, 2003). Ces fictions se trouvent donc au fondement de l'imaginaire de la croissance. Or, elles se voient renforcées par les institutions à la *Daly*. Par exemple, le système de *cap-and-trade* généralisé proposé par LAWN (2011) et par DALY et FARLEY (2010) signifie une extension de la financiarisation à tous les intrants et extrants environnementaux, c'est-à-dire une marchandisation accrue de ce qui n'est pas produit par le marché. Le seuil fixé par l'État pour la quantité maximale d'intrants et d'extrants ne signifie pas une limite à la marchandisation mais simplement une limite physique qu'il serait possible de faire évoluer au grès des évolutions technologiques. Ce système de *cap-and-trade* pose, d'abord, un problème de théorie de la valeur car il prétend prendre en compte des dimensions qualitatives irréductibles à la valorisation marchande (DOUAI, 2017; HARRIBEY, 2002). Il entend, ensuite, faire évoluer toute l'organisation de la production simplement par l'action du marché. En d'autres termes, non seulement ce système ne revient pas sur les rapports de production capitalistes, mais il en constitue un approfondissement : la nature comme valeur d'échange — c'est-à-dire comme marchandise — devient encore davantage une sphère d'accumulation — un *capital* naturel (TORDJMAN et BOISVERT, 2012)¹³. Comme les auteurs de l'état stationnaire ne tiennent pas compte des rapports sociaux du capitalisme, ils ne font pas le lien entre la rationalité qui lui est propre et les aspects culturels, moraux et éthiques des sociétés contemporaines qu'ils jugent néfastes. Les institutions qu'ils préconisent se situent donc à rebours d'une évolution culturelle rompant avec l'imaginaire de la croissance.

Naît alors la troisième incohérence entre le projet épistémologique de l'Économie écologique et son application pratique : concevoir un savoir économique encastré dans la nature et les limites écologiques de la planète aboutit à préconiser l'extension du champ du marchand qui désencastre l'économie de la société et de la nature en assujettissant tous les autres rapports sociaux au rapport marchand (POLANYI, 2009).

Enfin, nous pouvons pointer un paradoxe des économistes écologiques mentionnés dans ce chapitre : ces derniers ont élaboré une critique théorique et empirique poussée de la croissance, du commerce international et du développement dans une perspective écologique, mais, dépourvus d'une analyse systémique du mode de production capitaliste, n'en n'ont pas fait de même avec l'organisation socioéconomique qui les sous-tend (R. SMITH, 2010a). Comme l'expliquent DURAND et LÉGÉ (2013), dépourvu d'une analyse des relations sociales et des configurations institutionnelles qui engendrent la croissance économique, le cadre conceptuel de la décroissance (auquel les auteurs assimilent celui de l'état stationnaire) échoue à fournir un récit historicisé des processus de croissance et donc, ajoutons-nous, de l'exploitation de la nature et de la crise écologique. Cela aboutit à inscrire les analyses de ces auteurs dans la vision dominante de l'anthropocène qui naturalise la crise environnementale.

13. Il est juste, cependant, de souligner que la question de la valorisation monétaire de la nature et de sa marchandisation ne fait pas l'objet d'un consensus en Économie écologique (DOUAI et PLUMECOCQ, 2017; J.-D. GERBER et J.-F. GERBER, 2017). Néanmoins, la place prise par les travaux sur le sujet est très importante (COSTANZA, HOWARTH *et al.*, 2016; PLUMECOCQ, 2014).

1.4 Théoriser la dialectique entre économie et nature dans le capitalisme

Les rapports sociaux capitalistes sur lesquels nous avons insisté induisent une relation spécifique de la nature et de l'économie qui n'a pas été théorisée par les économistes écologiques discutés ici. Les éco-marxistes en proposent deux cadres d'analyse théorique : la rupture métabolique et la seconde contradiction du capitalisme. Ces deux approches sont souvent opposées mais il nous semble, à l'inverse, qu'elles sont complémentaires.

1.4.1 La discordance des temps ou la rupture métabolique entre société et nature

Le rapport marchand et le rapport salarial poussèrent les capitalistes du coton à se tourner vers l'énergie fossile. Ces derniers purent ainsi émanciper la production du temps écologique : le capital pouvait dès lors avoir sa temporalité propre, *désencastrée* des temps concrets de la nature et de la vie sociale. Le temps concret, nous dit MALM (2016) est le résultat d'une activité, il est ancré dans la réalité physique de l'existence : cela prend x unité de temps de faire cuir des aliments, de faire pousser du blé ou d'attendre la marée. Le temps abstrait, à l'inverse, n'est pas ancré ; il dicte l'ancrage, la temporalité devient normative : l'activité *doit* durer x unité de temps. Cette idée des temps abstrait et concret n'est pas nouvelle, MALM (ibid.) la fait ainsi remonter à THOMPSON (1967). On la retrouve en fait implicitement dès JEVONS (1865) qui s'inquiétait de l'épuisement du charbon par l'économie britannique : l'énergie fossile, expression d'un temps concret figé, permet le temps abstrait du capital par sa quantité et sa disponibilité mais lui opposera inévitablement une limite son épuisement venu. On retrouve également cette idée chez René Passet :

« Dans les rythmes naturels se déroulant et s'harmonisant sur des millénaires (parfois des millions d'années) la gestion économique introduit la rupture des maximisations de courte période dont les effets ne se feront sentir que sur les générations à venir : l'actualisation "gomme" un futur lointain où ce qui est en cause concerne moins les valeurs monétaires que la reproduction d'une réalité physique dont dépend l'existence de la sphère économique et des sociétés humaines » (PASSET (1979, p. XII) cité dans ZUINDEAU (2006, p. 51)).

Enfin, elle est très prégnante chez Barry Commoner, figure tutélaire de l'environnementalisme américain et pionnier de la critique écologique du capitalisme :

« les rythmes opératoires des différents cycles écologiques sont de durées extrêmement variables, et cependant, si l'on veut éviter une rupture du cycle, il est indispensable que ces rythmes soient respectés. C'est ainsi que le rythme du système des sols est beaucoup plus lent que celui du système écologique des eaux (...). Il en résulte qu'une entreprise exploitant différents systèmes écologiques devra prévoir des rythmes de rentrées bénéficiaires différents, afin d'éviter de provoquer une rupture » (COMMONER, 1972, pp. 273-274).

Cette rupture entre les temps de la nature et de l'économie engendre une *rupture métabolique* entre société et nature. Développant des intuitions de Marx lui-même inspiré par le chimiste allemand Justus Liebig (BELLAMY FOSTER, 1999), cette approche montre que la captation des éléments nutritionnels produits par la nature engendre un appauvrissement des sols car ces nutriments, souvent envoyés à des

centaines, voire des milliers, de kilomètres, ne lui sont pas retournés sous forme de déchets organiques qui pourraient la nourrir en retour. Il y a donc rupture métabolique entre la société et la nature car le rythme de consommation des nutriments excède celui de la régénération des sols. Certains théoriciens de l'échange écologique inégal s'inscrivent dans le cadre de la rupture métabolique : celle-ci est alors conceptualisée comme la captation par les pays du centre du capitalisme des ressources naturelles des pays de la périphérie sans qu'un échange inverse ne compense cette captation, conduisant à un appauvrissement des ressources naturelles de la périphérie (BELLAMY FOSTER et HOLLEMAN, 2014; CLARK et BELLAMY FOSTER, 2009; DOUAI, 2017).

Critique de l'approche de la rupture métabolique et indication empirique

MOORE (2015) reproche à l'approche en termes de rupture métabolique de revenir au dualisme entre société et nature : ces dernières seraient deux mondes différents. Nous voyons en creux que cette critique pourrait également être adressée par les économistes écologiques pour qui société et nature sont imbriquées et ne peuvent être envisagées séparément. Selon Moore, cette approche masquerait ainsi la « double internalité » (ibid., p. 1) qui est à l'œuvre : « le capitalisme dans la nature » et « la nature dans le capitalisme » (ibid., p. 13). Pour l'auteur, cela signifie que capitalisme et nature se co-produisent en permanence. Cette approche pose problème dans la mesure où le capitalisme n'est pas une création naturelle et où la nature n'est pas une création du capital (MALM, 2017), même s'il peut parfois s'y substituer ou la régénérer. La critique de Moore semble également fragile dans la mesure où, bien qu'elles soient étroitement liées, on ne peut affirmer l'identité de la société et de la nature. L'auteur, à la suite de Latour, proclame ainsi un *monisme de substance et de propriété* entre nature et société. Il serait donc impossible de les séparer. À cela, MALM (ibid.) répond que société et nature sont parties intégrantes d'un tout commun au sein duquel elles interagissent en permanence mais se distinguent par des caractéristiques et des logiques spécifiques : il y a donc bien *monisme de substance* mais il y a *dualisme de propriété*. Le capital organise et met au travail la nature en permanence, laquelle supporte son processus d'accumulation : comme le montre MOORE (2015), le processus capitaliste repose bien sur une vision dualiste entre économie et nature. Le processus historique, lui, correspond à une dialectique permanente entre capital et conditions environnementales de la production dont les dynamiques s'imbriquent. Mais cette imbrication n'implique pas que société et nature ne soient pas distinguables.

En guise d'indications empiriques d'une rupture métabolique, on peut mentionner le temps requis par la planète pour régénérer les ressources consommées en une année par l'humanité. Cette durée est actuellement estimée par le *Global Footprint Network*¹⁴ à 18 mois. Autrement dit, le temps du capital met la nature au travail de sorte que la discordance globale des temps s'élèverait à 6 mois environ¹⁵. Plus loin dans l'histoire, CLARK et BELLAMY FOSTER (2009) expliquent comment le commerce du guano et du

14. http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/world_footprint/, dernier accès au lien : samedi 3 juin 2017

15. Cette estimation est basée sur le déficit écologique, soit la différence entre l'empreinte écologique de l'humanité et la capacité bioproductive de la planète. Ces notions ne sont pas exemptes de critiques, car elles agrègent des phénomènes très différents et les réduisent à une surface donnée considérée comme nécessaire pour produire ce que l'humanité consomme et pour absorber ses déchets (van den BERGH et GRAZI, 2014). Par ailleurs, on peut ajouter que ces notions masquent totalement les aspects distributifs du problème : il est clair que l'humanité n'est pas un tout homogène qui consomme de façon uniforme.

nitrate du Chili et du Pérou — utilisés comme engrais dans les pays centraux du capitalisme, notamment en Grande-Bretagne — au XIX^e siècle épuisa les réserves accumulées sur des millénaires et détériora l'environnement des pays exportateurs tout en conduisant à une baisse de la fertilité des sols qui le recevaient.

On peut faire l'hypothèse que la rupture métabolique rend progressivement l'accès aux ressources plus difficile, ce qui induit alors un besoin croissant de capital pour les rendre disponibles en quantités suffisantes, voire pour les régénérer, entraînant un renchérissement de la reproduction du capital. C'est ce que O'CONNOR (1988) a théorisé comme la seconde contradiction du capitalisme.

1.4.2 La seconde contradiction du capitalisme ou l'approche marxiste de la critique thermodynamique de l'économie

O'CONNOR (ibid.) suggère qu'à la contradiction classique théorisée par Marx entre travail et capital s'ajoute une seconde contradiction entre nature et capital : la détérioration tendancielle des conditions environnementales de la production qui fournissent la base matérielle du processus de production et de reproduction du capital. À mesure qu'il s'étend, ce processus exploite la nature et transforme l'énergie et les matières premières — il les dégrade donc en augmentant l'entropie (DELÉAGE, 1989; GEORGESCU-ROEGEN, 1995). L'accès aux conditions environnementales de la production devient de plus en plus coûteux et requiert davantage de capital pour les exploiter et les restaurer, sans quoi ce dernier ne peut plus assurer sa propre reproduction. La crise écologique est alors de nature à aggraver les contradictions endogènes du capitalisme et se trouve emboîtée avec la crise économique dans une dynamique de renforcement mutuel. Deux dynamiques contradictoires du capital peuvent donc émerger : d'une part l'intensification en capital constant (capital fixe et consommations intermédiaires) relativement au capital variable (la force de travail) entraîne un déficit de demande empêchant la pleine réalisation du capital qui devient structurellement excédentaire; d'autre part la détérioration tendancielle des conditions environnementales de la production entraîne un surcoût requérant toujours plus de capital qui devient structurellement insuffisant. Autrement dit, la première contradiction entraîne une crise de surproduction quant la seconde entraîne une crise de sous-production sans que ces deux phénomènes ne se compensent (O'CONNOR, 1988, 1991). En effet le capital n'est pas toujours suffisamment liquide pour passer d'un secteur à l'autre. De plus, la temporalité des deux phénomènes ne coïncide pas nécessairement. Toutes choses égales par ailleurs, ces deux dynamiques aboutissent en théorie à la baisse tendancielle du taux de profit. Tout l'intérêt de l'analyse théorique proposée par O'Connor est donc aussi de montrer que le sens de causalité n'est pas univoque : le processus de production détériore la nature dont l'exploitation détériore les conditions de reproduction du capital.

Il s'en suit que la critique thermodynamique de l'économie portée par les économistes écologiques est compatible avec la théorie de la seconde contradiction des éco-marxistes. Comme l'explique DOUAI (2017, p. 61), « la production de marchandise est simultanément une transformation quantitative de la valeur économique et une transformation qualitative de la matière et de l'énergie ». Tout processus de production est donc à la fois un processus économique et thermodynamique mais dans le capitalisme cette simultanéité atteint les limites de ce que la nature peut supporter. Le processus de production et

de reproduction du capital aggrave la perte entropique qui, en retour, accroît les besoins en capital ; la satisfaction de ces besoins accentue encore l'entropie via l'exploitation supplémentaire de la nature qu'elle génère. À la contradiction classique identifiée par Marx portant sur l'antagonisme entre capital et travail, il faut donc ajouter une contradiction de même statut dans la critique du capitalisme, portant sur l'antagonisme entre capital et nature. Cette contradiction peut être théorisée au prisme de l'économie, en termes d'accroissement du capital nécessaire à sa propre reproduction comme le fait O'Connor, ou au prisme de la thermodynamique, en termes d'accroissement de l'entropie comme le font les économistes écologiques. Ces deux phénomènes expriment la même contradiction.

Quelques critiques de la théorie de la seconde contradiction

La théorie de la seconde contradiction peut sembler mal équipée pour rendre toute la complexité de la dialectique nature-capital : les temps du capital peuvent varier d'un secteur ou d'un pays à l'autre et les temps de la nature sont multiples. Cependant, elle nous paraît rendre utilement compte de la tendance historique à la dégradation des conditions environnementales de la production par le processus de capitalisation de la nature.

Les mécanismes décrits précédemment peuvent aussi paraître induire un déterminisme gênant. D'abord, il n'est pas certain que la contradiction entre le capitalisme et les conditions environnementales de la production soit de nature à remettre en cause la dynamique du capital : la finance environnementale, la crise climatique, la sauvegarde et la régénération de la nature deviennent de nouvelles sphères d'accumulation. On peut alors y voir certains des fondements d'un capitalisme *vert* (KEUCHEYAN, 2017 ; SPASH, 2010 ; TORDJMAN et BOISVERT, 2012). Dans cette optique, le cadre théorique proposé par O'Connor ne reflèterait pas une contradiction du point de vue du capital mais simplement un antagonisme entre les logiques capitalistes et celles de la satisfaction des besoins sociaux et environnementaux (CHESNAIS et SERFATI, 2003). Néanmoins, cet antagonisme ne peut se poursuivre indéfiniment : dès lors qu'il atteint un seuil compromettant la reproduction même du capital et mettant en péril ses conditions de réalisation à l'échelle macroéconomique, il devient une contradiction fondamentale du capitalisme. De plus, des mouvements sociaux spécifiques peuvent émerger de cet antagonisme, opposant une barrière politique nouvelle à l'accumulation du capital (O'CONNOR, 1988). On reviendra sur ce point au chapitre 5.

BELLAMY FOSTER (2002) reproche, lui, à la théorie de la seconde contradiction de véhiculer une vision économiciste qui ne considère pas la crise écologique pour elle-même mais seulement dans le cadre d'une théorie de la crise économique. Cette critique nous paraît infondée dans la mesure où ce cadre théorique permet de penser la crise écologique dans le capitalisme. Celle-ci est, alors, un objet d'étude au même titre que la crise économique : plus qu'une approche économiciste, il s'agit d'une approche intégrée qui explicite la relation bi-causale entre crise économique et crise écologique.

L'auteur critique également l'automaticité des effets de retour négatifs de l'environnement vers la production et met en doute sa validité empirique. Il cite en exemple l'amélioration potentielle des rendements agricoles dans certaines parties du monde consécutives au changement climatique. C'est toutefois passer rapidement sur les dimensions systémiques du phénomène dont l'effet net sera largement négatif en l'état actuel du consensus sur ses effets attendus. Il ajoute qu'il n'y a pas réellement de preuve

que les coûts croissants des conditions environnementales de la production peuvent provoquer une crise économique. Comme pour l'analyse classique de la baisse tendancielle du taux de profit, il faut appréhender la théorie de la seconde contradiction comme une tendance structurelle toutes choses égales par ailleurs plutôt que comme fait stylisé systématique et obligatoire (KALLIS, 2015). Par ailleurs, on peut trouver des indications empiriques à l'appui de cette théorie.

Indications empiriques d'effets de type seconde contradiction

Les conséquences macroéconomiques des hausses du prix des matières premières offrent une première indication empirique d'effets de type seconde contradiction. FIZAINE et COURT (2016) mettent ainsi en évidence une corrélation négative entre croissance du PIB mondial et part des dépenses énergétiques en pourcentage du PIB : ils trouvent qu'un seuil de 15% constitue une limite pour atteindre un taux de croissance positif.

L'indicateur *Energy Return On Investment* (EROI) — qui illustre la quantité d'énergie obtenue pour une unité d'énergie investie — peut également illustrer des effets de type seconde contradiction si l'on admet que l'énergie est l'une des formes prises par le capital — valeur en mouvement — au cours de son circuit. Le tableau 1.1 indique des estimations des EROI pour différents types d'énergie. On voit que l'EROI des sources alternatives d'énergie est très faible, excepté pour l'énergie hydraulique. Le constat général est qu'il faut donc de plus en plus d'énergie pour obtenir de l'énergie.

Énergie	EROI
<i>Pétrole et gaz naturel</i>	
1930	> 100
1970	30
2005	11 à 18
<i>Pétroles non conventionnels</i>	
Sables bitumineux	2 à 4
Huile de schiste	5
<i>Charbon</i>	
1950	80
2000	80
<i>Nucléaire</i>	
	5 à 15
<i>Renouvelables</i>	
Hydraulique	> 100
Éoliennes	18
Photovoltaïque	6,8
Éthanol de canne à sucre	0,8 à 10
Éthanol de maïs	0,8 à 1,6
Biodiesel	1,3

TABLEAU 1.1 – **EROI par type d'énergie.** Un EROI de 100 signifie que l'on obtient 100 unités d'énergie pour une unité d'énergie investie. Sources : adapté de CAMINEL *et al.*, 2014 à partir des données de MURPHY et HALL, 2010.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 1.5 page suivante, cet indicateur semble avoir atteint son

pic pour le gaz naturel et le pétrole et être à présent sur une phase descendante. Seul le charbon n'aurait pas encore connu son pic (COURT ET FIZAINE, 2017)¹⁶. Autrement dit, le capital dans sa forme énergie tend à devenir insuffisant pour sa propre reproduction.

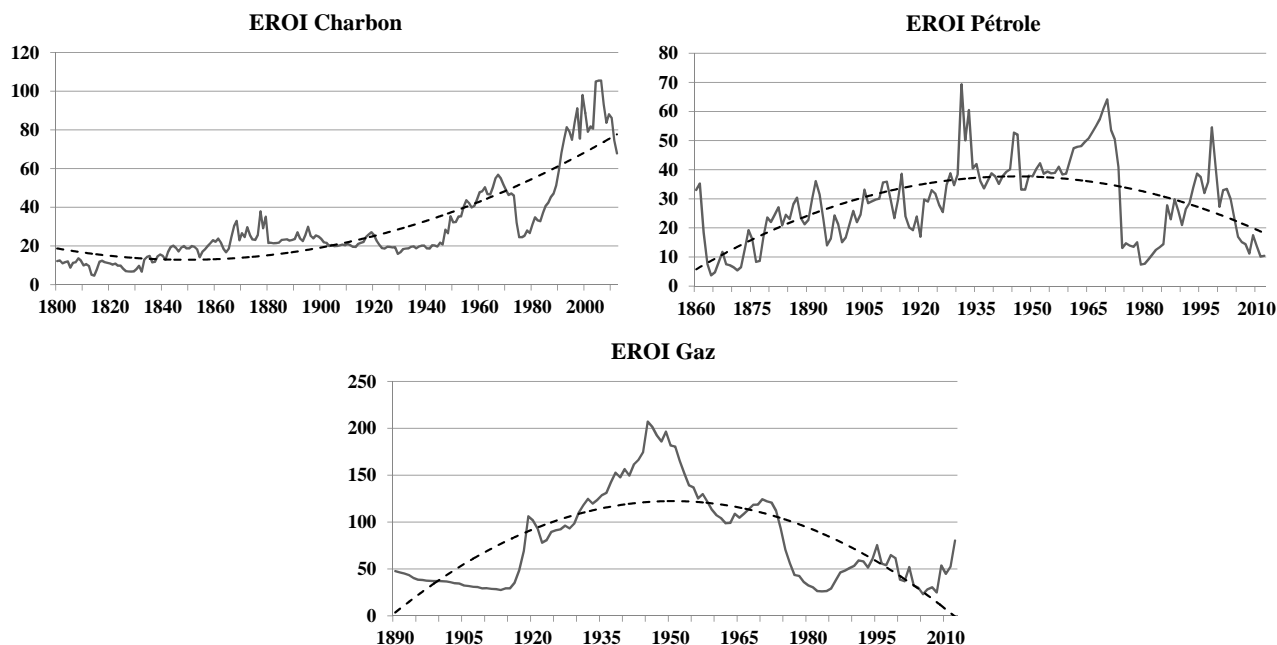


FIGURE 1.5 – Indice EROI pour le charbon, le pétrole et le gaz de 1800 à 2012. Source : COURT ET FIZAINE, 2017.

MOORE (2015) propose de prolonger l'EROI par le taux de rendement énergétique du capital investi (TRECI). Pour en fournir une approximation, on suit la méthode de COURT ET FIZAINE (2017) qui estiment le capital investi dans le secteur des énergies fossiles américain comme suit :

$$I_{ener} \equiv CU_{ener} = \frac{Prix_{ener}}{ROI_{ener}} \quad (1.1)$$

où I_{ener} est le capital investi dans le secteur énergétique par unité produite, CU_{ener} est le coût unitaire de production, $Prix_{ener}$ est le prix unitaire de l'énergie considérée et ROI_{ener} est le retour sur investissement du secteur des énergies fossiles. Les auteurs estiment ce dernier comme étant le taux d'intérêt à long-terme sur la dette américaine majoré d'une prime de 10% soit $ROI_{ener}^{US} = 1 + \frac{i_{usa}^{l-t} + 10}{100}$ avec i_{usa}^{l-t} le taux à long-terme sur la dette américaine. De là, le TRECI se calcule comme :

$$TRECI = \frac{1}{CU_{ener}} \quad (1.2)$$

Bien sûr, cette approximation est largement influencée par la variation des prix du pétrole, dont la corrélation avec l'offre et la demande n'est pas évidente en raison de l'influence des prix sur les marchés à terme liée à la financiarisation des matières premières (MASTERS ET WHITE, 2008 ; WRAY, 2008). Cependant,

16. Nous remercions Florian Fizaine qui a eu la gentillesse de nous fournir ces données.

sur le temps long, elle a au moins le mérite de dessiner une trajectoire. Celle-ci est logiquement similaire à celle de l'EROI : la figure 1.6 représente l'approximation du TRECI pour les États-Unis entre 1861 et 2014, soit la quantité de baril de pétrole obtenue pour 1 dollar investi par le secteur.

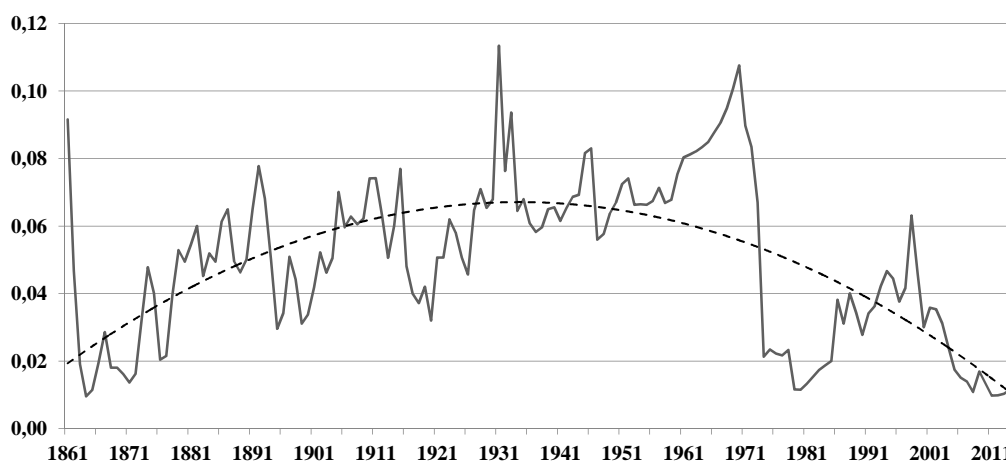


FIGURE 1.6 – Taux de rendement énergétique du capital investi pour les États-Unis de 1861 à 2014. Sources : calculs de l'auteur à partir des données de MeasuringWorth pour le taux d'intérêt à long-terme de la dette américaine et de la *BP Review* pour le prix du baril de pétrole depuis 1861.

On voit clairement que la période des chocs pétroliers marque une rupture très importante. Celle-ci induit une rupture en niveau, puisque la quantité de baril obtenue pour 1 dollars investi par le secteur du pétrole américain se situe alors entre 0,02 et 0,06 alors qu'elle est comprise entre 0,04 et 0,1 pendant toute la durée du vingtième siècle jusqu'en 1970. Aucune tendance vers un retour aux niveaux pré-1970 ne semble se dessiner depuis la fin des années 1990. Cela tend donc à montrer qu'il faut de plus en plus de capital pour obtenir l'énergie fossile nécessaire.

La théorie de la seconde contradiction et l'analyse en termes de rupture métabolique permettent de placer la dynamique capitaliste au centre de l'analyse tout en explicitant les effets de retour de la nature sur le processus de production. Elles tiennent compte de la spécificité historique de la crise écologique actuelle et il nous paraît donc qu'elles permettent de compléter utilement le cadre analytique des économistes écologiques.

1.5 Conclusion

Ce chapitre visait à discuter les insuffisances du cadre analytique de certains économistes écologiques. Pour cela, nous nous sommes d'abord attaché à revenir sur les explications universelles de la crise écologique en forme de métaphore de l'île de Pâques afin d'en esquisser les limites et de déconstruire l'historiographie spéculative qui en découle. Cette dernière se retrouve dans le récit dominant de l'adoption des énergies fossiles au cours de la Révolution industrielle et ne permet pas de saisir les dimensions fondamentales des transitions énergétiques au sein du capitalisme. Cela comporte le risque d'entrevoir

les crises écologiques comme le produit d'une *entreprise humaine* intemporelle et universelle dans une vision linéaire de l'histoire, déterministe et naturalisante. L'expérience historique des transitions de l'eau au charbon puis du charbon au pétrole et le cadre théorique adopté ici indiquent que les rapports sociaux invariants du capitalisme, le rapport marchand et le rapport salarial, devrait se trouver au cœur de toute analyse de la tendance structurelle à la destruction de l'environnement. Parce qu'elles semblent aveugles à ces rapports sociaux, les analyses des économistes écologiques discutées dans ce chapitre sont donc, selon nous, mal équipées pour proposer une analyse complète des relations économie-nature.

Dans le chapitre suivant, nous poursuivons la revue critique de littérature en discutant les liens entre monnaie et croissance tels qu'envisagés par certains économistes écologiques. Cela nous permettra de revenir brièvement sur la question du capitalisme sans croissance.

La monnaie et la croissance : une critique post-keynésienne de l'Économie écologique ¹

2.1 Introduction

L'économie écologique tend à présent vers l'élaboration d'un cadre théorique plus général, notamment vers une macroéconomie écologique (HARDT et O'NEILL, 2017; T. JACKSON, DRAKE *et al.*, 2014; KALLIS *et al.*, 2012; REZAI et STAGL, 2016; VICTOR et ROSENBLUTH, 2007). Dans ce contexte, une Économie écologique monétaire a commencé à émerger. Les analyses monétaires de certains économistes écologiques (mais pas tous) s'articulent essentiellement autour de l'affirmation qu'une économie stationnaire — et *a fortiori* une économie en décroissance — est incompatible avec un système monétaire dans lequel la monnaie est créée comme une dette portant intérêt (COSTANZA, ALPEROVITZ *et al.*, 2013; DOUTHWAITE, 2000; FARLEY *et al.*, 2013; LIETAER *et al.*, 2012; LOEHR, 2012; SORRELL, 2010). Cette affirmation est désignée comme *l'impératif monétaire de croissance* : la dette portant intérêt créerait un besoin de croissance économique ². Plusieurs raisons conduisent certains économistes écologiques à conclure que la monnaie créée par la dette et devant être remboursée avec un intérêt est incompatible avec une économie stationnaire : 1) la dette croît de façon exponentielle alors que ce n'est pas le cas de l'économie réelle; 2) le système actuel est procyclique, créant une série continue de bulles et d'explosions financières; 3) la dette portant intérêt invite à escompter le futur; 4) les taux d'intérêt excèdent en général la croissance des ressources

1. Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans une version légèrement différente : CAHEN-FOUROT et LAVOIE (2016)

2. Bien que non directement liée à la littérature en Économie écologique, BINSWANGER (2009) conclut également à l'existence d'un impératif de croissance dans une économie capitaliste. Cependant, comme ROSENBAUM (2015, p. 644) le souligne, le modèle de Binswanger fait l'hypothèse que les banques conservent leurs revenus à chaque période, une hypothèse qui empêche une économie de converger vers un état stationnaire. La raison, comme on le montre plus loin dans ce chapitre, est que dans un état stationnaire si un secteur accumule de la richesse nette (ce que fait la banque si elle conserve ses revenus à chaque période et les ajoute à ses fonds propres), les autres secteurs doivent être en déficit et accumuler une dette alors que leurs revenus restent constants.

renouvelables, créant de fait une incitation à liquider ces ressources pour rembourser les dettes; 5) les taux d'intérêt excèdent les taux de croissance, amenant à une concentration des richesses par une minorité; et 6) le système actuel ne permet pas de financer les biens publics pour répondre aux besoins. Ce chapitre se concentre sur le premier point et discute le lien entre dette, intérêt et croissance. Il laisse de côté des points importants tels que le caractère procyclique et le pouvoir déstabilisant de la dette. Pour questionner l'intrication entre dette, intérêt et croissance, ce chapitre adopte le cadre théorique de l'Économie post-keynésienne dont la monnaie constitue l'un des domaines d'étude privilégié (LAVOIE, 2014).

Nous commençons par une rapide revue de la littérature produite par les économistes écologiques sur le système monétaire et ses relations avec l'économie réelle. Nous discutons ensuite leur point de vue à l'aune de la théorie post-keynésienne de la monnaie endogène. Dans la section 2.4, nous montrons à l'aide d'un modèle cambridgien-kalecki simple que la monnaie créée par la dette portant intérêt est compatible avec un état stationnaire au sens strict. Enfin, nous comparons ce résultat avec la littérature en macroéconomie écologique et nous revenons brièvement sur la question du capitalisme stationnaire.

2.2 Ce que disent certains économistes écologiques : la création monétaire par la dette portant intérêt oblige à la croissance

Une opinion populaire dans la communauté des économistes écologiques est qu'une économie stationnaire (c'est-à-dire ici avec un PIB réel constant) requiert un taux d'intérêt nul et une monnaie créée autrement que par la dette car la monnaie-dette et un taux d'intérêt positif induisent nécessairement la croissance du PIB. Comme LIETAER *et al.* (2012) l'exposent

« Comme la monnaie dans notre système actuel est créée avec un intérêt, elle est soumise à l'intérêt composé ou "intérêt sur l'intérêt" qui implique automatiquement une croissance exponentielle (...). La question centrale est donc : quel type de croissance le système financier requiert-il de l'économie réelle? Une réponse courte est que l'intérêt composé requiert une croissance exponentielle. » (pp. 100 - 101).

FARLEY *et al.* (2013) ajoutent que

« les banques ne prêtent que le principal mais demandent un remboursement du principal plus un intérêt. Les entreprises veulent réaliser un profit sur leur investissement (...). La majeure partie du revenu des ménages provient des entreprises et est utilisée pour acheter la production de ces dernières et pour épargner. La création continue de nouvelle monnaie est la seule façon pour ces acteurs de réaliser leurs objectifs. » (p. 2808).

Cela conduit ces économistes à prôner des politiques qui « limiteraient l'impératif de croissance créé par le système de crédit portant intérêt » (*ibid.*, p. 2823). COSTANZA, ALPEROVITZ *et al.* (2013) suivent un raisonnement similaire³ :

3. Certains co-auteurs de ce rapport ne partagent pas cette opinion. Par exemple, T. JACKSON et VICTOR (2015) présentent un argumentaire similaire au nôtre en usant d'un modèle stock-flux cohérent post-keynésien comptant presque cinquante équations. Ils expliquent que « *a contrario* de certaines affirmations dans la littérature, nous ne trouvons aucun impératif de croissance émanant de l'octroi de crédit et de la dette portant intérêt » (p. 1). L'argumentaire algébrique que nous présentons plus loin dans ce chapitre peut-être considéré comme une forme réduite de leur modèle.

« La majeure partie de l'offre de monnaie est aujourd'hui le résultat du système de réserve fractionnaire. Les banques sont tenues légalement de garder un pourcentage de chaque dépôt qu'elles reçoivent : elles prêtent le reste avec un intérêt. Cependant, les prêts sont alors déposés dans d'autres banques, qui, à leur tour, peuvent les prêter déduction faite de la réserve obligatoire. Le résultat net est que la monnaie nouvelle émise par les banques, plus le dépôt initial, va être égale au dépôt initial divisé par les réserves fractionnaires. (...) Quand les prêts sont remboursés, la monnaie nouvelle est détruite. Cependant, les emprunteurs doivent rembourser les prêts plus les intérêts alors que les banques n'ont prêté que de quoi rembourser le principal. Soit de nouvelles dépenses publiques soit de nouveaux prêts sont requis pour payer l'intérêt. (...) La dette croît de façon exponentielle, obéissant aux lois abstraites des mathématiques. La production future, au contraire, se heurte aux limites écologiques et ne peut suivre le rythme. Les taux d'intérêt dépassent les taux de croissance même en période faste. Finalement, la dette, qui croît de façon exponentielle, dépasse la valeur de la richesse existante ainsi que de la richesse future et le système s'effondre. Cependant, dans leur effort pour conjurer la crise et la misère, la pauvreté et le chômage inacceptables qu'elle entraîne, les politiciens vont poursuivre des politiques de croissance infinie, insoutenable sur une planète finie. Le système nous force à choisir entre une croissance insoutenable et la misère » (pp. 42 - 44).

Ce registre d'argumentation est également présent chez DOUTHWAITE (2000) :

« Un autre problème avec la création monétaire par la dette est que, comme l'intérêt doit être payé sur sa quasi-totalité, l'économie doit croître continuellement pour éviter l'effondrement. (...) Le fait que la quantité de monnaie en circulation doit habituellement croître chaque année pour permettre le paiement des intérêts signifie que le montant total des ventes dans l'économie doit augmenter aussi si le rapport de l'offre de monnaie au total des échanges doit rester constant. L'augmentation requise des ventes peut provenir de deux sources : l'inflation et l'expansion. S'il n'y a pas d'augmentation de la production chaque année, l'augmentation de la quantité de monnaie en circulation augmenterait simplement les prix, ou permettrait aux entreprises de le faire. Cette inflation fournirait aux entreprises suffisamment de revenu additionnel pour payer leurs intérêts accrus. L'alternative est que la production augmente suffisamment pour suivre l'augmentation de la monnaie en circulation. C'est l'expansion. Bien sûr, le résultat le plus probable est une combinaison de l'inflation et de l'expansion pour restaurer l'équilibre entre la valeur des échanges et la valeur de la monnaie. Cette analyse signifie que, à cause de la façon dont la monnaie est mise en circulation, nous avons un système économique qui a besoin de croître en volume ou en valeur continûment. C'est une cause majeure du besoin continu et insatiable de notre système pour la croissance économique, un besoin qui doit être satisfait peu importe le bénéfice réel de la croissance. » (pp. 6 - 7).

Selon ces auteurs, il n'y aurait jamais assez de monnaie en circulation pour honorer les remboursements de la dette et le paiement des intérêts. Il faudrait donc sans cesse créer de la monnaie nouvelle et cela serait uniquement soutenable dans une économie en croissance. À l'instar des économistes précédents, SORRELL (2010) explique que « une explication clef de l'impératif de croissance » réside dans la « nature des systèmes monétaires modernes et dans le fait que la majeure partie de la monnaie est créée par des banques commerciales comme dette portant intérêt » (p. 1797). Selon cet auteur,

« pour éviter une spirale récessionniste, la dette totale et le montant total de monnaie en circulation doivent croître chaque année, ce qui signifie que la valeur des biens et services achetés et vendus doit aussi croître — soit par l'inflation soit par une consommation accrue. Le système monétaire crée donc

une nécessité structurelle de croissance continue et de consommation accrue (...). Mais la conséquence la plus importante est qu'une économie en croissance zéro ou faible apparaît incompatible avec un système de réserve fractionnaire. » (p. 1800).

Comme le disent FARLEY *et al.* (2013), « avec des taux d'intérêt excédant les taux de croissance, ce système monétaire est intrinsèquement insoutenable » (p. 2803). S'appuyant sur la théorie de la croissance, LOEHR (2012) partage l'opinion qu'un taux d'intérêt positif est un facteur de croissance lorsqu'il affirme que « à long-terme, l'économie doit croître à un certain taux (...). Nous aboutissons à une condition importante de la croissance zéro et de l'état stationnaire : le taux d'intérêt r atteint zéro » (p. 234).

Dans la relation entre monnaie-dette, taux d'intérêt et croissance de la production telle qu'appréhendée par certains économistes écologiques, la croissance économique est ainsi rendue nécessaire par la croissance infinie de l'offre de monnaie. Cela empêche en dernière analyse toute transition vers une société soutenable car la croissance infinie est impossible dans un monde de ressources finies. Comme le montrera la suite du chapitre, il est théoriquement infondé d'affirmer que la monnaie requiert la croissance malgré la logique apparente du raisonnement.

2.3 De l'endogénéité de la monnaie : le sens de causalité va de la croissance économique vers l'offre de monnaie et non l'inverse

Les post-keynésiens considèrent que la création monétaire est endogène : la monnaie est créée via le crédit bancaire lorsque des agents expriment une demande solvable de monnaie. Par conséquent, ils rejettent le modèle du multiplicateur monétaire ainsi que la notion de système de réserve fractionnaire. Des économistes de banques centrales et d'institutions financières rejettent également la vision en termes de multiplicateur monétaire (CARPENTER et DEMIRALP, 2012; JAKAB et KUMHOF, 2015; MCLEAY *et al.*, 2014; SHEARD, 2013). Selon LAVOIE (1996), la monnaie endogène « n'est pas une question d'institution mais plutôt une nécessité logique » (p. 533). Comme nécessité logique, l'endogénéité de la monnaie est anhistorique. Elle n'est pas une caractéristique de sociétés historiquement situées, mais elle est commune à toute économie monétaire de production — c'est-à-dire à toute économie de marché — ou à toute économie où une partie au moins de la production et de l'échange nécessite un financement *a priori*. Dans ce type d'économie, la monnaie est créée par le crédit avant le processus de production : le crédit anticipe la production validée socialement provenant des secteurs marchand et non-marchand. Enfin, la banque centrale boucle le circuit macroéconomique en refinançant les banques requérant de la monnaie banque centrale et en prêtant à l'État (HARRIBEY, 2012).

Autrement dit, la croissance de la production prend forme dans l'esprit des producteurs avant que la monnaie soit créée mais se réalise effectivement lorsque le crédit est accordé et la monnaie émise pour la financer. Comme le dit FANTACCI (2013), « le rôle de la finance est, de manière générale, de fournir une anticipation pour toutes les activités qui doivent structurellement supporter des coûts avant de générer un revenu. » (p. 336.) Bien sûr, cela n'explique pas comment tout ou partie des sociétés deviennent monétarisées. Cela s'applique à des sociétés qui sont déjà monétarisées. Mais, dans l'histoire, l'apparition de la monnaie est elle-même endogène : le crédit précède historiquement la monnaie et celle-ci est

probablement apparue comme un moyen de régler les dettes (ROCHON et ROSSI, 2013 ; TESTART, 2001).

L'échec, dans les années 1980, des politiques de ciblage de masse monétaire par les banques centrales lorsqu'elles abandonnèrent leurs cibles implicites de taux d'intérêt donne une bonne indication de l'endogénéité de la monnaie quelle que soit l'architecture institutionnelle en place. Certains post-keynésiens et historiens affirment même que l'offre de monnaie était endogène à l'ère de la monnaie marchandise ou de l'étalon-or. Des données indiquent que c'était le cas en Angleterre lors de la *Grande Inflation* qui prit place de 1520 à 1640 : la forte croissance démographique et des changements dans la répartition spatiale de la population avec une concentration urbaine accrue créèrent une pression à la hausse sur les prix. Les entrées de métaux précieux vinrent alors combler la demande supplémentaire de monnaie. Cette interprétation est également étayée par l'accélération de la vélocité de la monnaie entre 1526 et 1561 : l'inflation fut contemporaine d'une pénurie de monnaie et les entrées de métaux précieux qui arrivèrent ensuite empêchèrent la déflation (ARESTIS et HOWELLS, 2002 ; DIOP, 2014). Le cas de l'Italie fournit des indications similaires : elle connut de l'inflation essentiellement entre 1552 et 1560 sans entrée massive de métaux précieux. Le pays était en reconstruction après la guerre du début de siècle, ce qui poussait les prix à la hausse. C'est seulement après 1570 que l'Italie vit des entrées massives de métaux précieux en provenance du Nouveau Monde. C'est également à ce moment-là que des pressions déflationnistes virent le jour et les métaux précieux n'ont probablement fait que limiter la décrue des prix (CIPOLLA, 1955). Aussi, une bonne part de ces métaux précieux d'Amérique se retrouvèrent-ils en Asie pour acheter des marchandises vendues deux à quatre fois leur prix en Europe (DIOP, 2014).

L'inflation eut donc ses racines dans des phénomènes non-monétaires et l'augmentation de l'offre de monnaie fut une réponse à cette inflation. À n'importe quel moment de l'histoire le crédit et la monnaie scripturale furent à l'œuvre, fournissant les moyens de paiement requis indépendamment de la quantité disponible de la forme concrète du moyen d'échange en circulation (ROCHON et ROSSI, 2013 ; TESTART, 2001). En d'autres termes, la monnaie est indépendante de sa forme matérielle.

En résumé, c'est la croissance de la production ou la hausse des prix qui tirent la croissance de l'offre de monnaie. En aucun cas l'offre de monnaie *per se* ne peut être considérée comme causant la croissance de la production. L'offre de monnaie *permet* la croissance de la production, mais elle ne la *cause* pas. Il s'agit-là d'une nuance importante⁴. *A contrario*, certains auteurs post-keynésiens comme KEEN (2014) maintiennent que le crédit augmente la demande agrégée et peut donc générer de l'inflation si des contraintes pèsent sur la croissance de l'offre agrégée.

En conséquence, si l'économie atteint un état stationnaire où la production ne croît plus et où les prix demeurent constants, le stock de monnaie existant qui correspond au niveau actuel de la production sera suffisant : les entreprises et les ménages ne demanderont pas de monnaie supplémentaire pour faire face à leurs besoins. Un exemple simpliste est que, lorsqu'un agent se voit accorder un crédit bancaire, il n'a pas besoin d'accroître son revenu indéfiniment pour rembourser le principal et les intérêts. Même si les firmes et les ménages endettés payent des intérêts sur leurs dettes, les agents non-endettés peuvent emprunter de la monnaie et maintenir le stock de monnaie constant sans qu'un risque de défaut systémique n'apparaisse sur les dettes existantes. Comme l'explique LAVOIE (2014),

4. Nous développons un argument similaire au chapitre 3 dans la discussion de la littérature sur le lien de causalité entre croissance de l'offre d'énergie et croissance du PIB.

« Ainsi, bien que les post-keynésiens ne cessent de dire que "les prêts font les dépôts", ce qui implique qu'accorder un nouveau prêt crée un nouveau dépôt, il faut bien comprendre que si les ménages décident d'augmenter leur dépense, la monnaie des acheteurs va se retrouver dans les comptes des vendeurs. Cela va leur permettre, s'ils le souhaitent, d'utiliser ces nouveaux dépôts pour rembourser leur dette et de réduire l'encours de leurs prêts. Il y a donc une double-causalité possible entre les prêts et les dépôts bancaires. » (p. 197).

Une économie stationnaire où production et niveau des prix demeurent constant peut donc s'articuler avec des taux d'intérêt positifs si le stock de dette demeure, lui aussi, constant. Le mécanisme de reflux exposé ci-dessus montre que les stocks de dette et de monnaie n'augmenteront pas si les agents économiques n'expriment pas de demande de monnaie supplémentaire. Il semble donc que certains économistes écologiques traitant des questions monétaires confondent stocks et flux, ce qui les conduit à poser des conditions superflues à l'émergence d'un état stationnaire. Ce qui doit demeurer constant est le stock, soit la dette, mais il n'est pas nécessaire que le flux, en l'occurrence l'intérêt, soit nul. Il s'en suit qu'une monnaie non-dette n'est pas non plus une condition nécessaire de l'état stationnaire.

2.4 Monnaie-dette et intérêts dans une économie stationnaire : un modèle simple cambridgien-kaleckien ancré dans l'approche stock-flux cohérente

Le pré-requis écologique est que l'économie doit atteindre la décroissance ou, au moins, l'état stationnaire avec une croissance zéro. Dès lors, il s'agit de savoir si un système économique doté d'un système financier complet et en état de marche peut exister sous la condition de croissance-zéro. Revisiter les équations de Kalecki et de Cambridge aide à montrer théoriquement qu'un système financier complet peut fonctionner dans une économie stationnaire. De prime abord, cela apparaît incertain si l'on regarde l'équation des profits de KALECKI (1971), qui donne :

$$P = I + C_p - S_w + (G - T) \quad (2.1)$$

où I est l'investissement, C_p est la consommation à partir des profits, S_w est l'épargne sur les salaires et $(G - T)$ le déficit public. Il apparaît que si l'épargne nette du secteur privé est nulle ($S_w - C_p = 0$), si le budget du gouvernement est à l'équilibre ($G - T = 0$) et s'il n'y a pas d'investissement net ($I = 0$), alors le profit net est également nul. Ceci dépeint un état stationnaire au sens strict, car la dette publique demeure constante. D'autres états stationnaires sont possibles, par exemple en cas d'épargne du secteur privé et de déficit public ou de désépargne du premier et d'excédent budgétaire du second, ce qui donne alors : $C_p - S_w = T - G \neq 0$. Cependant, de tels états stationnaires ne sont pas soutenables car ils impliquent que la dette publique augmente infiniment ou que la richesse privée diminue continuellement.

Le mystère réapparaît si l'on regarde l'équation de Cambridge (LAVOIE, 2014, p. 214), bien connue des économistes hétérodoxes. Cette équation lie le taux de profit agrégé et le taux de croissance de l'économie tel que

$$r = \frac{g}{s_p} \quad (2.2)$$

Cette équation s'applique dans une économie fermée telle que l'économie globale. s_p est la propension à épargner sur les profits. Pour simplifier, on fait l'hypothèse que la propension moyenne à épargner sur les salaires est nulle⁵. $r = P/K$ est le taux de profit, soit le ratio du profit P sur le stock de capital K ; $g = I/K$ est le taux d'accumulation ou taux de croissance du capital, avec I l'investissement. À l'état stationnaire, le taux d'accumulation du capital est égal au taux de croissance du PIB⁶. Le mystère reste entier car avec une croissance zéro, l'équation de Cambridge implique que $g = r = 0$, ce qui veut dire que le taux de profit (net de la dépréciation du capital) est nul. Si les entreprises ne font pas de profit net, comment peuvent-elles payer les intérêts sur leurs emprunts bancaires ?

GODLEY et LAVOIE (2012) apportent une solution simple à ces deux mystères. Dans leurs modèles, l'économie atteint un état stationnaire malgré le paiement des intérêts sur les prêts des banques et malgré la réalisation d'un profit net par les entreprises. La solution réside dans l'addition d'un terme supplémentaire à l'équation des profits la consommation sur la richesse réelle et financière. L'équation de Kalecki doit donc être augmentée de ce terme, noté C_v , ce qui donne :

$$P = I + C_p - S_w + (G - T) + C_v \quad (2.3)$$

Là encore, pour rester stationnaire, l'investissement net privé doit être nul ($I = 0$), tandis que le budget public doit être équilibré ($G - T = 0$). L'épargne privée totale S doit aussi être nulle. Comme il y a une désépargne sur la richesse, l'état stationnaire peut être atteint malgré la présence d'une épargne sur les profits. En maintenant l'hypothèse simplificatrice d'une épargne nulle sur les salaires ($S_w = 0$), l'épargne privée est maintenant :

$$S = S_p - C_v = s_p P - c_v V = 0 \quad (2.4)$$

où c_v est la propension à consommer à partir de la richesse et où V est la richesse du secteur privé. En résolvant l'équation 2.4, nous voyons que les profits peuvent être positifs malgré la contrainte d'une épargne privée nulle à l'état stationnaire. Nous obtenons :

$$P = \frac{c_v V}{s_p} \quad (2.5)$$

Cela montre que des profits nets positifs ne sont pas incompatibles avec une économie sans croissance. Ainsi, *a contrario* de ce qu'affirment certains économistes écologiques, une situation où le taux de profit ou le taux d'intérêt est supérieur au taux de croissance de l'économie (ce qui est le cas lorsque la croissance est nulle) n'est pas une situation insoutenable.

En effet, si l'on regarde l'équation 2.2, on voit que, comme la propension à épargner sur les profits s_p

5. Cela ne signifie bien sûr pas que les ménages n'épargnent pas mais que l'épargne des uns est compensée par la désépargne des autres.

6. L'équation 2.2 s'obtient depuis l'équation 2.1 en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de secteur public ou que le budget public est à l'équilibre ($G - T = 0$), avec $S_w = 0$ et $C_p = (1 - s_p)P$, si bien que $P = I + (1 - s_p)P$ ou $P = I/s_p$, et l'on divise alors par K .

est inférieure à l'unité, nous avons en général une situation où le taux de profit est supérieur au taux de croissance de l'économie : $r > g$. Il s'agit-là de la situation la plus probable⁷.

Il est possible d'en dire davantage sur les conditions gouvernant un état stationnaire. Souvenons-nous que dans une telle situation la dette publique doit demeurer constante, ce qui équivaut à un déficit public nul. Cela signifie que les dépenses publiques sur les biens et services, ce que GODLEY et LAVOIE (2012) désignent comme dépenses publiques pures, doivent être égales au produit net de l'impôt, c'est-à-dire à l'impôt collecté par le gouvernement déduction faite des transferts, ici égaux aux paiements des intérêts sur la dette publique. Soit le taux d'imposition t s'appliquant de façon proportionnelle à toute activité économique (PIB) et aux intérêts reçus par le secteur privé sur la dette publique qu'il détient. Avec Y le PIB, B la dette publique et i le taux d'intérêt sur la dette publique, l'état stationnaire requiert que l'identité suivante soit vérifiée :

$$G = tY + tiB - iB = tY - (1 - t)iB \quad (2.6)$$

Si l'on résout l'équation 2.6 pour obtenir Y , on aboutit à un résultat standard pour l'état stationnaire dans les modèles stock-flux cohérents :

$$Y = \frac{G + (1 - t)iB}{t} \quad (2.7)$$

Expliciter les transferts du gouvernement et l'impôt révèle que l'équation 2.5 est une simplification abusive car elle ne prend pas ces éléments en compte. Dans un modèle vraiment stock-flux cohérent, l'équation de l'épargne serait réécrite comme suit :

$$S = s_p(P + iB)(1 - t) - c_v V = 0 \quad (2.8)$$

De là, les profits sont maintenant égaux à

$$P = \frac{c_v V}{s_p(1 - t)} - iB \quad (2.9)$$

Comme nous faisons l'hypothèse que la dette publique est détenue par les ménages, le flux iB affecte négativement le profit car même s'il accroît V (comme il apparaît dans l'équation 2.10 ci-dessous), il accroît également l'épargne, ce qui, *ceteris paribus*, diminue les profits.

Ici, cependant, la dette publique B comme la richesse totale V sont des variables endogènes, ce qui rend nécessaire de trouver leur expression à l'état stationnaire. Cela nécessite quelques hypothèses supplémentaires. Avant cela, nous pouvons noter que la richesse V se décompose en deux éléments : le stock de capital fixe K et le stock de dette publique B :

$$V = K + B \quad (2.10)$$

Nous faisons aussi l'hypothèse d'une relation technologique entre le stock de capital et la capacité

7. Les données de PIKETTY (2013) étayent largement ce fait.

productive du secteur privé, soit :

$$K = kY \quad (2.11)$$

Enfin, nous formulons l'hypothèse, habituelle chez les post-keynésiens, que les profits sont une part donnée du revenu :

$$P = \pi Y \quad (2.12)$$

En combinant 2.9 à 2.12, nous obtenons une nouvelle expression de Y telle que⁸

$$Y = \frac{c_v(kY + B)}{\pi s_p(1-t)} - \frac{iB}{\pi} \quad (2.13)$$

Ce qui donne :

$$Y = \frac{c_v B - i B s_p(1-t)}{\pi s_p(1-t) - c_v k} \quad (2.14a)$$

Si l'on pose $D = \pi s_p(1-t) - c_v k$, nous avons :

$$Y = \frac{c_v B - i B s_p(1-t)}{D} \quad (2.14b)$$

Nous pouvons utiliser les équations 2.14b et 2.7 pour trouver l'expression de B :

$$B = \frac{GD}{c_v t - i s_p(1-t)t - (1-t)iD} \quad (2.15)$$

En substituant 2.15 dans 2.14b, nous obtenons l'expression de Y à l'état stationnaire au sens strict pour des valeurs données de G et des paramètres :

$$Y = \frac{G[c_v - i s_p(1-t)]}{[c_v - i s_p(1-t)]t - (1-t)iD} \quad (2.16)$$

Enfin, si nous substituons 2.16 dans 2.12, nous obtenons l'expression du profit à l'état stationnaire au sens strict :

$$P = \pi \frac{G[c_v - i s_p(1-t)]}{[c_v - i s_p(1-t)]t - (1-t)iD} \quad (2.17)$$

Revisiter les équations de Cambridge et de Kalecki permet donc de montrer que des taux d'intérêt positifs et la monnaie-dette ne sont pas incompatibles avec une économie stationnaire au sens strict, ce qui contredit une croyance populaire en Économie écologique. Les équations 2.16 et 2.17 illustrent bien, cependant, que le profit dans un tel état stationnaire est conditionnel. En particulier, le taux d'intérêt i et la propension à épargner sur les profits, s_p , ne doivent pas être trop élevés. Dans un monde sans

8. Les équations intermédiaires sont présentées dans l'annexe A.

croissance il est probable que s_p serait faible car il n'y aurait aucun investissement net : les entreprises n'auraient pas besoin de conserver leurs profits⁹. Comme c'est le cas pour les banques, pour atteindre un état stationnaire au sens strict l'entreprise productrice ne doit pas accumuler de capitaux propres sinon cela imposerait à la dette publique ou à la dette des ménages de croître indéfiniment, comme nous l'avons expliqué précédemment. Il s'en suit que, dans une économie strictement stationnaire, s_p dépendrait essentiellement du comportement des ménages. Bien que notre modèle soit simpliste et laisse de côté des questions importantes, il confirme de façon claire et intuitive les résultats obtenus par des modélisations stock-flux cohérentes nettement plus complexes (BERG *et al.*, 2015 ; GODLEY et LAVOIE, 2012 ; T. JACKSON et VICTOR, 2015).

La théorie de la monnaie endogène comme notre modèle indiquent qu'aucun impératif de croissance ne naît dans le processus de création monétaire. D'autres facteurs peuvent être à l'œuvre, comme la croissance démographique, les relations sociales de production entre travailleurs et propriétaires du capital, la concurrence marchande, l'élargissement du champ du marchand ou l'accumulation pour elle-même — dont plusieurs sont spécifiques au système historiquement situé qu'est le capitalisme, comme nous l'avons discuté au chapitre 1. Un système économique doté d'un système financier complet peut donc fonctionner sans qu'apparaisse un impératif de croissance. Il est d'ailleurs intéressant de noter que la dette et l'intérêt existaient bien avant que les économies capitalistes modernes organisées autour de la croissance comme fin n'apparaissent en Occident¹⁰. C'était par exemple le cas dans l'ancienne Mésopotamie, dans l'ancienne Italie, dans le jeune monde musulman et dans l'Inde du Moyen-âge (GRAEBER, 2011 ; HUDSON, 2002 ; RODINSON, 1966). Il est vrai, cependant, que la monnaie-dette et l'intérêt n'étaient à l'œuvre que dans quelques secteurs de ces formations socioéconomiques non capitalistes : il n'y a donc pas de comparabilité directe avec des économies monétaires de production dans lesquelles le circuit de la production et celui de la monnaie se superposent totalement.

2.5 Discussion

Afin de mettre ce chapitre en perspective nous le situons brièvement dans la littérature des modèles abordant la question de l'impératif monétaire de croissance et nous discutons ensuite de la question de la stabilité de ces modèles. Enfin, nous opérons un bref retour sur la question du capitalisme stationnaire.

9. Dans une économie en croissance s_p est plus élevé que s_w car les profits finançant une partie de l'investissement des entreprises sont épargnés par définition. Nous remercions Oliver Richters d'avoir attiré notre attention sur le fait que des valeurs positives et les conditions de stabilité imposent des contraintes sur la valeur des paramètres.

10. Le processus d'émergence du capitalisme et sa date de naissance sont sujets à de longs et anciens débats (HUGOT, 2013 ; NOREL, 2013). Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur ces questions, l'émergence du capitalisme est généralement datée entre le xvi^e et le xviii^e siècles en Europe, même si, pour Wallerstein, le capitalisme naît sous forme bancaire dans les cités marchandes italiennes au xiii^e siècle tandis que l'organisation capitaliste de la production ne s'est répandu que plus tard (BRENNER, 1977 ; MEIKSINS WOOD, 2002 ; WALLERSTEIN, 2011). Une vision discordante, notamment celle de FRANK (1993), considère que le capitalisme a toujours existé sous diverses formes en raison de l'accumulation imposée par la lutte entre États depuis l'Antiquité (HUGOT, 2013). Toutefois, Frank ne démontre pas que l'accumulation pour elle-même était la norme depuis l'Antiquité, de plus nous ne pouvons pas « réduire le capitalisme à un simple inventaire d'éléments tels que la monnaie, les marchands, l'investissement, et la technologie, sauf effectivement à dire que le capitalisme n'est rien. » (NOREL, 2013, p. 74).

2.5.1 Convergence de résultats et condition de stabilité

La littérature récente a vu un certain nombre de travaux théoriques s'emparer de la question de l'impératif monétaire de croissance. Nous mettons brièvement en perspective le présent chapitre avec ces résultats. On revient ensuite sur les conditions de stabilité évoquées précédemment.

Une convergence de résultats qui démentent l'existence d'un impératif monétaire de croissance

BERG *et al.* (2015) proposent un modèle stock-flux cohérent intégrant également les flux physiques via une structure input-output à quatre secteurs (ménages, gouvernement-banque consolidé, industrie et secteur énergétique). Les auteurs étudient notamment la compatibilité entre taux d'intérêt positif et état stationnaire. Ils trouvent qu'il n'y a pas d'incompatibilité, à condition toutefois que la consommation à partir de la richesse se situe au-dessus d'un seuil de stabilité. Dans un modèle stock-flux cohérent à cinq secteurs, dont un système financier complet avec banques et banque centrale, T. JACKSON et VICTOR (2015) traitent spécifiquement de la question de l'impératif monétaire de croissance. Ils trouvent que l'économie converge vers un état stationnaire en présence de dette et de paiement des intérêts, cela y compris lorsqu'un ratio prudentiel de capitaux propres et un ratio de réserve obligatoires sont imposés aux banques dans le modèle. A. B. BARRETT (2017) utilise, quant à lui un modèle minskyen pour tester la stabilité de scénarios de croissance et d'état stationnaire ainsi que l'évolution de la stabilité lors de la transition de l'un à l'autre. L'auteur montre que des économies croissantes ou stationnaires peuvent être stables à condition que le niveau de dette ne varie pas trop fortement et que le niveau d'endettement cible réponde modérément à la part du profit et à la croissance. L'auteur ne trouve aucun impératif de croissance imposé par le taux d'intérêt. Enfin, il faut souligner que la convergence vers un état stationnaire en présence d'un taux d'intérêt positif est une propriété commune de la majeure partie des modèles stock-flux cohérents post-keynésiens.

Quelles conditions de stabilité et de signification économique de notre modèle ?

RICHTERS et SIEMONEIT (2017a) prolongent l'étude des conditions de stabilité dans leur revue de littérature consacrée à l'impératif monétaire à la croissance. La stabilité du modèle signifie qu'il converge vers un point fixe stable (l'attracteur) après une perturbation, lequel correspond à l'état stationnaire. Si le point fixe n'est pas stable, une économie dont les valeurs de départ ne correspondent pas à ce point ne convergera jamais vers l'état stationnaire correspondant. Les auteurs soulignent que cela n'est pas synonyme d'instabilité économique : cela peut correspondre à un état de croissance constante.

Les auteurs analysent cinq modèles post-keynésiens (dont le nôtre). Ils concluent à l'absence d'impératif monétaire de croissance, à condition toutefois que soit respecté un niveau minimal de consommation à partir de la richesse. Cette condition est nécessaire pour que les modèles convergent vers un état stationnaire stable : s'il y a convergence, cela signifie qu'il n'existe pas d'impératif monétaire de croissance. Pour cela, la propension à consommer c_v doit se situer au-dessus d'un seuil qui augmente avec le taux d'intérêt. Les auteurs en fournissent l'expression pour notre modèle afin qu'il atteigne un état stationnaire stable.

Ils partent d'une expression réarrangée de l'équation 2.16¹¹ :

$$Y = G \frac{c_v - s_p i(1-t)}{c_v(k(1-t)i + t) - s_p i(1-t)(t - \pi(1-t))} \quad (2.18)$$

Pour que le modèle converge vers un état stationnaire stable, il faut que Y soit défini, ce qui requiert que le dénominateur soit strictement positif. Cela donne la contrainte de seuil que doit respecter le paramètre c_v :

$$c_v > \frac{s_p i(1-t)(t - \pi(1-t))}{t + (1-t)ik} \quad (2.19)$$

On remarque toutefois que si cette condition est nécessaire pour que Y soit défini, elle ne garantit pas, pour autant, que Y ait un sens économique. Pour cela, il faut, suivant la définition comptable du PIB, que $Y > G$, c'est-à-dire que le numérateur soit strictement supérieur au dénominateur dans (2.18). Cela nous donne la condition suivante :

$$c_v > \frac{s_p i(1-t)[1 - (t - \pi(1-t))]}{1 - [t + (1-t)ik]} \quad (2.20)$$

2.5.2 Un commentaire sur la controverse du capitalisme sans croissance

En prolongement du chapitre 1, les développements théoriques du présent chapitre peuvent aider à éclairer le débat entre économistes écologiques et éco-marxistes. On conserve la même définition du capitalisme, soit un système socioéconomique où la propriété des moyens de production est privée et où opère une division sociale du travail encadrée dans un rapport marchand dont la fin est l'accumulation du capital.

À l'état strictement stationnaire, nous avons $S = 0$ (2.4) et $V = K + B$ (2.10). Comme $I = 0$, que la dette publique est constante et que l'épargne nette est nulle, il n'y a pas d'accumulation du capital. Si l'on fait l'hypothèse que la richesse privée est équivalente au capital entendu au sens large¹², aucune accumulation de capital supplémentaire n'intervient pour le secteur privé dans sa globalité. Dès lors, nous pouvons nous demander si un tel système est un système capitaliste.

Comme nous l'avons signalé au chapitre précédent, les expériences historiques de stagnation séculaire montrent qu'un capitalisme à croissance faible ou nulle est possible mais que cela est synonyme de capitalisme en crise. Si les rapports sociaux capitalistes demeurent dans une économie stationnaire, les ménages et les entreprises chercheraient sans doute à accroître leur richesse. Le présent chapitre indique que cela mène à deux résultats possibles : (1) soit l'économie demeure stationnaire et l'épargne nette du secteur privé aurait forcément pour contrepartie une dette publique indéfiniment croissante¹³ tandis qu'un accroissement du capital de certaines entreprises ne pourrait avoir lieu qu'au prix de la

11. Les étapes intermédiaires sont également indiquées à l'annexe A

12. Une définition du capital qui se rapproche de celle de Piketty mais qui n'est pas sans soulever des critiques. Voir par exemple GALBRAITH (2014) sur Piketty.

13. Bien sûr, en économie ouverte, l'épargne étrangère peut équilibrer le déficit public en complément de l'épargne du secteur privé domestique. Cependant, nous pouvons considérer que l'état stationnaire s'appliquerait à l'économie globale et celle-ci est une économie fermée.

diminution du stock de capital d'autres entreprises ; (2) soit, simplement, l'économie recommencerait à croître. Si l'économie demeurait dans un état strictement stationnaire, l'épargne et l'investissement nets par quelques ménages et entreprises ne pourraient intervenir qu'aux dépens d'autres ménages et entreprises. BLAUWHOF (2012) parvient à une conclusion similaire en traitant de l'accumulation sans croissance.

Dans une économie sans croissance, comme la richesse et la distribution du revenu global sont un jeu à somme nulle, il est évident que les problématiques de concentration des richesses et d'inégalités de revenu deviennent encore davantage pressantes qu'elles ne le sont déjà. Il n'est pas surprenant qu'une économie stationnaire engendre des conflits de répartition encore plus violents que dans une économie en croissance. Il apparaît alors qu'une économie strictement stationnaire ne pourrait probablement pas être organisée autour des rapports sociaux constitutifs du capitalisme.

2.6 Conclusion

Ce chapitre est d'abord une tentative d'approfondir le dialogue entre économistes écologiques et post-keynésiens. Les analyses monétaires de certains économistes écologiques divergent nettement de celles des économistes post-keynésiens concernant les liens monnaie-croissance. Du point de vue post-keynésien de la monnaie endogène et de la tradition Cambridgienne-Kaleckienne, nous pouvons douter que taux d'intérêt positifs et monnaie-dette soient incompatibles avec une économie en état stationnaire strict. La condition, toutefois, est que les intérêts soient réinjectés dans le circuit de la monnaie via la consommation à partir de la richesse. Dans une telle économie stationnaire, les banques (et les entreprises) verraient leurs fonds propres demeurer constants, ce qui signifie qu'elles distribueraient l'ensemble de leurs profits sous forme de dividendes.

D'un point de vue post-keynésien écologique, le processus de création monétaire ne semble donc pas être un réel problème. Il ressort de ce travail que ce sont davantage la structure productive des économies modernes et les rapports sociaux de production qui doivent évoluer afin de ne plus faire de la croissance infinie le fondement et le principe organisateur de nos sociétés.

Conclusion de la première partie

Dans cette première partie, nous avons examiné la possibilité d'un état-stationnaire du point de vue des rapports sociaux de production et du point de vue du système monétaire. Le chapitre 1 nous amène à conclure que la nécessité de la croissance est une propriété émergente des rapports sociaux capitalistes et non celle d'une configuration institutionnelle déterminée *a priori*. Autrement dit, si l'on tient compte des lois de la thermodynamique, le capitalisme comporte une tendance structurelle et intrinsèque à la destruction de l'environnement. Le deuxième chapitre propose à l'inverse une réfutation d'une croyance répandue chez certains économistes écologiques : l'existence d'un impératif monétaire de croissance dû à la création monétaire par le crédit avec intérêts.

Qui pense quoi ?

Il est intéressant de noter ici que certains auteurs cités dans cette première partie concluent à l'existence d'un impératif monétaire de croissance mais pas à celle d'un impératif réel de croissance tandis que d'autres économistes écologiques concluent à l'absence totale d'impératif de croissance.

Auteur mentionné	Impératif réel	Impératif monétaire
Daly	Non	Oui
Lawn	Non	Oui
Jackson	Non	Non
Victor	Non	Non
Farley	?	Oui
Richters	Oui	Non
Cahen-Fourot	Oui	Non

TABLEAU 2.1 – Positions de certains économistes écologiques quant à l'existence d'un impératif à la croissance émanant des sphères réelles et monétaires et comparaison avec notre propre position. Même si l'on ne mentionne ses travaux qu'au chapitre 2 avec l'article de BERG *et al.* (2015), Richters a produit des revues de littérature sur les différents impératifs de croissance possibles (voir RICHTERS et SIEMONEIT (2017b,c).

Le tableau 2.1 synthétise l'état des opinions pour quelques auteurs et nous situe en comparaison. Le chapitre 1 amène à conclure à un impératif de croissance émergeant de la sphère réelle alors que le chapitre 2 dément l'existence d'un tel impératif de croissance qui émergerait de la sphère monétaire.

Suggestion pour l'Économie écologique

Il nous semble qu'appréhender les dynamiques de la nature en considérant le rôle fondamental joué par le rapport marchand et le rapport salarial implique, sinon d'amender, du moins de compléter le projet épistémologique initial de l'Économie écologique. Il ne s'agit bien sûr pas de remettre en cause la réalité physique de l'encastrement de la société et de l'économie dans la nature. Il s'agit de reconnaître que coexiste, à côté de cette réalité physique, une réalité socioéconomique dans laquelle la société et la nature sont aliénées aux logiques propres de l'économie marchande. Un enjeu pour l'Économie écologique serait donc de saisir les deux réalités dans un cadre théorique cohérent et intégré. Si l'on part du schéma traditionnel mis en avant par les économistes écologiques pour expliquer leur démarche — qui montre l'économie encadrée dans la société elle-même encadrée dans la nature (MARTINEZ-ALIER, 2014 ; VICTOR, 2008) — cela pourrait donner la figure 2.1.

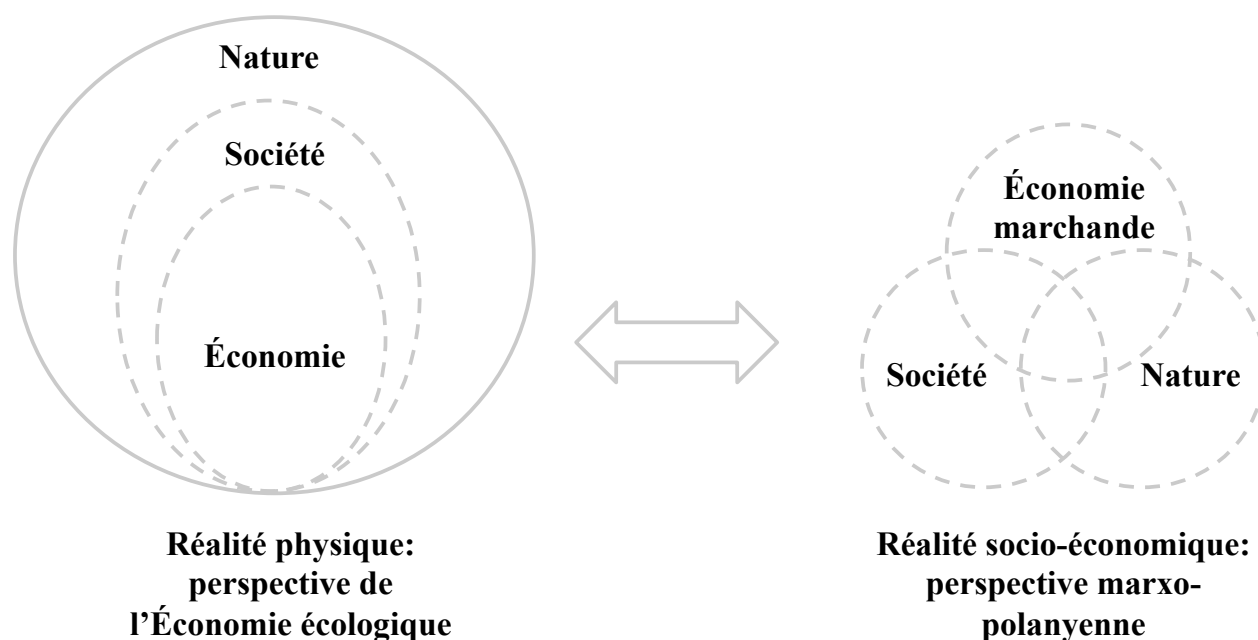


FIGURE 2.1 – Complétion possible du cadre épistémologique de l'Économie écologique.

Le fait de ne pas superposer totalement les trois sphères ni de les encadrer l'une dans l'autre illustre leur dualisme de propriété (MALM, 2017). Cela permet d'illustrer, aussi, le processus progressif de désencastrement de la sphère marchande des autres sphères. Chacune de ces trois sphères a ses logiques propres produisant un certain nombre de contraintes qui s'exercent en retour sur les autres sphères. Ces contraintes prennent corps dans des interactions permanentes dont naissent les tensions et les incompatibilités à la source de l'insoutenabilité du mode de production capitaliste. Par exemple, la zone où la sphère de la société et de la nature se superposent peut recouvrir toutes les valeurs d'usage de l'environnement et ses dimensions qualitatives, de même que les problèmes de santé publique qui émergent des dégradations environnementales. La sphère entre économie marchande et nature peut

recouvrir la mise au travail de la nature par le capital via l'exploitation des ressources naturelles ainsi que toutes les activités marchandes liées à l'environnement. Enfin, la zone de rencontre entre les trois sphères peut recouvrir les rapports de force politiques et les compromis institutionnalisés qui émergent des tensions entre société, économie marchande et nature (un point que l'on aborde notamment au chapitre 3).

Il n'y a donc pas d'antagonisme entre la perspective traditionnelle de l'Économie écologique et celle des éco-marxistes. Nous avons souligné que la critique thermodynamique est contenue dans le cadre de la seconde contradiction du capitalisme. La perspective de l'Économie écologique est aussi compatible avec la théorie de la rupture métabolique qui met en évidence la rupture des cycles naturels par la ponction opérée par l'humanité et l'appauvrissement des écosystèmes. L'enjeu principal réside alors dans la reconnaissance des spécificités historiques des mécanismes contemporains des crises écologiques et dans l'élaboration d'un cadre macroéconomique qui a manqué à l'Économie écologique mais qui émerge aujourd'hui (REZAI et STAGL, 2016).

Toutefois, il est juste de noter que les insuffisances pointées à propos du cadre d'analyse de certains économistes écologiques sont partagées : si elles fournissent un cadre théorique cohérent, l'Économie marxiste, l'Économie post-keynésienne et, nous le verrons, l'École de la régulation ont longtemps pêché par leur manque de prise en compte des problématiques environnementales. La mise en dialogue de ces approches avec l'Économie écologique est donc potentiellement féconde. La seconde partie de la thèse se propose modestement de contribuer à pallier ces insuffisances et de poursuivre l'intégration de ces différentes approches à partir d'études empiriques des dynamiques du carbone et de l'énergie dans le contexte des régimes d'accumulation et des capitalismes contemporains.

Deuxième partie

Dynamiques du capital, de l'énergie et du carbone entre régimes d'accumulation et capitalismes contemporains

Introduction à la deuxième partie

La deuxième partie est consacrée à l'analyse des dynamiques conjointes de l'énergie, du carbone et de l'accumulation du capital. Cette partie s'inscrit dans le cadre de l'intégration croissante des problématiques environnementales à l'École de la Régulation ainsi que de l'Économie écologique avec les approches macroéconomiques hétérodoxes. Elle se compose de trois chapitres qui se placent dans une perspective historique pour les deux premiers et spatiale pour le troisième. Le chapitre 3 analyse, en effet, l'évolution du rapport social à l'énergie dans cinq pays à haut revenu depuis 1950 jusqu'à aujourd'hui. Le chapitre 4 prolonge le précédent au gré d'une analyse économétrique de la relation entre le PIB et les émissions de CO₂ pour la France depuis l'après-guerre qui tient compte du changement de régime d'accumulation et des effets asymétriques possibles des différents rythmes de croissance du PIB sur le CO₂. Le chapitre 5, quant à lui, replace l'analyse des négociations climatiques dans le contexte du capitalisme contemporain en proposant une typologie des ambitions en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre reliée aux caractéristiques structurelles des capitalismes nationaux des principaux pays émetteurs.

C'est ainsi que notre chapitre 3 part du constat que l'intégration des problématiques environnementales à la Régulation est nouvelle et demeure à développer pleinement d'une part, et que le cadre analytique de certains économistes écologiques sur les dynamiques de l'énergie dans le capitalisme n'est pas satisfaisant, d'autre part. Il propose une analyse des données énergétiques produites par ces économistes écologiques à l'aune du cadre théorique régulationniste. Ce dernier est augmenté de certains travaux d'histoire et de sciences politiques montrant l'importance de l'énergie dans les rapports de classe et, donc, dans les configurations institutionnelles régulant le capitalisme. Notre objectif sera donc de caractériser les régimes d'accumulation fordiste et néolibéral à l'aune de leur rapport social à l'énergie. Le chapitre 4 analyse, quant à lui, la relation entre le PIB et les émissions de CO₂ pour toute la période 1950-2013 ainsi que pour les sous-périodes fordiste et néolibérale. L'objectif sera de confirmer les résultats du chapitre 3 en appliquant une technique économétrique récente. Il sera aussi de revisiter la relation PIB-CO₂ en adoptant une distance critique vis-à-vis de l'analyse classique en termes de courbe de Kuznets environnementale. Nous montrerons, en effet, que le cadre théorique régulationniste fournit un fondement théorique pertinent et potentiellement plus fécond à l'étude de cette relation. Enfin, le chapitre 5 proposera une analyse du positionnement de chaque pays en termes de réduction d'émission de gaz à effet de serre replacé dans le contexte des capitalismes nationaux contemporains en décelant l'importance d'un certain nombre de facteurs structurels tels que la structure productive, les rapports de

classe et l'existence d'un bloc social dominant en faveur des politiques environnementales.

Cette seconde partie sera donc, aussi, un moyen de prolonger les quelques travaux régulationnistes proposant une analyse empirique des problématiques environnementales au niveau macroéconomique tout en esquissant ce que pourrait être une intégration de l'Économie écologique et de l'École de la Régulation en termes théoriques et empiriques.

Le rapport social à l'énergie du fordisme au capitalisme néolibéral : une étude empirique et macroéconomique comparée dans les pays riches (1950-2010) ¹

3.1 Introduction

L'intégration de la question environnementale à la Théorie de la régulation (TR) reste un chantier largement ouvert. Les premiers travaux remontent aux années 1990 (DRUMMOND et MARSDEN, 1995; GIBBS, 1996; LIPIETZ, 1995, 1997; ZUINDEAU, 2007) et n'ont été suivis que par un nombre limité de contributions (BECKER et RAZA, 2000; CHESTER, 2010; DOUAI et MONTALBAN, 2012; DURAND et LÉGÉ, 2013; ÉLIE *et al.*, 2012; ZUINDEAU, 2007). Il est révélateur que ce thème soit absent de la première introduction de BOYER (2004) alors que la seconde se limite à un bref développement portant sur les « dispositifs institutionnels de l'environnement » (BOYER, 2015).

Ce chapitre entend contribuer à combler le déficit d'attention pour les questions d'environnement parmi les travaux régulationnistes en proposant un examen macroéconomique de la relation sociale à l'énergie dans le contexte du régime d'accumulation fordiste (AGLIETTA, 1997; BOYER et SAILLARD, 2002; MAZIER *et al.*, 1993) et du régime financiarisé et mondialisé en place depuis les années 1970. Ce dernier régime que nous qualifions, à la suite de nombreux auteurs (notamment DUMÉNIL et LÉVY (2014), HARVEY

1. Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans une version légèrement différente : CAHEN-FOUROT et DURAND (2016)

(2014), M. HUSSON (2012)), de capitalisme néolibéral se caractérise par l'érosion de la protection sociale et des fonctions entrepreneuriales de la puissance publique, la montée en puissance d'un État organisateur des marchés, la libéralisation des flux de capitaux, des biens et de services ainsi que par l'émergence de la finance comme secteur dominant de l'économie. En nous focalisant sur la dimension énergétique, nous allons montrer que capitalisme fordiste et capitalisme néolibéral se distinguent aussi du point de vue du rapport à l'environnement. Sur la figure 3.1, la rupture de tendance dans l'intensité en énergie du PIB dans les principales économies riches illustre l'idée selon laquelle le basculement d'un mode de régulation à un autre au tournant des années 1970 a une dimension environnementale. Ce fait stylisé majeur, déjà identifié par WIEDENHOFER *et al.* (2013), constitue le point de départ de cette contribution. L'objectif est d'établir, au niveau macroéconomique, cette rupture dans l'usage de l'énergie et d'explorer comment les modes d'utilisation de l'énergie propres à chacun des deux régimes s'articulent avec leurs caractéristiques en termes de productivité du travail et de partage de la valeur ajoutée.

Ce chapitre fait dialoguer l'approche régulationniste avec l'Économie écologique et les travaux d'histoire environnementale, en particulier la perspective tracée par Timothy Mitchell dans son ouvrage *Carbon Democracy* (2013). Sur le plan empirique, il jette les bases d'une analyse comparative de l'utilisation de l'énergie centrée sur les principales économies à haut revenu (Allemagne, États-Unis, France, Japon et Royaume-Uni) entre 1950 et 2010. Les statistiques descriptives présentées sont construites à partir, d'une part, de données sur l'exergie et le *travail utile*² (AYRES et WARR, 2005; SERRENHO *et al.*, 2014) – qui mesurent respectivement la partie de l'énergie pouvant fournir un travail mécanique et l'exergie effectivement utilisée dans le processus de production³ – et, d'autre part, de séries longues sur le CO₂ importé calculées à partir des tables input-output (LENZEN *et al.*, 2013).

La première section explicite notre conceptualisation du rapport social à l'environnement dans sa dimension énergétique. La seconde section expose les enjeux méthodologiques de la mesure de l'utilisation et de l'efficacité de l'énergie et propose une discussion critique des travaux récents de l'Économie écologique sur ce sujet. La troisième section présente des faits stylisés permettant de distinguer la période fordiste de la période néolibérale du point de vue de l'utilisation de l'énergie. La quatrième section met en rapport des faits stylisés avec les dynamiques de la productivité du travail et du partage de la valeur ajoutée, deux indicateurs essentiels pour mettre au jour les caractéristiques des régimes d'accumulation fordiste et néolibéral. La conclusion résume nos résultats, en indique les limites et les prolongements possibles.

3.2 La relation sociale à l'énergie dans une perspective régulationniste

Une des premières tentatives de théoriser le rapport social à l'environnement dans la TR revient à BECKER et RAZA (2000) qui le considèrent comme une sixième forme structurelle des modes de régulation du capitalisme. À la suite des résultats des économistes écologistes (GEORGESCU-ROEGEN, 1995; MARTINEZ-

2. Ce terme sera en italique afin de bien distinguer cette notion de physique du travail entendu au sens de travail humain.

3. On revient plus loin sur la définition et le choix de ces mesures.

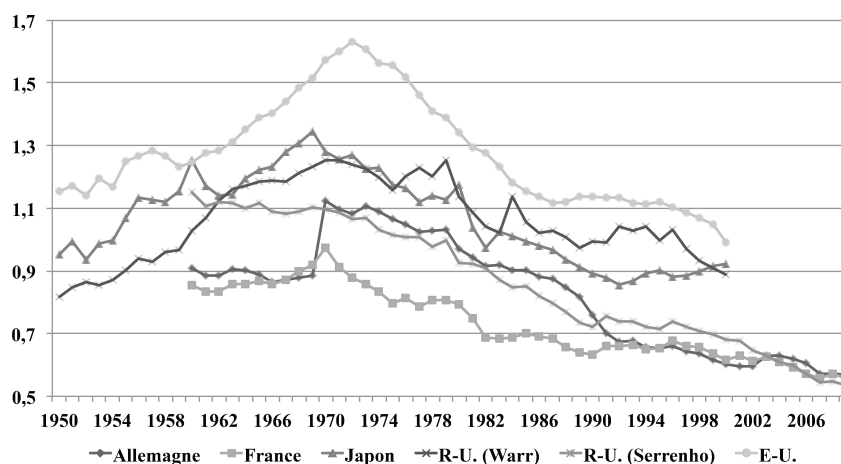


FIGURE 3.1 – Intensité du PIB en énergie. Ratio *travail utile* (en térajoules) sur PIB (en millions de dollars 2014) de 1950 à 2000 (R-U (Warr), É-U., Japon) et de 1960 à 2009 (Allemagne, France, R-U (Serrenho)). Sources : WARR, AYRES *et al.*, 2010, SERRENHO *et al.*, 2014, *Total Economy Database*

ALIER et SCHLÜPMANN, 1987), ces auteurs considèrent que la dimension physique de l'interaction entre l'humanité et son environnement est soumise à une contrainte thermodynamique qui s'articule socialement. Les activités productives impliquent une extraction d'énergie et de matière et la dissémination de résidus des activités économiques dans l'environnement; ces interactions physiques doivent être mises en rapport avec le caractère fini du stock d'un certain nombre de ressources et la capacité limitée des écosystèmes à absorber l'impact des activités humaines. Pour autant, les rapports entre les sociétés humaines et l'environnement ne peuvent être réduits à leurs seules dimensions biophysiques. L'objet de cette section est de poser un cadre conceptuel nous permettant de penser comment le rapport social à la nature se déploie au niveau de l'utilisation de l'énergie, c'est-à-dire la manière dont cet usage s'inscrit dans des configurations historiques idiosyncrasiques et contribue aux différents régimes d'accumulation.

3.2.1 L'interaction entre l'humanité et l'environnement en tant que rapport social

Les travaux d'inspiration régulationniste traitant des questions environnementales mettent le plus souvent l'accent sur les réglementations, normes et pratiques économiques qui interfèrent directement avec l'environnement. C'est par exemple le cas de l'article de ROUSSEAU et ZUINDEAU (2007), qui examinent de manière critique les rapports entre développement durable et capitalisme et, plus encore, ceux de ÉLIE *et al.* (2012) qui proposent une analyse empirique de la diversité des dispositifs institutionnels de l'environnement (DIE). Les DIE sont définis comme « [...] l'ensemble des institutions dédiées à la régulation des problèmes environnementaux. Ce sont les quotas, normes, taxes, subventions, instruments de marché ayant comme objectif la régulation des conflits liés à l'accès (ce qui inclut la préservation) aux biens et services écosystémiques. » (p. 7). Les auteurs analysent les DIE pour des pays de l'OCDE et parviennent en partie à faire ressortir des correspondances avec le modèle des cinq capitalismes de AMABLE (2005).

Robert BOYER (2015) s'appuie sur ces recherches pour rejeter l'idée de sixième forme structurelle avancée par Becker et Raza. Les DIE « seraient la projection des formes institutionnelles sur l'espace des relations économie/environnement » (p. 162). La manière dont la relation de travail serait codifiée, la forme de la concurrence, l'État et le style de la politique économique ainsi que le régime monétaire et financier et l'insertion internationale sont vus comme des éléments qui déterminent le développement de DIE. Cette approche est à même de rendre compte des affinités institutionnelles entre les modalités formelles d'inscription des différents rapports sociaux ; elle risque cependant de nier l'autonomie relative du rapport social à l'environnement. Les DIE pointent la codification en normes et politiques du rapport social à l'environnement. Ils n'en incarnent cependant pas la totalité, non seulement parce qu'ils n'en captent que la dimension nationale et codifiée mais, plus encore, car ils risquent de privilégier une lecture formelle de la relation sociale à l'environnement. Si, comme nous l'explicitons plus loin, un certain nombre de travaux écologistes peuvent pécher par une naturalisation de celui-ci, le risque ici est inverse. Réduire le nœud humanité - environnement à une simple projection des autres formes institutionnelles conduit à minorer les contradictions qui s'y nouent et leurs effets possibles sur la trajectoire d'ensemble d'une formation sociale.

Trois points sont décisifs pour engager une réflexion économique à propos du rapport social à l'environnement en tant que forme structurelle. Le premier consiste à souligner que si le monde non-humain supporte pleinement la matérialité du monde humain, il est en même temps en partie façonné par les activités humaines. Les ressources dites naturelles ont non seulement une dimension physique mais également une dimension sociale : elles ne deviennent des ressources que par la mise en œuvre d'activités humaines qui les requièrent. L'interaction des êtres humains avec l'environnement passe nécessairement par les rapports sociaux qui organisent les activités humaines.

Néanmoins, contrairement à ce que suggère l'approche en termes de DIE, la relation économie-environnement n'est pas une simple projection des autres rapports sociaux sur l'environnement, c'est aussi une contrainte qui nourrit des conflits sociaux dotés de leur logique propre (DOUAI et MONTALBAN, 2012). Comme le dit le titre d'un ouvrage récent du sociologue Razmig Keucheyan, *La nature est un champ de bataille* (2017) : discriminations raciales, rivalités militaires, appropriation financière sont quelques-unes des lignes de fronts autour desquels des groupes humains s'opposent aujourd'hui dans leur relation à l'environnement, soit pour en capturer les richesses, soit pour échapper aux effets de la dégradation des écosystèmes. Les conflits récurrents à différentes échelles pour l'accès aux ressources environnementales en sont une expression plus large, qui s'exprime notamment, depuis la fin du XVIII^e siècle, dans l'échange écologique inégal entre les métropoles du capitalisme mondial et les périphéries (FRESCOZ et BONNEUIL, 2016 ; HORNBORG, 2012 ; MORAN *et al.*, 2013). Le rapport à l'environnement est donc un rapport social qui doit être historicisé et spatialisé mais également politisé dans ses représentations comme dans sa matérialité.

Le rapport à l'environnement est enfin un rapport contradictoire dans la mesure où il peut favoriser la dislocation des formations sociales, même si l'analyse en termes d'écocide est critiquable comme nous l'avons montré au chapitre 1. Dans le cadre du mode de production capitaliste, O'CONNOR (1988) désigne par le terme de seconde contradiction l'interaction problématique entre l'environnement et la

dynamique capitaliste. Ce qui est ici spécifique ce n'est pas l'existence de barrières environnementales qui bornent les possibilités matérielles d'existence de toutes les sociétés humaines, mais la forme que prend cette contradiction au sein du capitalisme, à savoir une crise économique lorsque la dégradation des conditions environnementales de la production se traduit par des hausses de coûts et une diminution des taux de profit. On retrouve chez cet auteur l'idée polanyienne de marchandise fictive (POLANYI, 2009) pour souligner que la nature se trouve incorporée dans le processus de valorisation du capital, comme n'importe quelle autre marchandise, alors même que les mécanismes de sa reproduction résultent de processus irréductibles au travail humain socialisé sous le contrôle du capital.

En résumé, les formes et l'intensité physique de l'utilisation de la matière et de l'énergie au cours des activités humaines varient dans l'espace et dans le temps en raison de la régulation socio-politique auxquelles elles sont soumises. Dans le contexte du mode de production capitaliste, cela signifie que les divers régimes d'accumulation du capital s'appuient sur des modalités spécifiques du rapport social à l'environnement. Cette socialité du nœud humanité-environnement ne se réduit pas à la simple projection de dispositifs institutionnels depuis les autres formes structurelles. Le rapport social à l'environnement dispose de son autonomie relative et peut être considéré comme une sixième forme structurelle qui régule « l'accès à l'environnement physique et les modalités de son utilisation pour les activités de production et de reproduction. Elle régule donc également la distribution spatiale et temporelle des coûts et bénéfices écologiques de ces activités (re-)productives » (BECKER et RAZA, 2000, p. 11). Le rapport social à l'environnement est support et produit de la conflictualité entre classes et fractions de classe, entre entités politiques et entre firmes. Il se déploie et se régule dans des formes qui s'articulent de manière vertueuse ou perverse aux autres rapports sociaux ; elles peuvent contribuer à contenir les contradictions qui traversent le capitalisme ou, au contraire, les accentuer au point de contribuer à l'entrée en crise du mode de régulation voire, comme l'envisage O'Connor, du mode de développement dans son ensemble.

3.2.2 La dimension politico-économique de l'usage de l'énergie

Il est indiscutable que l'adoption du charbon et celle du pétrole (et de l'électricité) comme énergies motrices premières de l'économie s'inscrivent dans des dynamiques technologiques. L'apparition d'une technologie à usage général débouche sur une grappe d'innovations, tant du côté de l'offre que de la demande, qui va progressivement, au cours de plusieurs décennies, modifier en profondeur le système énergétique. Dans le cas du charbon, le raffinement de la machine à vapeur par Watts puis l'amélioration des chaudières permettant des engins à haute pression ouvrirent la voie à toute une série d'innovations dans la métallurgie, les chemins de fer et la navigation. De même, l'invention du moteur à explosion marqua une amélioration décisive de la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique qui rendit possible la diffusion de l'usage du pétrole et du gaz dans un grand nombre de processus productifs et de consommations (CRAFTS, 2004; GRUBLER, 2012; WILSON et GRUBLER, 2011). Pour autant, comme nous avons commencé à le montrer au chapitre 1, les changements intervenus dans les sources et les usages de l'énergie ne se résument pas à une évolution autonome, purement fonctionnelle, de la technologie. Ils s'enracinent dans et nourrissent les rapports sociaux qui leur sont contemporains (BARCA, 2011). Les travaux récents de nombreux historiens de l'environnement ont ainsi mis en regard les

usages des ressources et les effets socio-politiques qui leur sont associés pour construire une histoire environnementale ancrée dans les configurations indissociablement économiques, technologiques et sociales (FREZZOZ, GRABER *et al.*, 2014).

L'adoption du charbon au sein de l'industrie du coton britannique au cours de la première moitié du XIX^e siècle, par exemple, ne procède aucunement d'une logique d'efficacité énergétique, ni même d'une réduction générale des coûts; elle résulte de stratégies capitalistes contraintes par les rapports de concurrence et le rapport salarial (MALM, 2016). L'adoption du pétrole n'obéit pas davantage à une simple évolution techno-fonctionnaliste, mais s'inscrit dans une histoire irréductiblement politique et sociale. Par exemple, à partir de 1911, la Navy britannique va renouveler sa flotte en passant de navires propulsés au charbon à des navires propulsés au mazout. Une des préoccupations de l'Amirauté, alors dirigée par Winston Churchill, était de se protéger des revendications politiques des travailleurs du charbon dans le sillage des grandes contestations ouvrières dont le même Churchill avait organisé la répression l'année précédente, lorsqu'il était ministre de l'Intérieur (DEBEIR *et al.*, 2013; MITCHELL, 2013). Ce motif se répète. L'un des objectifs du développement du pétrole en Europe après-guerre fut de dévitaliser « les forces ouvrières communisantes liées au charbon » (FREZZOZ et BONNEUIL, 2016) et d'affaiblir les grands syndicats qui leur étaient associés (DEBEIR *et al.*, 2013).

Le travail de MITCHELL (2013) s'inscrit pleinement dans une telle perspective d'histoire sociale, économique et politique de l'environnement et la systématiser. Son apport essentiel consiste à montrer comment l'usage de l'énergie contribue à façonner les régimes politiques et économiques, du fait des caractéristiques propres des ressources et des technostructures qui permettent leur exploitation. Sur le plan statistique, davantage que la croissance économique, l'alphabétisation ou l'urbanisation, ce sont les variables grèves, manifestations et émeutes qui semblent expliquer les extensions de droit de vote (PRZEWORSKI, 2009); autrement dit, les avancées démocratiques n'ont été accordées par les élites que lorsqu'elles y furent contraintes. Pour Mitchell, l'exploitation du charbon est un facteur qui favorisa ces luttes populaires à l'origine des avancées démocratiques pour trois raisons : premièrement, l'exploitation du charbon impliquait une forte concentration de travailleurs, favorisant ainsi l'émergence de mouvements sociaux de masse. Deuxièmement, l'autonomie du travail d'extraction du charbon au fond de la mine plaçait l'expertise de la production d'énergie entre leurs mains plutôt qu'entre celles de l'encadrement. Troisièmement, le charbon était dépendant du chemin de fer pour son acheminement vers les industries, ce qui permettait aux travailleurs du rail de bloquer facilement sa production et sa distribution. La combinaison de ces trois éléments favorisa le développement d'une conscience populaire et d'une capacité de lutter qui permirent de faire avancer les droits sociaux et politiques. Comme l'expliquent DEBEIR *et al.* (2013) :

« Les grèves des bassins houillers [...] frappent par leur ampleur, comme le montre la formidable grève des mineurs anglais de 1890 (260 000 grévistes), celle des mineurs français après la catastrophe de Courrières (10 mars 1906), qui paralyse Paris, celles des mineurs de Virginie et d'Allemagne en 1920, la grève générale des mineurs anglais en 1926, celles des mineurs français en 1934-1936, la grève générale des bassins du Nord-Pas-de-Calais et de Belgique au printemps 1941, en pleine occupation allemande, ou encore les « grèves rouges » de novembre-décembre 1947 et d'octobre-novembre 1948, jusqu'aux deux grèves générales de 1963 en France et de 1984-1985 en Grande-Bretagne. Partout, États

et patronats durent composer. Même dans ces échecs [...] le combat social des ouvriers de l'énergie fut créatif, graduellement porteur de réforme sociale et même économique [...]. Il décida souvent de la mise en place à l'échelle du monde de la protection sociale et des diverses formes du welfare state [...].» (p. 225-226)

Mitchell parle de démocraties du carbone pour les régimes démocratiques assis sur l'énergie carbonée et en partie issus des luttes des travailleurs du charbon qui apparurent entre la fin du XIX^e siècle et la Seconde Guerre mondiale. De ce point de vue, la généralisation du pétrole en lieu et place du charbon comme source principale d'énergie est lourde de conséquences sociales et politiques. L'exploitation et la distribution de pétrole n'ont en effet pas les mêmes caractéristiques que celles du charbon. La production de pétrole implique peu de main-d'œuvre tandis que sa distribution se fait quasiment sans intervention humaine dans les supertankers et les oléoducs qui le transportent sur des milliers de kilomètres. Le pouvoir politique des travailleurs de l'énergie persiste dans les sites stratégiques, mais se trouve amoindri avec la diminution de leur nombre. Les caractéristiques du pétrole favorisent ainsi l'émergence de modes de gouvernement technocratiques éloignant la prise de décision du débat démocratique. En même temps, ce changement dans la forme d'énergie dominante est aussi l'un des piliers du compromis social fordiste des Trente Glorieuses à travers la mise à disposition, en abondance, d'une énergie bon marché. Le pétrole accéléra le développement de vastes industries mécanisées initiées à l'âge du charbon. Cela favorisa la diffusion du rapport salarial et la cristallisation institutionnelle d'acquis sociaux en raison du pouvoir structurel dont disposent les travailleurs dans ces dispositifs productifs et de forts gains de productivité du travail (SILVER, 2003; TRONTI, 1977). L'industrie archétypique à cet égard est l'industrie automobile, véritable pilier du compromis social fordiste.

En somme, la diffusion de l'énergie pétrolière eut un effet ambigu sur le régime d'accumulation fordiste : elle le permit dans un premier temps par la disponibilité en abondance d'énergie à faible coût qui favorisa l'émergence de grandes concentrations ouvrières mécanisées. Cependant, comme le montre Mitchell, les dispositifs socio-techniques associés à l'usage du pétrole fragilisent la régulation des rapports sociaux qui sous-tend ce régime d'accumulation. Selon cette lecture, le fordisme serait donc en partie le produit d'une régulation institutionnelle héritée de rapports de force issus de l'exploitation du charbon et d'une mécanisation permise par l'élargissement de l'accès au pétrole à bas coût durant l'après-guerre. La vulnérabilité énergétique de ce régime serait alors double : d'une part, en ce qui concerne ses soubassements sociaux dans le secteur même de la production et du transport d'énergie et, d'autre part, en ce qui concerne les conditions techniques et géopolitiques d'accès au pétrole à bas prix. Ces deux piliers du fordisme basculent dans les années 1970. D'importantes reconfigurations interviennent dans la production de pétrole au début des années 1970. Sous la pression des pays producteurs du Moyen-Orient, qui revendiquaient une hausse substantielle du prix du pétrole, et désireuses d'éviter une contagion après la nationalisation de la production pétrolière en Irak, les compagnies pétrolières changèrent le mode de calcul des réserves de pétrole en 1971. Jusque-là considérées comme infinies, les réserves devinrent considérées comme un stock de ressources fini, ce qui légitima la hausse des prix du pétrole. L'ère de l'abondance du pétrole bon marché toucha à sa fin et l'un des piliers du régime d'accumulation fordiste s'écroula. En parallèle, la régulation socio-politique du régime d'accumulation fut également fragilisée.

Comme l'explique Mitchell :

« Les succès obtenus dans l'augmentation des prix du pétrole portèrent un rude coup à la gestion keynésienne de l'économie, ouvrant la voie au développement de dispositifs fondés sur le marché, présentés comme une alternative à un « excès » de démocratie et aux « échecs » du gouvernement démocratique. » (MITCHELL, 2013, p. 235).

C'est dans ce contexte qu'interviennent l'abandon du système monétaire international de Bretton Woods et la dérégulation progressive des taux de changes et des flux de capitaux. C'est l'une des origines de la mondialisation financière et un moment clé dans le tournant opéré vers des politiques de désinflation brutale qui entraînèrent un rapide accroissement du chômage dans l'ensemble du monde développé. Si les travaux régulationnistes montrent que l'entrée en crise du régime fordiste est manifeste dès la seconde moitié des années 1960 à travers le ralentissement des gains de la productivité du travail (LOISEAU *et al.*, 1977 ; VIDAL, 2003), le travail de Mitchell souligne que les transformations de la relation sociale à l'énergie ajoutèrent à la déstabilisation de ce régime, et ce de manière particulièrement nette dans les années 1970. A minima, la rupture intervenue dans la relation sociale à l'énergie fut un facteur aggravant de la crise du fordisme : le récit régulationniste traditionnel et le récit de Mitchell sont complémentaires.

Le rapport social à l'environnement dans sa dimension énergétique participe pleinement des rapports de classe dans la mesure où la répartition des gains associés à l'énergie dépend du pouvoir de négociation des travailleurs qui exploitent et distribuent cette énergie. Les conditions de production et de distribution du charbon favorisèrent la constitution d'un puissant mouvement ouvrier. L'abondance de pétrole bon marché favorisa, elle, une mécanisation accélérée et rendit possible la consolidation des institutions démocratiques et de l'état social via la montée en puissance d'un vaste prolétariat industriel associé à l'essor des industries mécanisées. Cette dynamique arrivée à son terme, le pouvoir structurel relativement faible du salariat dans le système énergétique pétrolier par rapport au système charbonnier participa d'une érosion du compromis social fordiste qui fit place à un régime d'accumulation néolibéral doté d'une nouvelle forme de la relation sociale à l'énergie.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons explorer de manière stylisée cette hypothèse en posant une double question : peut-on montrer qu'une utilisation extensive (intensive) de l'énergie peut favoriser (entraver) des gains de productivité et, donc, sous-tendre des compromis sociaux productivistes ? La (dé)territorialisation de l'utilisation de l'énergie est-elle un facteur qui (dé)favorise le pouvoir structurel du travail par rapport au capital ? Avant cela, il nous faut préciser les enjeux méthodologiques et théoriques associés aux mesures de l'utilisation de l'énergie et à leur interprétation.

3.3 Mesurer la relation énergie-économie

Pour analyser la relation sociale à l'énergie, il est indispensable de disposer de données quantitatives. De ce point de vue, les apports récents des économistes écologiques concernant la mesure de l'utilisation de l'énergie des pays à haut revenu sont décisifs et vont servir de base à notre analyse dans la suite de cet article. Toutefois, il convient pour cela de préciser la manière dont se conçoit le rapport entre énergie et croissance et de prendre en compte les effets de territorialisation liés à l'usage de l'énergie.

3.3.1 L'énergie est-elle la cause de la croissance ?

Les économistes écologiques de l'énergie placent celle-ci au centre de leur interprétation de l'accumulation capitaliste. Estimant son importance relative comme facteur de production à côté du travail et du capital, leur thèse centrale est que l'énergie est le principal facteur explicatif de la croissance au xx^e siècle (AYRES et VOUDOURIS, 2014; AYRES et WARR, 2005; WARR et AYRES, 2012)⁴. Le résidu de Solow habituellement attribué au progrès technique (SOLOW, 1957) s'expliquerait presque entièrement par l'amélioration de l'efficacité thermodynamique⁵ de 1900 à 2000 pour les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni (WARR, AYRES *et al.*, 2010).

Pour obtenir ces résultats, un certain nombre d'auteurs mobilisent une mesure de l'énergie autre que la mesure habituelle en termes d'énergie primaire : l'exergie (voir les définitions dans le tableau 3.1). L'énergie primaire serait trop agrégée et empêcherait une comparaison entre pays car elle ne refléterait pas les différences de qualité de l'énergie utilisée d'un pays à l'autre (SERRENHO *et al.*, 2014). Ainsi, quasiment aucune étude sur les liens de causalité énergie-PIB ne contrôle pour la qualité de l'énergie alors que celle-ci augmente avec le revenu et au cours du temps (BRUNS *et al.*, 2014; CSEREKLYEI *et al.*, 2016). Pour dépasser ces limites méthodologiques, des travaux récents d'économistes écologiques se focalisent sur le *travail utile* (*useful work*), c'est-à-dire l'exergie effectivement utilisée après toutes les étapes de transformation impliquant une altération de la qualité de l'énergie (voir par exemple : AYRES et WARR (2005) et SERRENHO *et al.* (2014)). L'énergie proprement dite ne se perd pas dans le processus de transformation-production (première loi de la thermodynamique), ce qui est perdu au fur et à mesure est la qualité de l'énergie (l'exergie), ou partie utile de l'énergie pouvant fournir un travail physique : plus une énergie est transformée plus sa qualité s'altère et l'énergie utile disponible diminue (seconde loi de la thermodynamique). D'après ces auteurs, exergie et *travail utile* permettent donc une analyse plus fine de la trajectoire énergétique des économies : elles autorisent de saisir précisément la dépendance étroite de l'activité économique à un apport externe d'énergie, ce que ces économistes écologiques appellent les services énergétiques. Pour notre étude, nous retenons cette mesure plus fine qui présente aussi l'intérêt de remonter à 1950 pour trois de nos cinq pays (États-Unis, Japon, Royaume-Uni), ce qui nous permet de couvrir l'ensemble de la période fordiste.

Par leurs travaux économétriques, les économistes écologiques cherchent à démontrer que l'énergie est à l'origine de la croissance. Utilisant les mesures en termes d'exergie et de *travail utile*, WARR et AYRES (2010) trouvent une causalité unidirectionnelle allant de l'énergie vers la croissance du PIB pour les États-Unis de 1946 à 2000. GIRAUD et KAHRAMAN (2014), revenant à la mesure traditionnelle en termes

4. L'utilisation de fonctions de production agrégées soulève bien sûr des questions, même dans les formes sophistiquées utilisées permettant de dissocier productivités marginales et part des facteurs dans le produit total. Les facteurs ne sont pas mesurés par une même unité. Dès lors, rien ne garantit que la relation testée soit bien une relation technique reflétant la combinaison productive des économies considérées et non une égalité comptable déguisée. Il faut en effet que toutes les variables soient mesurées en unité physique pour que la fonction de production ait un sens. Et encore, cela seulement au niveau microéconomique car il paraît illusoire de résumer l'ensemble du tissu productif d'une économie à une simple fonction (FELIPE et McCOMBIE, 2015). De plus la complémentarité et l'interdépendance des facteurs — soulignée par les auteurs (AYRES et VOUDOURIS, 2014; AYRES et WARR, 2005) — rend problématique de quantifier leur apport exact par leur productivité marginale : quelle interprétation économique attribuer à celle-ci dans la mesure où un facteur ne peut augmenter le produit total qu'en combinaison productive avec les autres ? Enfin, cela pose également la question d'un double comptage éventuel, car l'énergie n'accomplit un travail physique que par la médiation du travail et du capital.

5. L'efficacité thermodynamique est le ratio du *travail utile* sur l'exergie. Tous deux sont définis dans le tableau 3.1.

Variable	Unité	Définition	Comprend
Énergie primaire	Tonnes équivalent pétrole ou joules	Énergie avant transformation en combustible et énergie consommables, directement extraite des ressources naturelles (IEA <i>et al.</i> , 2005).	Non renouvelables : nucléaire, charbons, pétrole brut, liquides de gaz naturel, schistes bitumineux Renouvelables : chaleur, électricité non thermique, biocarburant (ibid.).
Énergie secondaire (ou finale)	Tonnes équivalent pétrole ou joules	Énergie obtenue après transformation de l'énergie primaire ou d'une autre énergie secondaire (ibid.). Mesure l'énergie fournie aux utilisateurs finaux (WARR, AYRES <i>et al.</i> , 2010).	Non renouvelables : produits pétroliers, combustibles solides et gaz produit industriellement, chaleur et électricité Renouvelables : tout combustible dérivé d'une énergie primaire renouvelable, chaleur et électricité (IEA <i>et al.</i> , 2005).
Exergie	Joules	Mesure la qualité d'une énergie, soit l'énergie capable de délivrer un travail mécanique, chimique ou thermal. Terme thermodynamique correct pour désigner l'énergie disponible ou utile. Correspond au travail potentiel que peut fournir une énergie (AYRES et WARR, 2005).	L'exergie est une mesure qui s'applique aux énergies et combustibles traditionnels, aux produits agricoles, à l'énergie animale et humaine, aux minéraux et à tout type de matériau industriel (ibid.).
Travail utile	Joules	Correspond au travail effectif fourni par une énergie : mesure les services énergétiques comme la chaleur, la lumière ou la puissance motrice disponible pour l'utilisateur final après la conversion des intrants en exergie dans tous les processus techniques. Part de l'énergie fournissant effectivement un travail mécanique, chimique ou thermal, soit la partie productive de l'exergie (WARR, AYRES <i>et al.</i> , 2010).	

TABLEAU 3.1 – Définition des différentes variables énergétiques.

d'énergie primaire, trouvent également une relation univoque allant de l'énergie vers la croissance du PIB pour 33 pays entre 1970 et 2011. Ces résultats sont cependant fragiles tant en regard de la littérature que de leurs pré-supposés théoriques.

Les recensions et méta-analyses de l'abondante littérature — plus de 500 articles (BRUNS *et al.*, 2014) —

qui traite des liens énergie-croissance indiquent qu'aucun consensus ne se dégage quant au sens de la causalité entre énergie et PIB (CHEN *et al.*, 2012; KALIMERIS *et al.*, 2014; MENEGAKI, 2014; OMRI, 2014; PAYNE, 2010). Une grande partie est consacrée à l'application de tests de causalité de type Granger-Sims ou Toda-Yamamoto⁶ pour discriminer entre quatre types de relation : la croissance de la consommation d'énergie entraîne la croissance du PIB (hypothèse dite de croissance); la croissance du PIB entraîne celle de l'énergie (hypothèse dite de conservation); aucune causalité (neutralité); causalité bidirectionnelle (effets de retour) (PAYNE, 2010). Les résultats ne sont pas robustes aux différentes mesures et types d'énergie, à l'inclusion de différentes variables de contrôle, aux différences de technique économétrique, aux biais de publication et de mauvaise spécification des modèles et aux différentes périodes de temps utilisées.

Plus fondamentalement, envisager une causalité de l'énergie à la croissance pose un problème théorique fondamental : l'offre d'énergie n'est pas totalement exogène, elle est déterminée par la demande (BRUNS *et al.*, 2014). L'extraordinaire croissance de l'usage de l'énergie dans l'histoire du capitalisme s'explique en particulier par une croissance parallèle d'un appareil technico-scientifique permettant un approfondissement continu de la production et de l'utilisation de l'énergie (CHESTER, 2014) ainsi que des changements dans le type d'énergie utilisée (KANDER *et al.*, 2013). DEBEIR *et al.* (2013) soulignent également que la dynamique des systèmes énergétiques obéit à la rationalité de la formation socioéconomique qui les englobe. Autrement dit, la relation sociale à l'énergie repose sur un métabolisme social recouvrant la manière dont les sociétés organisent leurs échanges d'énergie et de matériaux avec l'environnement (MARTINEZ-ALIER, KALLIS *et al.*, 2010; MURADIAN *et al.*, 2012).

L'analyse en termes de métabolisme social, élaborée par d'autres économistes écologiques (FISCHER-KOWALSKI et HABERL, 1993; GOWDY, GIAMPIETRO *et al.*, 2009; WEISZ *et al.*, 2001), implique l'intégration des flux de matières et d'énergie aux dynamiques socioéconomiques et réfute le caractère exogène des premiers. Cette notion de métabolisme social est très proche de celle de relation sociale à l'environnement exposée plus haut, même si elle part des ressources naturelles quand celle de relation sociale à l'environnement part des rapports sociaux. L'important est que, dans les deux cas, l'usage des ressources est abordé comme un processus socialement déterminé, ce qui constitue une solide base de rapprochement entre Économie écologique et Régulation. Cette idée essentielle permet de revenir sur l'interprétation des résultats économétriques.

Dans la mesure où la production nécessite de l'énergie, il est logique que la croissance de l'offre d'énergie précède la croissance du PIB, ce qui peut expliquer certains résultats économétriques. Cependant, cela n'indique pas que l'énergie cause la croissance, mais plutôt qu'elle la permet. Le circuit de production ne peut être lancé sans fourniture préalable d'énergie, mais c'est bien la croissance de la production qui, contenue dans les anticipations des agents, cause la hausse de l'offre d'énergie. La quantité d'énergie intégrée au système, c'est-à-dire l'offre, est endogène. Dans le cas contraire, nous serions en présence d'une *énergie hélicoptère* indépendante de la dynamique socioéconomique, dont l'offre est dès lors donnée

6. En économétrie, la causalité au sens de Granger signifie que l'inclusion des valeurs passées d'une variable explicative (i.e. Énergie_{t-i}) améliore la prédiction des valeurs présentes ou futures de la variable expliquée (i.e. le PIB) en comparaison d'une estimation de celle-ci à partir de ses propres valeurs passées (i.e. PIB_{t-i}). Le test de Toda-Yamamoto est une causalité de Granger augmentée robuste à de possibles ordres d'intégration différents entre les variables (TODA et YAMAMOTO, 1995).

mais demeure à expliquer. Ce raisonnement sème le trouble sur l'interprétation des tests de causalité : si la consommation d'énergie dépend des anticipations des producteurs, la causalité prend forme dans un temps psychologique qui ne coïncide pas nécessairement avec le temps chronologique. Dès lors, le sens de lecture de la causalité devrait être inversé (ZELLNER, 1979). Tout cela n'implique pas l'absence de contrainte d'offre dans la fourniture d'énergie : la disponibilité de l'énergie peut être en partie exogène à la demande des agents. Néanmoins, comme nous l'avons montré précédemment, celle-ci ne s'exprime qu'à travers la médiation d'une relation sociale que supporte un ensemble de dispositifs sociopolitiques et économiques qui organisent la disponibilité, la rareté mais aussi la demande des ressources énergétiques (KOCH, 2011 ; MITCHELL, 2013). En résumé, la croissance du PIB cause la croissance de la consommation d'énergie et la disponibilité de l'énergie permet la croissance du PIB. Il n'est pas certain que les tests de causalité permettent de saisir cette nuance⁷.

3.3.2 Approches en production et en consommation du CO2

Une difficulté que rencontrent les travaux s'appuyant sur les données en termes de *travail utile* et d'exergie concerne leur périmètre. En effet, les données disponibles se cantonnent à l'énergie utilisée sur le territoire national des États considérés et ne mesurent donc pas l'énergie effectivement consommée sur ce territoire, c'est-à-dire qui inclue le contenu en énergie des produits importés mais ne comprend pas l'énergie dépensée pour les produits exportés. En l'absence de mesure de l'énergie incorporée au commerce international, il nous faut recourir à un autre indicateur pour surmonter cette limite essentielle : les émissions de CO2 en approche consommation⁸ qui constituent une approximation acceptable car les émissions sont très étroitement liées à l'évolution de la consommation d'énergie (même si certaines sources d'énergie ne sont pas émettrices de CO2 : le constat opéré à partir des émissions de CO2 comme approximation est donc probablement en deçà de la réalité). L'approche consommation

CO2 en approche production	Émissions domestiques de CO2
CO2 en approche consommation	Émissions domestiques de CO2 + (quantité de CO2 incorporée aux importations – quantité de CO2 incorporée aux exportations)

TABLEAU 3.2 – Mesure des variables en approches production et consommation.

consiste à allouer à un pays la totalité des émissions domestiques et déterritorialisées de CO2 induites par la consommation nationale (soustraction faite des émissions domestiques destinées à la consommation étrangère), à l'inverse de l'approche production qui ne prend en compte que les émissions domestiques (DAVIS et CALDEIRA, 2010 ; PETERS, 2008). Il s'agit donc de mesurer la consommation nette de CO2 d'un

7. Il y a bien sûr en arrière-plan les débats sur les différentes conceptions de la causalité en économie et en économétrie. Celle de Granger cherche la « vérité » dans les données et laisse peu ou pas de place au raisonnement théorique. Voir ZELLNER (1979) et HOOVER (2008) pour une discussion.

8. Plusieurs bases de données mesurent les émissions de CO2 en approche consommation (Exiobase, *World Input-Output Database*, etc). Nous utilisons les données de la base Eora, qui est la seule à notre connaissance à remonter jusqu'à 1970, les autres bases commençant en 1990 ou après. Concernant l'énergie primaire, les données sont disponibles mais ne sont pas encore fiables (communication personnelle avec Dan Moran, responsable de la base Eora).

pays donné, ce qui permet de rendre compte de l’empreinte CO2 effective d’un régime d’accumulation national. Bien que la robustesse et la précision de cette approche doivent être améliorées (SATO, 2014), elle permet déjà de montrer que le CO2 incorporé au commerce international est en croissance constante depuis les années 1990 (NAKANO *et al.*, 2009 ; PETERS, DAVIS *et al.*, 2012 ; PETERS, MINX *et al.*, 2011). Ces données font ressortir l’insertion des régimes d’accumulation nationaux dans le capitalisme globalisé en illustrant la complémentarité entre les régimes intensifs et extensifs en CO2 : les premiers reposant en partie sur les seconds pour leur consommation finale. On précise qu’«intensif» renvoie à un régime basé sur l’accroissement de la productivité de l’énergie tandis qu’« extensif » renvoie à un régime fondé sur l’accroissement de la quantité d’énergie incorporé au système.

En résumé, les travaux récents des économistes écologistes fournissent de nouvelles données historiques indispensables pour analyser les transformations du rapport social à l’environnement : à travers la notion d’exergie, ils ont élaboré un indicateur permettant de saisir finement l’assise énergétique de l’activité économique, tandis que les approches en consommation du CO2 rendent possible de dépasser les effets de myopie propres aux données stato-centrées. Il n’est en revanche pas possible d’établir une causalité simple entre utilisation d’énergie et croissance économique, ce que perçoivent les approches en termes de métabolisme social qui montrent comment ces deux phénomènes sont consubstantiels l’un à l’autre ; il y a là un pont vers les historiens de l’environnement et l’École de la régulation. La suite de ce chapitre va montrer comment ce dialogue entre Économie écologique, histoire environnementale et approche régulationniste peut être utile pour comprendre l’usage de l’énergie dans les principaux pays riches depuis la Seconde Guerre mondiale.

3.4 Faits stylisés

La figure 3.1 page 77 présentée en introduction illustre la rupture qui intervient dans les années 1970 dans les usages de l’énergie. L’évolution du ratio *travail utile* sur PIB observée pour les cinq pays à haut revenu de notre étude fait apparaître deux périodes distinctes, correspondant au régime fordiste et au régime néolibéral. Cette périodisation est conforme aux résultats de WIEDENHOFER *et al.* (2013) qui, dans leur article *Is there a 1970s syndrome? Analyzing structural breaks in the metabolism of industrial economies*, définissent les années 1970 comme un moment de transition socio-écologique, c’est-à-dire une transition entre deux types de régimes socio-métaboliques des interactions économie-nature (KRAUSMANN *et al.*, 2008). Des tests économétriques de rupture structurelle effectués à partir de quatre mesures du ratio énergie/PIB⁹ présentés en annexe confirment la pertinence statistique de ce découpage temporel qui sera également confirmée au chapitre 4.

Pour construire nos faits stylisés nous avons choisi de distinguer deux périodes de part et d’autre de la médiane de toutes les années statistiquement significatives indiquées par les tests de rupture

9. Les ratios *travail utile* / PIB, exergie / PIB et deux ratios d’énergie primaire sur PIB. Il est clair que le peu de recul chronologique pour plusieurs séries pose problème quant à la robustesse des tests. Néanmoins les quatre séries ont toutes renvoyé des résultats cohérents entre eux. Il est par ailleurs cohérent d’observer une rupture structurelle liée à l’énergie dans la décennie 1970-1980 si l’on admet que la rupture de régime d’accumulation est établie et constitue un acquis théorique et empirique du programme de recherche régulationniste, en particulier pour les pays considérés.

structurelle, soit 1974¹⁰. C'est autour de cette date que les changements de dynamique concernant l'intensité de l'usage de l'énergie et sa territorialisation signalent le changement de régime du rapport social à l'énergie correspondant respectivement aux deux régimes d'accumulation fordiste (1950-1974) et néolibéral (1974-2009) qu'il nous faut maintenant décrire.

3.4.1 D'une utilisation extensive d'énergie à un usage intensif

Le tableau 3.3 construit à partir des données de WARR, AYRES *et al.* (2010) et SERRENHO *et al.* (2014) indique les taux de croissance annuels moyens de la quantité d'exergie utilisée pour les deux périodes. Il montre que le capitalisme néolibéral est associé à un fort ralentissement de l'augmentation de l'exergie produite (de - 0,54% à 0,71% en moyenne annuelle selon les deux études et les périodes prises en compte) par rapport à la croissance rapide de la période fordiste (3,65 et 3,94%). Les données montrent également

	Fordisme		Néolibéralisme	
	1950-1960	1960-1974	1974-2000	2000-2009
Allemagne	—	5,11	-0,22	-0,5
France	—	5,02	0,61	0,06
Japon	6,01	6,64	2,18	—
Royaume-Uni (Warr et al.)	2,77	2,19	0,13	—
Royaume-Uni (Serrenho et al.)	—	1,16	0,36	-1,18
États-Unis	2,18	3,50	1,20	—
Moyenne	3,65	3,94	0,71	-0,54

TABLEAU 3.3 – Croissance annuelle moyenne de la quantité d'exergie entre 1950 et 2009. Sources : calculs des auteurs d'après WARR, AYRES *et al.* (2010) pour les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni entre 1950 et 2000 ; SERRENHO ET AL. (2014) pour la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni entre 1960 et 2009. Le découpage à l'intérieur de chaque régime d'accumulation s'explique par la disponibilité variable des données selon les pays.

que la productivité du *travail utile* (inverse de l'intensité du PIB en *travail utile* de la figure 3.1) augmente à partir de 1970 alors qu'elle diminuait jusque-là (tableau 3.4¹¹), ce qui, en regard des trajectoires de la quantité d'exergie, illustre le passage d'une ère extensive à une ère intensive dans l'utilisation de l'énergie. Le fordisme et le néolibéralisme connaissent donc deux régimes distincts de la relation sociale à l'environnement vue au travers du prisme énergétique :

- Une ère d'utilisation extensive des ressources naturelles caractérisée par la forte augmentation de la quantité d'exergie ainsi que par une diminution de la productivité du *travail utile*. Cette période correspond au fordisme.
- Une ère intensive où la quantité d'exergie stagne mais où la productivité du *travail utile* progresse nettement. Cette période correspond au régime d'accumulation globalisé et financiarisé du néolibéralisme.

10. 90% des dates significatives renvoyées par les tests de rupture structurelle sont situées entre 1970 et 1981.

11. Nous remercions André Cabrera Serrenho pour les données de son article et pour quelques éclaircissements méthodologiques. WARR, AYRES *et al.* (2010) et SERRENHO *et al.* (2014) n'utilisent pas les mêmes données pour quantifier le *travail utile*. La comparaison entre pays doit donc être faite avec prudence. L'observation des trajectoires individuelles est plus pertinente.

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

TABLEAU 3.4 – Croissance annuelle moyenne de la productivité du *travail utile* entre 1950 et 2009.

3.4.2 Une délocalisation accrue de l'utilisation de l'énergie

Comment s'explique le changement de régime observé dans la relation sociale à l'énergie entre le fordisme et le néolibéralisme? SERRENHO *et al.* (ibid.) trouvent que l'intensité en *travail utile* du PIB de l'UE15 est principalement déterminée par les industries requérant des hautes températures, comme les industries métallurgiques et les cimenteries, et par la consommation domestique. La délocalisation des industries lourdes et le processus de tertiarisation des économies à haut revenu ont diminué l'intensité du PIB en énergie et expliquent donc que la productivité du *travail utile* augmente. Le développement de l'usage de l'électricité a également amélioré l'efficacité énergétique (KANDER *et al.*, 2013).

Le tableau 3.5 page suivante illustre l'importance de l'effet de trompe-l'œil dans la hausse de la productivité de l'énergie. Alors qu'en 1970, la plupart des pays riches étaient exportateurs d'émissions de CO₂ mesurées en approche consommation, en 2010 ils en importent tous massivement, les émissions importées représentant jusqu'à environ 31% des émissions totales de la France et du Royaume Uni. Le tableau 3.6 page suivante¹² offre une comparaison entre plusieurs bases pour l'année 2009. L'ordre de grandeur de nos chiffres est globalement cohérent avec les autres sources disponibles, même si des disparités significatives existent du fait de méthodologies et données différentes. Par exemple, on constate une grande dispersion d'une base à l'autre pour le Japon et le Royaume-Uni comme en témoignent les écart-types et les intervalles : ainsi, en moyenne, la part des émissions importées dans les émissions de CO₂ induites par la demande finale japonaise se situe entre 8,11 et 21,22% et l'écart-type est de 7 points de pourcentage entre les bases. En revanche, les données sont plus cohérentes d'une base à l'autre pour l'Allemagne, la France et les États-Unis. Toutefois, ces disparités ne contredisent pas nos résultats ni notre analyse. L'augmentation de la productivité du *travail utile* reflète donc, en partie, des mutations dans la structure productive des économies à haut revenu ayant conduit à une diminution de leur intensité énergétique domestique (ibid.) et à une dépendance accrue à l'utilisation d'énergie à l'étranger. Cette constatation fait écho à certaines critiques adressées à la thèse de la courbe de Kuznets environnementale, qui serait en partie due, lorsqu'elle est observée, à la délocalisation des pollutions (DINDA, 2004; VAN ALSTINE et NEUMAYER, 2008).

La figure 3.2 page 91 permet de saisir ce phénomène de délocalisation de l'utilisation de l'énergie

12. Ce tableau a été substantiellement révisé par rapport à la version publiée de ce chapitre.

	1970	2010
Allemagne	-3,69	6,14
France	1,27	30,56
Japon	-30,97	16,17
Royaume-Uni	-0,12	31,39
Etats-Unis	-1,98	12,09
Moyenne	-7,10	19,27

TABLEAU 3.5 – Part des émissions de CO2 importées (net des émissions exportées) dans les émissions totales de CO2 induites par la demande finale (approche consommation) en 1970 et 2010, en pourcentage. Des valeurs négatives indiquent que le pays est exportateur net de CO2. Source : Eora version 199.82

	Part du CO2 importé dans le CO2 induit par la demande finale (2009, %)									
	Eora	Eora26	Exiobase3.3	WIOD	OCDE	Moy.	É.-type	Méd.	Interv.	
Allemagne	14,94	10,90	7,11	15,88	13,69	12,50	0,03	12,92	9,33	15,68
France	33,55	32,19	28,35	30,49	29,68	30,85	0,02	31,34	29,02	32,68
Japon	19,41	23,75	4,92	14,42	10,82	14,66	0,07	16,91	8,11	21,22
R-U.	29,22	32,31	18,59	16,44	21,71	23,65	0,06	23,90	17,53	29,78
E-U.	12,15	11,25	10,17	11,31	8,80	10,74	0,01	11,28	9,58	11,89
Moyenne	21,85	22,08	13,83	17,71	16,94					
Écart-type	0,08	0,10	0,09	0,07	0,08					
Médiane	19,41	23,75	10,17	15,88	13,69					
Intervalle	13,62	12,57	5,21	11,07	9,20					
	30,09	31,59	22,45	24,34	24,68					

TABLEAU 3.6 – Part du CO2 importé dans les émissions totales de CO2 induites par la demande finale en 2009 pour différentes bases input-output, en pourcentage. Nous avons pris 2009 car c'est l'année disponible la plus récente pour la *World Input-Output Database* (WIOD) et l'OCDE. En ligne, la moyenne, l'écart-type, la médiane et l'intervalle sont calculés par base, en colonne ils sont calculés par pays. L'intervalle est calculé comme la moyenne +/- l'écart-type. La base Eora26 est une version agrégée à 26 secteurs harmonisés par pays de la base Eora. Sources : calculs de l'auteur d'après des données tirées de *Environmental Footprint explorer* (STADLER *et al.*, 2015) et OCDEStat

en dynamique. Elle montre que la croissance des émissions de CO2 des principaux pays à haut revenu demeure forte dans la période néolibérale, bien que nettement plus faible qu'au cours de la période fordiste, lorsque les émissions totales induites par la consommation dans ces pays sont prises en compte : entre 1974 et 2011, les émissions des cinq principaux pays à haut revenu mesurées en approche consommation ont crû de 24,2%, à un taux annuel moyen de 0,59%, contre une augmentation de 99,62% en approche production pour la période fordiste (1950-1974), ce qui correspond à une croissance annuelle moyenne de 2,92%. L'examen des trajectoires individuelles indique que seule l'Allemagne a une trajectoire structurelle de décroissance des émissions, quelle que soit la mesure considérée. On peut y voir d'une part la marque de ses politiques pionnières en matière de transition énergétique (STRUNZ, 2014), d'autre part celle des politiques néolibérales de réduction de la demande interne qui ont orienté son économie vers l'exportation. Allemagne mise à part, la dynamique est en fait celle d'une progression continue interrompue par deux diminutions significatives dans un contexte de récession, d'abord dans la seconde moitié des années 1970, en réaction aux deux chocs pétroliers, puis avec la crise de 2007-2008, précédée elle aussi par une hausse importante du prix des hydrocarbures. Entre ces deux chocs, le

néolibéralisme est un régime extensif en énergie. On précise ici que le CO₂ en approche consommation est une approximation prudente de l'utilisation d'énergie à l'étranger, puisqu'une partie de celle-ci provient d'énergies n'émettant pas de CO₂ : la dépendance à l'énergie incorporée aux importations est donc sous-estimée par cette approximation qui se limite aux seules énergies émettrices de CO₂.

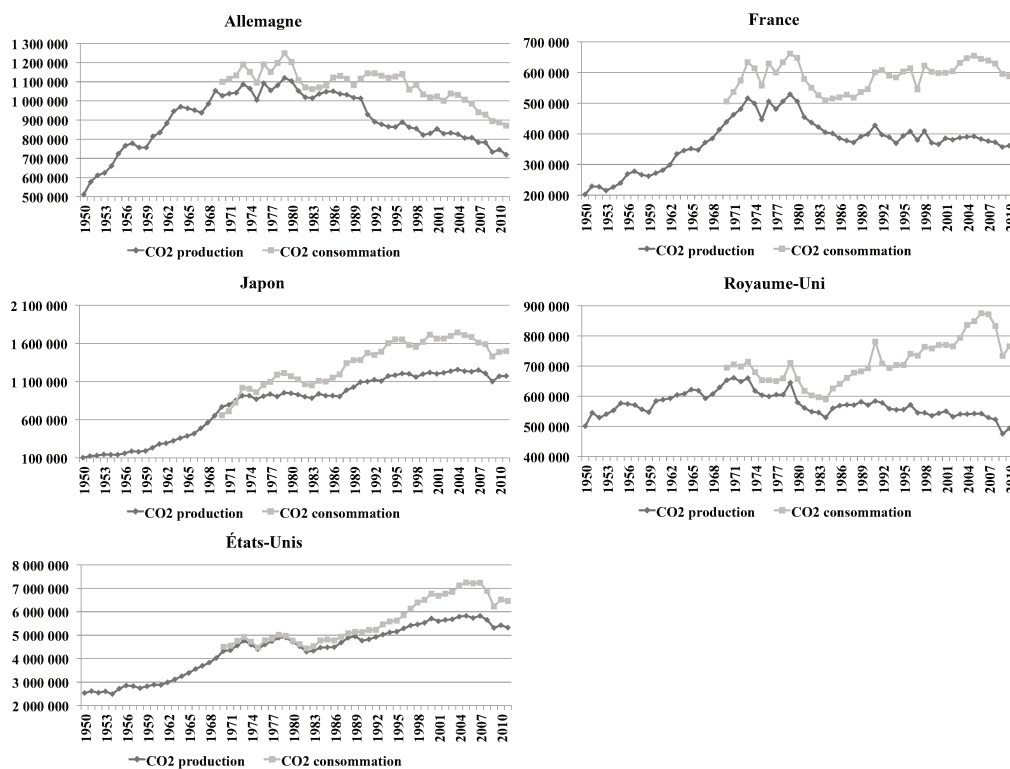


FIGURE 3.2 – Total des émissions de CO₂ pour les cinq pays mesurées en approches production et consommation (milliers de tonnes, 1950-2011). Sources : calculs des auteurs d'après CDIAC (émissions en approche production) et Eora Input-Output Database version 199.82 (émissions en approche consommation). Concernant les émissions en approche production, nous prenons ici les estimations du CDIAC afin de remonter jusqu'à 1950. Les émissions en approche production de la base Eora sont basées sur les estimations de la base Edgar qui commence en 1970 : elles sont légèrement supérieures à celles du CDIAC, mais les trajectoires sont identiques. Les émissions en approche production présentées sur ce graphique sont donc une estimation prudente.

La mise en évidence de la délocalisation de l'utilisation de l'énergie fait apparaître sous un jour nouveau le phénomène d'intensification de l'utilisation de l'énergie souligné dans le paragraphe précédent. Si la relation sociale à l'énergie dans le contexte du néolibéralisme prend une forme intensive dans l'économie domestique des principaux pays à haut revenu, cette évolution doit être nuancée au regard de cette dépendance accrue à l'énergie utilisée à l'étranger à des fins de consommation interne.

Nous l'avons dit, les mesures de l'exergie et du *travail utile* n'existent pas en approche consommation, nous sommes donc contraints pour examiner cette question de faire appel aux données sur les émissions de CO₂. La figure 3.3 page suivante indique que l'intensité carbone totale du PIB (l'inverse de la productivité du CO₂) pour les cinq principaux pays à haut revenu a décliné depuis l'après-guerre. Cette décroissance s'est faite cependant à un rythme inégal. En approche production, on note qu'au cours de

la période fordiste (1950-1974), l'intensité carbone du PIB a diminué à un rythme annuel moyen de -1,57% contre -2,26% sur la période néolibérale (1974-2011). Cette évolution corrobore l'observation faite dans le paragraphe précédent d'une utilisation plus intensive de l'énergie (ici approximée par la consommation de CO₂). Si l'on se réfère aux données en approche consommation, la tendance reste la même mais est moins marquée, la baisse s'établissant à seulement -1,8% par an. On observe donc toujours un usage de l'énergie plus intensif dans la période néolibérale que dans la période fordiste mais le contraste est sensiblement moins marqué entre les deux périodes. Autrement dit, l'intensification de l'usage de l'énergie dans les principaux pays à haut revenu résulte en partie du déploiement sur d'autres territoires d'un usage plus extensif de l'énergie.

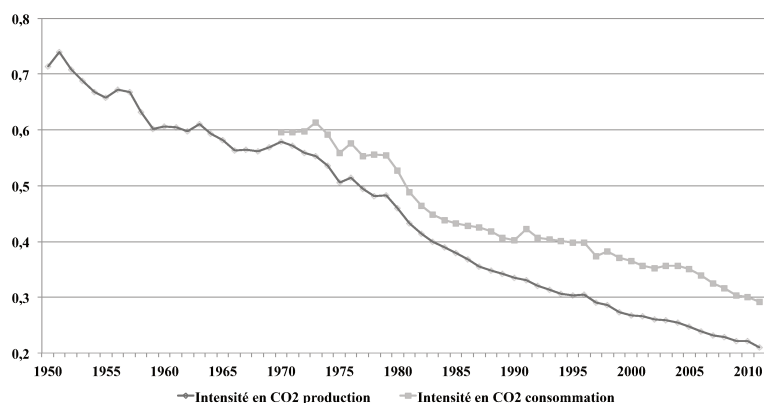


FIGURE 3.3 – Moyenne géométrique de l'intensité du PIB en CO₂ mesurée en approches consommation et production pour les cinq pays de 1950 à 2011 (milliers de tonnes de carbone par millions de dollars à prix 2014). La moyenne géométrique permet d'atténuer la sensibilité aux valeurs les plus élevées et donne donc une représentation prudente. Pour les séries concernées les résultats diffèrent cependant peu de la moyenne arithmétique. Sources : calculs des auteurs d'après CDIAC, Eora et *Total Economy Database*.

3.5 Travail, capital et énergie dans le régime fordiste et le régime néolibéral

Augmentation de la productivité de l'exergie et déterritorialisation sont les deux faits stylisés qui permettent de caractériser le basculement du fordisme au néolibéralisme en ce qui concerne l'usage de l'énergie. Ces dynamiques énergétiques doivent être articulées aux autres dimensions socioéconomiques de ces deux régimes d'accumulation. Cette section propose une analyse exploratoire de cette articulation concernant deux variables macroéconomiques clés que sont la productivité du travail et la part des profits dans la valeur ajoutée.

3.5.1 Le dynamisme de la productivité du travail dépend de la quantité d'énergie utilisée

Un des traits qui distingue fortement la période fordiste et la période néolibérale est le rythme de croissance de la productivité du travail (tableau 3.7). Celle-ci s'accroît en effet à un rythme soutenu pour l'ensemble des pays, soit à un taux, en moyenne, de 4,69% par an entre 1950 et 1974 contre 1,96% pour la période néolibérale. L'importance de l'énergie dans les gains de productivité est un aspect bien établi

	Fordisme 1950-1974	Néolibéralisme 1974-2015
Allemagne	5,99	2,17
France	5,23	1,93
Japon	7,10	2,28
Royaume-Uni	2,71	1,89
États-Unis	2,44	1,53
Moyenne	4,69	1,96

TABLEAU 3.7 – Croissance annuelle moyenne en pourcentage de la productivité du travail entre 1950 et 2015. Source : calculs des auteurs d'après *Total Economy Database*

de la littérature (REZAI, TAYLOR *et al.*, 2013). Comme on l'a dit plus haut, la disponibilité de l'énergie est un aspect important de la croissance. Ce lien se retrouve dans la figure 3.4 page suivante qui met en relation le taux de croissance annuel moyen à 5 ans de l'exergie et de la productivité du travail et montre pour l'ensemble des pays considérés une relation positive entre ces deux grandeurs. Mis en regard du fort ralentissement de la croissance de l'exergie signalé précédemment (tableau 3.4 page 89) cette relation devient centrale pour penser les logiques distinctives des deux régimes : elle suggère que la forte croissance de la productivité du travail au cours de la période fordiste s'est nourrie de l'utilisation extensive des ressources naturelles et, a contrario, que le passage à un régime énergétique plus intensif dans la période néolibérale est une des causes du ralentissement de la productivité.

3.5.2 La dimension énergétique de la restauration de la part du capital

Fordisme et néolibéralisme se distinguent également du point de vue du partage de la valeur ajoutée : la part du capital a connu une hausse continue depuis la fin du fordisme. On constate une rupture de tendance nette sur la période 1970-1975 dans la trajectoire de la part du capital, décroissante jusque-là et croissante ensuite (figure 3.5 page suivante).

Cette différenciation en termes de répartition de la valeur ajoutée peut, elle aussi, être mise en rapport avec le changement de régime de la relation sociale à l'énergie en ce qui concerne la délocalisation de la consommation de l'énergie et l'intensification de son usage.

La figure 3.6 page 95 synthétise le tableau 3.5 page 90 et la figure 3.5 page suivante : elle montre, pour l'ensemble des pays, que la part du capital dans le partage de la valeur ajoutée est positivement corrélée à la part du CO2 importé dans les émissions totales de CO2, bien qu'à des degrés divers. Dans une perspective à la Mitchell, qui ancre les rapports de force sociaux dans la distribution des capacités de

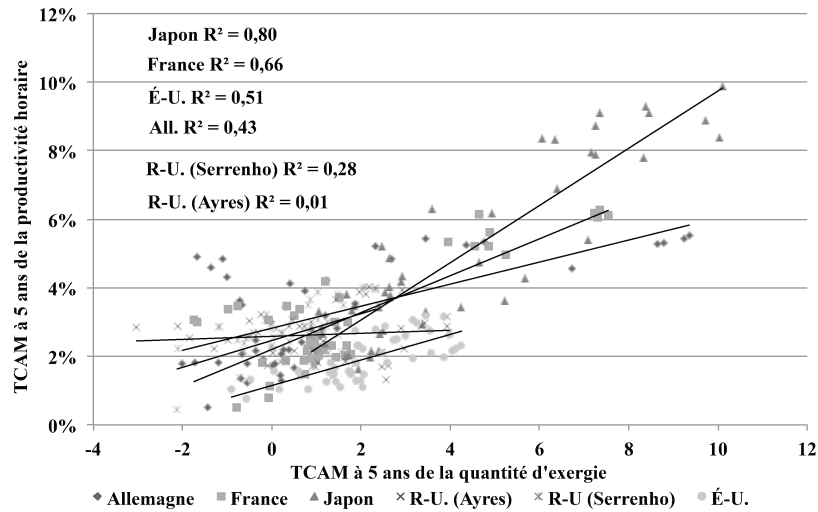


FIGURE 3.4 – Taux de croissance annuels moyens sur 5 ans de la quantité d'exergie et de la productivité du travail entre 1950 et 2009. 1950-2000 pour le Japon, le Royaume-Uni (Warr) et les États-Unis et 1960-2009 pour l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni (Serrenho). Sources : calculs réalisés par les auteurs d'après WARR, AYRES *et al.* (2010), SERRENHO *et al.* (2014) et *Total Economy Database*

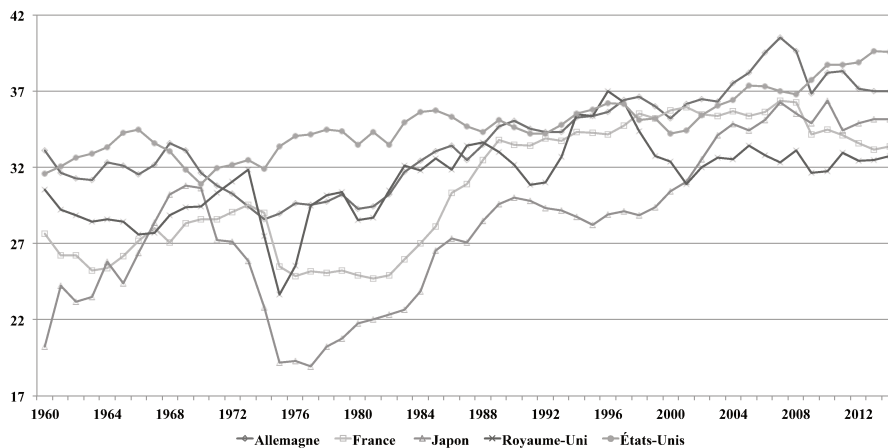


FIGURE 3.5 – Part du capital en pourcentage de la valeur ajoutée (1960-2014) mesurée au coût des facteurs.. Source : calcul des auteurs d'après les données de la base Ameco

contrôle sur l'utilisation de l'énergie, on peut faire l'hypothèse selon laquelle l'éloignement de l'utilisation de l'énergie affaiblit la position du travail face au capital en l'amointrissant de sa capacité à contrôler les flux d'énergie et, par conséquent, en diminuant son pouvoir structurel.

La figure 3.7 page ci-contre montre une corrélation forte et positive entre la productivité du *travail utile* et la part du capital. Cette corrélation est difficile à interpréter. Elle peut simplement signaler un ralentissement dans le taux d'accumulation du capital fixe – et donc de l'intensité du PIB en énergie – qui se traduit par un sous-emploi chronique et/ou une structuration de l'emploi défavorable aux salariés à

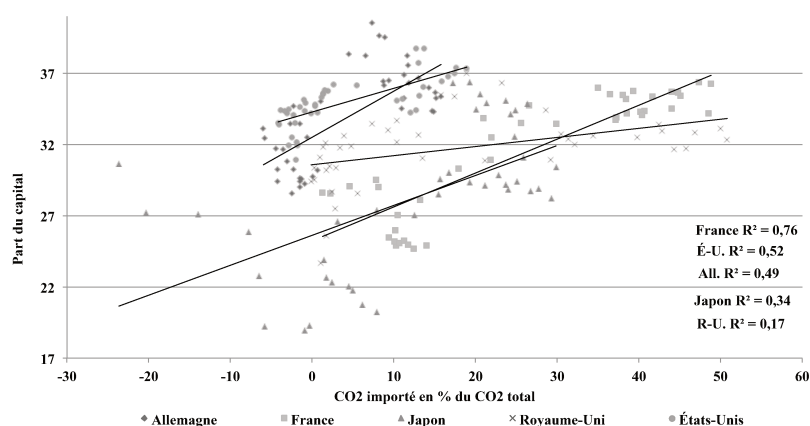


FIGURE 3.6 – CO2 importé (en % des émissions totales en approche consommation) et part du capital (en % de la valeur ajoutée) entre 1970 et 2011. Sources : calculs des auteurs d'après les données d'Eora et d'Ameco.

mesure que le secteur tertiaire augmente son poids relativement à l'industrie. Elle peut également saisir, dans le fil de la logique mise en évidence dans la première section, la perte relative du pouvoir structurel du travail liée aux changements intervenus dans les modes d'extraction et de distribution de l'énergie. Cela a pu faciliter des substitutions capital/travail dans les pays étudiés, une amélioration de l'efficacité énergétique due à l'intensification en capital ainsi que les délocalisations des productions intensives en travail, plus énergivores. Les parts respectives de ces effets devraient être analysées plus précisément. Il doit être bien clair, néanmoins, que l'explication énergétique ne vient pas se substituer aux autres explications du déplacement du partage de la valeur ajoutée, en particulier les explications en termes de financiarisation. Elle en constitue un complément et l'on peut voir dans les différentes explications un faisceau de facteurs se renforçant mutuellement.

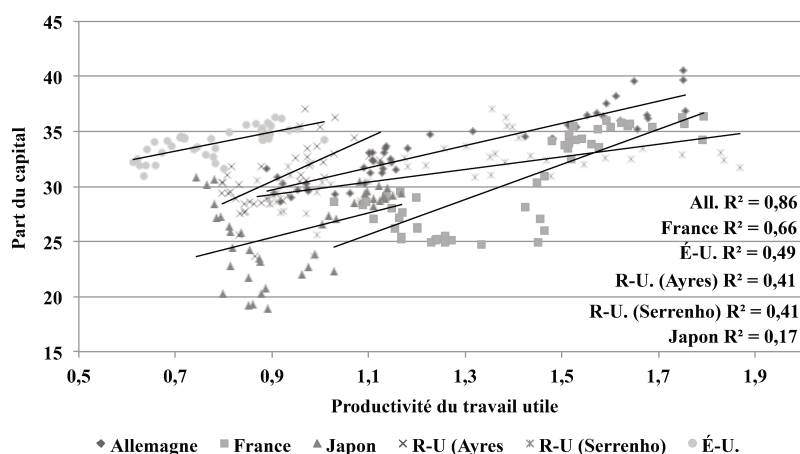


FIGURE 3.7 – Productivité du travail utile et part du capital dans le partage de la valeur ajoutée de 1960 à 2009. 1960-2000 pour le Japon, les États-Unis et le Royaume-Uni (Warr), 1960-2009 pour l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni (Serrenho). Sources : calculs des auteurs d'après données WARR, AYRES *et al.* (2010), SERRENHO *et al.* (2014) et *Total Economy Database* pour la productivité du travail utile, Ameco pour la part du capital

Même si la hausse de la productivité du *travail utile* procède en partie d'un trompe-l'œil, l'augmentation de la part de l'énergie incorporée aux importations, cela n'efface pas totalement de réels gains de productivité qui semblent avoir des effets sur la part du capital dans la VA. Ce point est étayé par le fait que l'Allemagne, première économie d'Europe en termes de production manufacturière, présente la plus forte corrélation entre part du capital et productivité du *travail utile*. L'énergie abondante à bon marché a constitué l'un des socles des forts gains de productivité du travail à la base du régime d'accumulation et du compromis social fordistes. Le ralentissement de la croissance de la quantité d'exergie peut expliquer en partie le ralentissement des gains de productivité du travail. De plus, l'accélération de la croissance de la productivité du *travail utile* et la délocalisation de l'utilisation de l'énergie sont à mettre en rapport avec la hausse de la part du capital dans le partage de la valeur ajoutée en tant qu'ils pourraient manifester une perte de contrôle du monde du travail des pays développés sur les processus énergétiques.

3.6 Conclusion

Notre étude montre que le fordisme se caractérise par une utilisation extensive de l'énergie et une utilisation intensive du travail basée sur de forts gains de productivité de ce dernier grâce à une augmentation rapide de la quantité d'énergie incorporée au processus de production. Ces régularités sont distinctes de celles observées dans la période néolibérale. Depuis la seconde moitié des années 1970, en effet, les gains de productivité sont plus faibles et la part du capital dans le partage de la valeur ajoutée s'est rétablie, tandis que l'utilisation de l'énergie est devenue plus intensive et qu'elle tend à se délocaliser.

Cette contribution se limite à établir le contraste entre ces deux régimes du point de vue du rapport social à l'énergie au niveau macro. Elle n'explique pas dans quelle mesure les changements intervenus dans le rapport social à l'environnement ont contribué à la transition d'un régime à l'autre. Des travaux ultérieurs devraient examiner cette question et, en particulier, proposer une lecture comparatiste de la grande crise des années 1970 et de la grande crise contemporaine. Il serait ainsi particulièrement éclairant d'examiner dans quelle mesure des effets de type seconde contradiction (O'CONNOR, 1988) ont pu s'ajouter à d'autres facteurs socioéconomiques pour produire l'entrée en récession. Il conviendrait aussi de s'interroger sur le rôle joué par les effets combinés de la délocalisation de l'utilisation de l'énergie et de l'accroissement de la productivité du *travail utile* dans la réaffirmation de l'hégémonie du capital et la désarticulation du mouvement ouvrier à partir des années 1980. C'est également une invitation à étudier les débats contemporains en matière de transition énergétique du point de vue de leurs implications socio-politiques.

Ce chapitre a mis l'accent sur le contraste entre les rapports sociaux à l'environnement propres au régime fordiste et au régime néolibéral dans les pays riches. Cette lecture s'est faite au détriment de l'analyse de la diversité des rapports sociaux à l'environnement entre les différents pays au sein de chaque régime et, plus encore, des différences entre pays du cœur et de la périphérie du capitalisme mondial. S'il est important pour la TR de dépasser le « nationalisme méthodologique » (PECK et THEODORE, 2007), cela ne doit pas conduire à écraser la diversité spatiale des régimes d'accumulation. Il est au contraire

crucial d'analyser ce qui distingue les différents régimes en termes de compossibilité (JESSOP, 2014), c'est-à-dire de relations d'interdépendances asymétriques qui les relient les uns aux autres, interdépendances particulièrement saillantes en ce qui concerne le rapport social à l'environnement et les dynamiques d'échanges inégales qui y sont associées (CLARK et BELLAMY FOSTER, 2009; HORNBERG et CRUMLEY, 2007). Cette perspective spatiale sera adoptée dans le chapitre 5.

D'un point de vue plus général, cette contribution a montré la possibilité et le caractère fécond de l'ouverture d'un dialogue entre la TR et l'Économie écologique. À cette fin, deux éléments nous semblent indispensables : d'une part, dénaturiser le rapport à la nature en intégrant pleinement sa dimension sociale, ce à quoi sert le concept de rapport social à l'environnement considéré en tant que sixième forme structurelle du mode de régulation ; d'autre part, intégrer le plus directement possible la matérialité dans l'analyse macroéconomique grâce aux données récentes en termes de flux physique d'énergie et de matière.

Carbone et régimes d'accumulation : rupture et asymétries dans la relation PIB-CO2 entre fordisme et néolibéralisme

4.1 Introduction

Ce chapitre vient directement à la suite du chapitre 3 dont il se veut le prolongement économétrique. Nous nous concentrons ici sur les émissions de CO2 dans la mesure où il existe des séries homogènes permettant de couvrir toute la période d'après-guerre depuis 1950 jusqu'à aujourd'hui¹. Nous resserons également la focale sur la France par soucis de pragmatisme quant à la complétion de ce chapitre : il s'agit donc d'une étude de la relation PIB-CO2 pour la France entre 1950 et 2013.

Au chapitre précédent nous avons montré une rupture dans la relation sociale à l'énergie. Cette dernière vient s'ajouter aux ruptures classiquement observées dans la croissance de la productivité et dans la part du capital, auxquelles nous pouvons ajouter la dissociation des dynamiques du taux de marge et du taux d'investissement à l'orée des années 1980, symptôme de la financiarisation de l'économie et fait stylisé caractérisant le régime néolibéral (M. Husson, 2010). Considérant la relation entre énergie et CO2 sur la période étudiée, il est peu probable que le changement de régime de la relation sociale à l'énergie ne se retrouve pas dans la relation entre PIB et CO2. De là, découle à nos yeux l'importance d'analyser cette relation dans le cadre de régimes d'accumulation historiquement situés. Pour rappel, ceux-ci sont définis par les économistes régulationnistes comme un ensemble de

« régularités assurant une progression générale et relativement cohérente de l'accumulation du

1. Les données de CO2 permettent en outre de remonter jusqu'en 1950 pour tous les pays. Cela nous permettra d'inclure les autres pays à haut revenu pris en compte au chapitre 3 pour approfondir le présent travail en vue d'une soumission à publication.

capital, c'est-à-dire permettant de résorber ou d'étaler dans le temps les distorsions et déséquilibres qui naissent en permanence du processus lui-même. Ces régularités concernent :

- un type d'évolution d'organisation de la production et de rapport des salariés aux moyens de production ;
- un horizon temporel de valorisation du capital sur la base duquel peuvent se dégager les principes de gestion ;
- un partage de la valeur permettant la reproduction dynamique des différents groupes sociaux ou classes ;
- une composition de la demande sociale validant l'évolution tendancielle des capacités de production ;
- une modalité d'articulation avec les formes non capitalistes, lorsque ces dernières ont une place importante dans la formation économique étudiée »

(BOYER, 2015, p. 61)

Les ruptures évoquées précédemment illustrent la mutation de ces régularités entre le régime d'accumulation fordiste et le régime d'accumulation néolibéral. Ces derniers s'appuient sur des modes de régulation distincts, définis comme

« tout ensemble de procédures et de comportements, individuels et collectifs, qui a la propriété :

- de reproduire les rapports sociaux fondamentaux à travers la conjonction de formes institutionnelles historiquement déterminées ;
- de soutenir et « piloter » le régime d'accumulation en vigueur ;
- d'assurer la compatibilité dynamique d'un ensemble de décisions décentralisées, sans que soit nécessaire l'intériorisation par les acteurs économiques des principes de l'ajustement de l'ensemble du système »

(ibid., p. 61)

Dans la continuité du chapitre 3 nous pouvons caractériser le fordisme comme un régime d'accumulation dans lequel de vastes rendements d'échelle et l'abondance d'énergie à bas coût ont abouti à un compromis social autour d'un partage de la valeur ajoutée en faveur du travail. Cela se traduit par un rapport salarial stable ainsi que par un rapport social à l'énergie extensif, c'est-à-dire fondé sur l'augmentation de la quantité d'énergie incorporée au processus de production. Le néolibéralisme, lui, est un régime où les gains de productivité du travail s'épuisent, érodant ainsi le compromis social forgé dans le régime d'accumulation précédent, avec une réduction de la part salariale dans la valeur ajoutée. Dans ce régime, l'État entrepreneurial s'érode au profit d'un État technocratique purement organisateur des marchés et la finance tire l'économie. Du point de vue énergétique, ce régime se révèle être plus intensif, avec un accroissement de la productivité de l'énergie, même si, nous l'avons vu, celle-ci relève en partie d'un effet de trompe-l'œil dû à la globalisation des chaînes de valeur.

Théoriquement, il apparaît donc important de revisiter la relation PIB-CO2 en tenant compte de la rupture dans les régularités de l'accumulation du capital. Si ces dernières diffèrent d'un régime à l'autre, il est également possible qu'une accélération ou une décélération de la croissance du PIB ait des effets différents sur les émissions de CO2. Deux enjeux se dégagent donc : tenir compte d'une éventuelle rupture structurelle dans la relation PIB-CO2, d'une part, et de sa possible asymétrie, d'autre part. Une série de résultats récents de la littérature sur la relation PIB-CO2 affirment l'importance de la prise en compte des ruptures structurelles. Par exemple, dans leur étude portant sur l'Espagne entre 1857 et 2007,

ESTEVE et TAMARIT (2012) estiment un modèle avec deux ruptures structurelles. AJMI *et al.* (2015) trouvent des variations temporelles dans la relation entre CO₂, énergie et PIB pour les pays du G7. APERGIS (2016) met, quant à lui, en évidence la variabilité temporelle de la relation de co-intégration entre les émissions de CO₂, le PIB et le PIB au carré pour la période 1870-2010 pour 15 pays à haut revenu. Bien qu'il trouve des résultats largement en faveur d'une courbe de Kuznets environnementale (CKE), il souligne néanmoins la fragilité de l'hypothèse d'une telle courbe si l'on prend en compte les effets d'irréversibilité des pollutions. Par ailleurs, l'auteur souligne également l'importance d'étudier les pays individuellement pour appréhender correctement leur hétérogénéité. Dans une optique régulationniste, il bien est évident que, malgré les similarités entre leurs régimes d'accumulation et les moments de rupture, chaque pays a *in fine* une histoire qui lui est propre, ce qui limite l'intérêt d'une démarche en données de panel. Ces travaux restent néanmoins très empiriques et discutent peu des bases théoriques sous-tendant la variation temporelle de la relation PIB-CO₂, pas plus qu'ils ne s'essaient à une périodisation historique de ces variations temporelles.

Une autre branche de la littérature insiste sur les asymétries entre PIB et CO₂. Cette littérature est encore jeune et ambivalente : certains résultats sont directement contradictoires entre eux. Elle ouvre toutefois une perspective intéressante : *a priori*, il n'y a en effet aucune raison pour que les émissions de CO₂ réagissent de façon univoque à la dynamique du PIB. Cela peut avoir des conséquences intéressantes pour l'analyse de la relation PIB-CO₂ : par exemple, si une diminution de la croissance du PIB, voire une décroissance, n'entraîne pas, ou peu, de réduction d'émissions de CO₂, cela peut augurer d'une dépendance de sentier nécessitant une mutation profonde du tissu productif pour aboutir à un découplage ; à l'inverse, cela peut indiquer qu'un découplage a déjà eu lieu. YORK (2012) montre que les émissions de CO₂ se réduisent moins vite en période de déclin économique qu'elles n'augmentent en période de croissance. Dans une étude portant sur 110 pays de 1950 à 2011, DODA (2013) constate que pour la majeure partie d'entre eux, la relation PIB-CO₂ est asymétrique et fortement hétérogène : 37 pays voient leurs émissions davantage corrélées au PIB en période de déclin, 40 voient leurs émissions plus fortement corrélées au PIB en période d'expansion et 33 pays affichent une relation symétrique. BURKE *et al.* (2015) testent l'hypothèse d'une asymétrie de l'élasticité des émissions de CO₂ aux variations du PIB pour un panel de 189 pays entre 1961 et 2010. Les auteurs ne trouvent pas de plus grande élasticité des émissions en période d'expansion qu'en période de récession mais montrent néanmoins une asymétrie significative lorsque les effets retardés de la croissance sur les émissions sont pris en compte : les émissions croissent alors plus vite en période d'expansion qu'elles ne se réduisent en période de récession, mais ce résultat dépend beaucoup de l'effet de composition du PIB. SHAHIDUZZAMAN et LAYTON (2015) se concentrent sur les États-Unis entre 1949 et 2013 : leurs résultats indiquent que les émissions de CO₂ et l'intensité du PIB en CO₂ se réduisent beaucoup plus rapidement en période de récession qu'elles ne s'accroissent en période d'expansion. Ils font en outre l'observation intéressante que la récente crise financière semble avoir eu un impact beaucoup plus prolongé sur les émissions que les périodes de récession précédentes. SHELDON (2017) montre également que les émissions de CO₂ se réduisent plus fortement durant les périodes de déclin qu'elles n'augmentent en période de croissance pour le cas des États-Unis entre 1950 et 2011. Enfin, dans un travail récent utilisant la même technique que celle utilisée

dans ce chapitre et portant toujours sur les États-Unis, pour la période 1980-2014, ENG et WONG (p.d.) confirment que les émissions de CO₂ y sont plus élastiques aux récessions qu'à la croissance du PIB à long terme mais trouvent une symétrie de court terme. Ces travaux suggèrent donc qu'il est pertinent d'adopter une approche asymétrique pour étudier la relation PIB-CO₂. Une telle approche permet, en outre, d'affiner l'analyse des différences entre régimes d'accumulation selon les rythmes de croissance.

L'objectif de ce chapitre est donc double, quoique modeste : en premier lieu, il s'agit de continuer de documenter les dynamiques du carbone propres au fordisme et au néolibéralisme, même si la portée empirique et théorique du présent chapitre est limitée. L'investigation est strictement agrégée et ne permet donc pas d'aller très loin dans l'analyse. Nous évoquons néanmoins plusieurs pistes d'approfondissement plus loin dans le chapitre. En l'état, il vise surtout à confirmer les résultats du chapitre 3 pour ouvrir de futures pistes de recherche permettant une plus grande intégration des dimensions environnementales à l'analyse régulationniste. Il s'agit donc d'un chapitre plus descriptif qu'analytique. En second lieu, il s'agit d'appliquer une technique récente d'économétrie asymétrique non linéaire à la relation CO₂-PIB pour prolonger la littérature sur l'asymétrie de cette relation. La problématique de ce chapitre est donc, d'une part, de déterminer si l'on observe une rupture de régime dans la relation PIB-CO₂ entre fordisme et néolibéralisme ; elle est, d'autre part, d'estimer l'asymétrie possible de l'élasticité des émissions de CO₂ aux variations du PIB pour chaque régime afin de comparer les effets des différents rythmes de croissance sur les émissions d'un régime à l'autre.

La section 4.2 décrit la méthodologie économétrique suivie ainsi que les choix de spécification des modèles estimés. Les données sont décrites dans la section 4.3. Les résultats sont ensuite exposés dans la section 4.4 et la section 4.5 en propose une mise en perspective. La conclusion résume les approfondissements possibles du présent travail et ouvre sur le chapitre 5.

4.2 Méthodologie : co-intégration, parcimonie, rupture structurelle et asymétries

Le cadre méthodologique que nous avons choisi pour modéliser la relation PIB-CO₂ est celui de la co-intégration, pour deux raisons. La première est qu'une large partie de la littérature récente sur la relation PIB-CO₂ utilise la co-intégration (HERVIEUX et MAHIEU, 2014), notamment dans le cadre d'approches non linéaires (voir par exemple dans la littérature récente APERGIS (2016), ENG et WONG (p.d.), ESTEVE et TAMARIT (2012) et SEPHTON et MANN (2013)). La seconde est que recourir à la co-intégration permet de dissocier court terme et long terme dans le cadre de modèles à correction d'erreur asymétriques (SHIN *et al.*, 2014). Conformément à notre cadre théorique, nous choisissons également de tenir compte explicitement de la rupture structurelle et des asymétries.

4.2.1 Relation de co-intégration et modèle à correction d'erreur

Deux variables sont dites cointégrées si elles sont intégrées de même ordre et si leur combinaison linéaire donne un terme d'erreur qui suit un processus stationnaire : c'est-à-dire que l'espérance de ce

dernier est indépendante du temps (aucune tendance claire n'est décelable au cours du temps), que sa variance, sa moyenne et sa covariance avec ses valeurs passées sont constantes, finies et indépendantes du temps. Nous parlons dans ce cas de stationnarité forte. En pratique, l'attention se porte essentiellement sur l'indépendance de l'espérance relative au temps, car les séries macroéconomiques sont souvent non-stationnaires en niveau mais stationnaires en différence. Soit, si l'on a

$$co2_t = \alpha + \beta pib_t + \varepsilon_t \quad (4.1)$$

et que

$$co2_t - \alpha - \beta pib_t = \varepsilon_t \sim I(0) \quad (4.2)$$

alors le CO2 et le PIB entretiennent une relation de co-intégration. Cela traduit l'idée qu'à court terme le CO2 et le PIB peuvent avoir des évolutions conjoncturelles divergentes mais qu'à long terme ces deux variables entretiennent une relation structurelle stable et évoluent de concert. En effet, si le terme d'erreur est stationnaire, cela signifie simplement que la différence entre les deux variables reste la même en moyenne à long terme : il n'y a donc pas de divergence grandissante entre les deux. À ce titre, l'absence de co-intégration peut constituer l'indication d'un découplage voire d'une trajectoire de type courbe de Kuznets environnementale. En effet, l'existence de cette dernière repose sur l'hypothèse d'une relation non linéaire, croissante puis décroissante, entre le revenu d'un pays et la qualité de son environnement (DINDA, 2004; SHAFIK et BANDYOPADHYAY, 1992)². Si CKE il y a, cela correspond à un découplage absolu entre PIB et CO2, c'est-à-dire à un écart tendanciellement grandissant entre les deux séries : dans ce cas, il n'y a donc pas de co-intégration.

Nous choisissons donc de modéliser la relation PIB-CO2 dans le cadre d'une relation de co-intégration qui fait dépendre les émissions de CO2 du PIB (ainsi que du prix du pétrole que nous incluons comme variable de contrôle dans certaines régressions). La relation 4.1 traduit la dynamique de long terme liant le CO2 au PIB. La dynamique de court terme est, elle :

$$co2_t = c + \gamma_1 co2_{t-1} + \gamma_2 pib_t + v_t \quad (4.3)$$

Il est possible de réécrire cette équation sous une forme à correction d'erreur de sorte à faire apparaître dans le même modèle les dynamiques de court et de long termes :

$$co2_t - co2_{t-1} = c + \gamma_1 co2_{t-1} - co2_{t-1} + \gamma_2 pib_t - \gamma_2 pib_{t-1} + \gamma_2 pib_{t-1} + v_t \quad (4.4)$$

$$\Delta co2_t = c + (\gamma_1 - 1)co2_{t-1} + \gamma_2 \Delta pib_t + \gamma_2 pib_{t-1} + v_t \quad (4.5)$$

$$\Delta co2_t = (\gamma_1 - 1)\left[co2_{t-1} + \frac{\gamma_2 pib_{t-1}}{\gamma_1 - 1} + \frac{c}{\gamma_1 - 1}\right] + \gamma_2 \Delta pib_t + v_t \quad (4.6)$$

$$\Delta co2_t = -(1 - \gamma_1)\left[co2_{t-1} - \frac{\gamma_2 pib_{t-1}}{1 - \gamma_1} - \frac{c}{1 - \gamma_1}\right] + \gamma_2 \Delta pib_t + v_t \quad (4.7)$$

2. Nous revenons plus en détail sur la CKE dans le chapitre 5

Si l'on pose $\frac{\gamma_2}{1-\gamma_1} = \beta$ et $\frac{c}{1-\gamma_1} = \alpha$, il vient donc

$$\Delta co2_t = -(1-\gamma_1)[co2_{t-1} - \alpha - \beta pib_{t-1}] + \gamma_2 \Delta pib_t + v_t \quad (4.8)$$

Nous retrouvons alors dans le terme entre crochets l'expression de l'écart à l'équilibre de la relation de long terme exprimée par l'équation 4.2. $-(1-\gamma_1)$ est le terme à correction d'erreur (ou terme d'ajustement) : il doit être négatif pour corriger l'erreur ε_t lorsque $co2_t$ s'écarte de sa valeur d'équilibre de long terme $\alpha + pib_t$. Finalement, en développant l'expression factorisée de l'écart à l'équilibre, nous obtenons la forme sous laquelle les résultats sont présentés :

$$\Delta co2_t = c + \rho co2_{t-1} + \gamma_2 pib_{t-1} + \gamma_2 \Delta pib_t + v_t \quad (4.9)$$

avec $\rho = -(1-\gamma_1)$. Le coefficient de long terme de pib_{t-1} est donc $\beta = \frac{\gamma_2}{-\rho}$. L'équation est représentée ici dans sa forme la plus simple mais elle peut inclure davantage de variables en différence pour les variables explicatives selon le nombre de retards dans l'équation de départ en niveau (4.3), notamment pour enlever toute autocorrélation des résidus. Cela donne donc :

$$\Delta co2_t = c + \rho co2_{t-1} + \gamma \mathbf{x}_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \psi_1 \Delta co2_{t-i} + \sum_{i=0}^{p-1} \psi_2 \Delta \mathbf{x}_{t-i} \quad (4.10)$$

avec \mathbf{x}_{t-1} le vecteur des variables explicatives, ici le PIB et le prix du pétrole. Il faut noter que lorsque l'équation de court terme en niveau (4.3) n'inclut pas plus d'une période pour une variable explicative, il n'y a pas, par définition, de terme en différence pour celle-ci. Quand c'est le cas, la valeur des coefficients de la variable en niveau et en différence est identique. L'algorithme *ardl* de Stata (KRIPFGANZ et SCHNEIDER, 2016) indique directement les coefficients β de long terme et les coefficients de court terme des variables en différence : dans le cas d'une valeur identique, il utilise donc la valeur du coefficient en niveau pour la variable en différence. Cela n'est pas gênant dans la mesure où les coefficients en niveau sont également des coefficients de court terme et ne s'interprètent pas directement : seuls s'interprètent les coefficients β de long terme et les coefficients de court terme des variables en différence. Pour connaître la valeur des coefficients de court terme en niveau que nous produisons dans les résultats, nous avons simplement récupéré les résultats de la régression sous-jacente en moindres carrés ordinaires.

4.2.2 Une approche parcimonieuse

Ce modèle est de type *autoregressive distributed lags* (ARDL) ou modèle autorégressif à retards échelonnés (PESARAN et SHIN, 1999). Un avantage de cette approche est sa bonne performance sur les petits échantillons, ce qui est souvent le cas des échantillons en macroéconométrie (PESARAN et SHIN, 1999; PESARAN, SHIN et R. J. SMITH, 2001). C'est le cas du nôtre, puisque l'on travaille à partir de 62 observations, lesquelles seront en outre divisées en deux sous-périodes d'environ 30 observations chacune. D'un point de vue statistique cela est très peu mais d'un point de vue économique cela correspond à la

temporalité des régimes d'accumulation étudiés. Ce faible nombre d'observations est la raison essentielle pour laquelle nous avons opté pour une approche parcimonieuse en limitant la spécification du modèle au PIB et en adjoignant simplement le prix du pétrole comme unique variable de contrôle, dans la mesure où la période étudiée couvre deux chocs pétroliers et une forte volatilité des prix des matières premières³. Une deuxième raison est que, suivant BURKE *et al.* (2015), ajouter d'autres variables de contrôle liées à l'industrie ou à l'énergie diminuerait l'effet du PIB qui agit via ces variables-là. Troisième raison, comme AZOMAHOU *et al.* (2006), nous ne cherchons pas à prédire les émissions futures mais simplement à étudier la trajectoire historique de la relation entre PIB et CO₂. Nous l'avons dit en introduction, ce choix de nous concentrer strictement sur la relation PIB-CO₂ se fait, il est vrai, au prix d'une moindre finesse d'analyse et de conclusions théoriques et empiriques logiquement limitées.

4.2.3 Courbe de Kuznets environnementale et rupture structurelle

Enfin, nous choisissons de ne pas inclure de terme quadratique PIB^2 comme il est courant dans la littérature sur la relation PIB-CO₂, notamment lorsqu'il s'agit de tester la présence d'une courbe de Kuznets environnementale. Cela revient en effet à imposer *a priori* une forme spécifique à la relation PIB-CO₂ sans que celle-ci soit justifiée par une solide base théorique. De plus, comme l'estimation d'un modèle à correction d'erreur permet précisément de dissocier effets de long et de court termes, le coefficient de long terme associé au PIB devrait être négatif en présence d'un découplage absolu entre PIB et CO₂. Enfin, mener des tests de rupture structurelle permet aussi de capturer une dynamique de type CKE si elle est présente : l'hypothèse d'une courbe de Kuznets environnementale entre PIB et CO₂ intègre implicitement celle de la non-constance des coefficients. Celle-ci implique en effet un changement de signe du coefficient associé au PIB, ce qui peut traduire un changement de régime de la relation PIB-CO₂. Cette non-constance de la relation PIB-CO₂ peut être le produit d'un changement dans les régularités de l'accumulation du capital. C'est donc précisément un apport potentiel d'une approche régulationniste de la relation PIB-CO₂ que de mettre en perspective ces évolutions au prisme des changements de régime d'accumulation. Une telle perspective est absente de la littérature jusqu'à présent. La méthode habituelle consiste à estimer la présence d'une CKE avec un terme quadratique pour le PIB — qui capture alors le changement de signe du coefficient. Cela permet d'ajuster correctement la trajectoire des émissions de CO₂ au moyen d'une spécification *ad hoc* mais au prix d'un terme, PIB^2 , dont le sens économique n'est pas évident. Peut-être cette méthode a-t-elle contribué à masquer la nécessité d'étudier plus fondamentalement les causes de la variabilité dans le temps des coefficients au-delà des trois effets d'échelle de l'économie, de composition du PIB et de technologie bas-carbone, qui sont communément mentionnés dans la littérature. Est aussi parfois pris en compte, comme une critique de la CKE, l'effet de délocalisation des émissions (VAN ALSTINE et NEUMAYER, 2008). Ces quatre effets font largement écho aux modalités d'accumulation du capital et peuvent donc être étudiés dans un cadre théorique régulationniste. Dans le présent travail, nous nous limiterons toutefois à la prise en compte de l'effet de délocalisation. Étudier les trois autres nécessiterait de décomposer le PIB et d'adjoindre certaines

3. Pour évaluer la robustesse des résultats, nous ajoutons tout de même une deuxième variable de contrôle capturant le mix énergétique dans la section 4.5 page 127.

variables de contrôle, ce que l'on a choisi de ne pas faire ici pour les raisons exposées précédemment. Deux autres raisons nous incitent à ne pas inclure de terme quadratique : d'une part, la littérature sur l'asymétrie de la relation PIB-CO2 n'y a pas recours ; d'autre part, estimer un polynôme du second degré avec les méthodes habituelles de la co-intégration pose problème car le carré d'une série intégrée ne constitue pas lui-même un processus intégré d'ordre quelconque et est lié de façon déterministe à la série non quadratique (WAGNER, 2015). Recourir à des modèles à correction d'erreur en tenant compte des ruptures structurelles plutôt que de recourir à un terme quadratique nous paraît donc un moyen plus pertinent d'étudier la relation PIB-CO2 d'un point de vue non seulement statistique mais aussi économique et historique, même si cela implique de travailler sur de petits échantillons.

L'approche ARDL offre en outre une grande flexibilité dans la mesure où elle permet d'estimer des relations en niveau sans requérir le même ordre d'intégration pour toutes les variables, ces dernières pouvant être indifféremment intégrées d'ordres zéro $I(0)$ ou 1 $I(1)$. PESARAN, SHIN et R. J. SMITH (2001) fournissent ainsi une méthodologie pour estimer une relation de long terme quel que soit l'ordre d'intégration des variables grâce à deux tests. Le premier, tiré de BANERJEE *et al.* (1998), permet d'estimer si le coefficient de la variable expliquée retardée en niveau, ici ρ , est égal à zéro. Si tel est le cas, il n'existe pas, par définition, de relation de long terme car ce coefficient entre dans le calcul des coefficients de long terme des variables explicatives. Le second test permet d'estimer si les coefficients de toutes les variables en niveau sont conjointement égaux à zéro contre l'hypothèse alternative qu'ils sont conjointement significativement différents de zéro. Nous indiquerons les statistiques t_{BDM} et F_{PSS} de ces deux tests ainsi que les valeurs critiques correspondantes. Celles-ci sont fournies par PESARAN, SHIN et R. J. SMITH (2001) de sorte qu'elles couvrent tous les cas possibles d'ordre d'intégration des variables entre $I(0)$ et $I(1)$, permettant ainsi l'estimation d'une relation de long terme entre variables d'ordres d'intégration différents. Nous concluons à la présence d'une relation de long terme en niveau si les statistiques t_{BDM} et F_{PSS} sont respectivement inférieure et supérieure aux valeurs critiques correspondant au cas étudié. Au-delà de la présence d'une relation de long terme, nous ne pourrions parler de co-intégration que si les variables sont $I(1)$. Nous verrons que c'est bien le cas de nos variables. Il subsiste une incertitude pour les émissions de CO2 en approche production sur la période néolibérale mais cela n'est pas gênant vu les propriétés de l'approche ARDL.

4.2.4 Une modélisation asymétrique

Comme nous l'avons vu, la littérature tend à indiquer que les émissions de CO2 ne réagissent pas de la même façon selon la magnitude des évolutions du PIB. Dès lors, imposer *a priori* la symétrie du coefficient associé au PIB paraît abusif et demande au moins à être testé dans le cadre plus flexible de l'asymétrie. D'une manière générale, rien n'indique que l'hypothèse de symétrie des coefficients soit le cas pertinent pour étudier l'interaction des variables d'intérêt en sciences sociales (SHIN *et al.*, 2014). Dès lors, nous allons estimer la relation PIB-CO2 à l'aide de l'estimateur ARDL non linéaire proposé par SHIN *et al.* (*ibid.*). Cet estimateur est une version modifiée du modèle ARDL qui s'appuie sur une décomposition de la variable d'intérêt (ici le PIB) en sommes partielles cumulatives autour d'un seuil traduisant l'évolution de la variable d'intérêt au-dessus et en-dessous de ce seuil. La littérature indique

qu'une relation de co-intégration peut ainsi être décomposée entre les différentes composantes de la variable d'intérêt (ibid.)⁴.

Recourir à une approche asymétrique permet également d'affiner l'analyse en termes de régime d'accumulation en étudiant la différenciation entre régimes pour la relation CO2-PIB selon les différents rythmes de croissance du PIB. Une difficulté réside, ici, dans le fait que le seuil choisi pour la décomposition en composantes inférieure et supérieure ne peut être zéro car le PIB ne diminue jamais hors période exceptionnelle de récession. Avec un seuil à zéro, nous disposerions de trop peu de point de données pour la composante négative du PIB⁵. Dès lors, suivant SHIN *et al.* (ibid.), nous choisissons comme seuil de décomposition en sommes partielles le taux de croissance annuel moyen sur toute la période étudiée, soit 1951-2013. Pour introduire l'asymétrie dans le modèle nous décomposons donc le PIB en sommes partielles telles que :

$$\mathbf{pib}_t^{\text{sup}} = \sum_{i=1}^t \Delta \mathbf{pib}_t^{\text{sup}} = \sum_{i=1}^t \max(\Delta \mathbf{pib}_t, \overline{\Delta \mathbf{pib}}_{1951-2013}) \quad (4.11)$$

$$\mathbf{pib}_t^{\text{inf}} = \sum_{i=1}^t \Delta \mathbf{pib}_t^{\text{inf}} = \sum_{i=1}^t \min(\Delta \mathbf{pib}_t, \overline{\Delta \mathbf{pib}}_{1951-2013}) \quad (4.12)$$

avec $\Delta \mathbf{pib}_t^{\text{sup}}$ et $\Delta \mathbf{pib}_t^{\text{inf}}$ les évolutions du PIB respectivement supérieures et inférieures à la croissance de long terme. Le graphique 4.1 page suivante illustre la décomposition du PIB entre ses deux composantes supérieures et inférieures à sa croissance de long terme.

Nous pouvons réécrire notre modèle dans sa version asymétrique de la façon suivante :

$$\Delta \mathbf{co}2_t = c + \rho \mathbf{co}2_{t-1} + \gamma_{\mathbf{pib}}^{\text{sup}} \mathbf{pib}_{t-1}^{\text{sup}} + \gamma_{\mathbf{pib}}^{\text{inf}} \mathbf{pib}_{t-1}^{\text{inf}} + \sum_{i=1}^{p-1} (\psi_1 \Delta \mathbf{co}2_{t-i} + \psi_i^{\text{sup}} \Delta \mathbf{pib}_{t-i}^{\text{sup}} + \psi_i^{\text{inf}} \Delta \mathbf{pib}_{t-i}^{\text{inf}}) \quad (4.13)$$

Le modèle peut également n'être que partiellement asymétrique, soit en étant symétrique à long terme et asymétrique à court terme soit en étant asymétrique à long terme et symétrique à court terme :

4. Toutefois, cette technique récente a été publiée sous la forme d'un chapitre d'ouvrage et non d'un article dans une revue d'économétrie à comité de lecture. Cela pose notamment des questions quant à ce qui est réellement modélisé par la décomposition en sommes partielles. La formulation de cet estimateur peut souffrir de problèmes non résolus. L'interprétation des variables décomposées pour le court terme pose aussi question. Nous remercions Antonia López pour avoir attiré notre attention sur ces problèmes éventuels. Il faut cependant noter que cet estimateur a déjà donné lieu à une littérature abondante : sur googlescholar, le mot-clef *nonlinear ardl* donne ainsi plus de cinq mille résultats.

5. La littérature sur l'asymétrie de la relation PIB-CO2 dépasse ce problème en recourant à des données de panel, ce qui augmente le nombre d'observations de récession ou en utilisant un indice de production industrielle semestrielle qui a une variabilité supérieure au PIB.

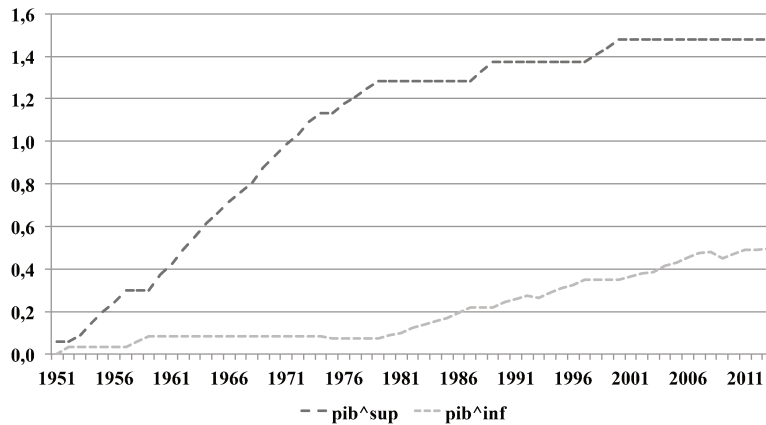


FIGURE 4.1 – PIB décomposé en sommes partielles cumulatives des variations supérieures et inférieures à la croissance de long terme (définie comme le taux de croissance annuel moyen du PIB sur la période 1951-2013).

$$\Delta co2_t = c + \rho co2_{t-1} + \gamma_{pib} pib_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} (\psi_1 \Delta co2_{t-i} + \psi_i^{sup} \Delta pib_{t-i}^{sup} + \psi_i^{inf} \Delta pib_{t-i}^{inf}) \quad (4.14)$$

$$\Delta co2_t = c + \rho co2_{t-1} + \gamma_{pib}^{sup} pib_{t-1}^{sup} + \gamma_{pib}^{inf} pib_{t-1}^{inf} + \sum_{i=1}^{p-1} (\psi_1 \Delta co2_{t-i} + \psi_i \Delta pib_{t-i}) \quad (4.15)$$

Lorsqu'il est inclus en variable de contrôle, le prix du pétrole n'est pas décomposé dans la mesure où il ne s'agit pas ici de notre variable d'intérêt. Bien sûr, le choix du taux de croissance annuel ne facilite pas l'interprétation des résultats : nous ne raisonnerons pas ici en termes de hausse et de baisse du PIB (bien que la composante inférieure contienne aussi les rares épisodes de récession) mais en termes de hausse supérieure et inférieure à la croissance de long terme. Aussi, nous voyons bien sur la figure 4.1 que les épisodes de croissance supérieure et inférieure à la moyenne historique sont assez polarisés entre les périodes fordiste et néolibérale. Nous aurions pu choisir pour chaque sous-période le taux de croissance annuel moyen qui lui est propre : toutefois, conserver le même seuil pour les deux sous-périodes permet une meilleure comparabilité. En outre, cette polarisation permet de rendre compte des différents rythmes de croissance associés à chacun des régimes d'accumulation. Enfin, même si nous adopterons une date fixe pour dissocier les deux sous-périodes, il est bien évident que modifier le seuil de la décomposition à date fixe peut poser un problème dans la mesure où la transition d'un régime à l'autre s'effectue dans la durée. Cela aurait en outre supposé d'imposer *a priori* l'hypothèse de rupture structurelle⁶.

6. Une piste pour dépasser ces difficultés pourrait être d'adopter un seuil dynamique, par exemple le taux de croissance annuel moyen sur cinq ans et ce tout au long de la période 1951-2013, afin de mieux coller aux tendances de la croissance et d'obtenir une moindre polarisation des épisodes supérieurs et inférieurs au taux de croissance moyen d'un régime à l'autre. Un autre seuil possible serait de prendre l'écart entre le PIB et le PIB de pleine capacité ou encore la moyenne + l'écart-type. Nous remercions Federico Bassi et Antonia Lopez pour ces suggestions que nous testerons dans le cadre de l'approfondissement de ce chapitre.

À l'aide des coefficients obtenus, il est ensuite possible de calculer les multiplicateurs dynamiques cumulatifs tels que :

$$\mathbf{m}_h^{\text{sup}} = \sum_{j=0}^h \frac{\partial \text{co2}_{t+j}}{\partial \text{pib}^{\text{sup}}} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{m}_h^{\text{inf}} = \sum_{j=0}^h \frac{\partial \text{co2}_{t+j}}{\partial \text{pib}^{\text{inf}}} \quad (4.17)$$

$$(4.18)$$

avec $h = 0, \dots, 35$, comme nous l'expliquerons dans la section 4.4. Ces multiplicateurs illustrent la trajectoire d'ajustement des émissions de CO2 entre l'ancien et le nouvel équilibre après un choc sur les variables de PIB. Par construction, lorsque $h \rightarrow \infty$ alors $\mathbf{m}_h^{\text{sup}} \rightarrow \beta_{\text{pib}}^{\text{sup}}$ et $\mathbf{m}_h^{\text{inf}} \rightarrow \beta_{\text{pib}}^{\text{inf}}$, ce que l'on vérifiera dans nos résultats. Il est probable que les trajectoires d'ajustement seront elles aussi asymétriques, bien que le terme à correction d'erreur ne le soit pas lui-même. En effet, le modèle ARDL non linéaire permet en fait trois types d'asymétrie : (1) l'asymétrie de long terme lorsque $\beta_{\text{pib}}^{\text{sup}} \neq \beta_{\text{pib}}^{\text{inf}}$ que SHIN *et al.* (2014) dénomment asymétrie de réaction, (2) une asymétrie de court terme lorsque $\psi_i^{\text{sup}} \neq \psi_i^{\text{inf}}$ que les auteurs dénomment asymétrie d'impact et enfin (3) une asymétrie d'ajustement capturée par la traverse entre deux équilibres qui résulte de l'interaction entre les asymétries de réaction et d'impact avec le terme à correction d'erreur (*ibid.*).

4.3 Données

Nous utilisons des données annuelles sur la France de 1950 à 2013. Comme au chapitre précédent, nous utilisons les données d'émissions de CO2 du *Carbon Dioxide Information Center* (CDIAC) pour les émissions domestiques (BODEN *et al.*, 2016) et de la base *Eora Input-Output Database* pour les données ajustées de la consommation (LENZEN *et al.*, 2013). Les données du CDIAC permettent de remonter jusqu'à 1950 afin de couvrir l'entièreté de la période fordiste. Celles de la base *Eora* permettent de remonter jusqu'à 1970, ce qui permet de couvrir l'entièreté de la période d'émergence de la globalisation et de la période néolibérale. Nous rappelons que les émissions dites domestiques ou en approche production correspondent au CO2 émis sur le territoire du pays i en t . Les émissions en approche consommation, sont elles, calculées comme suit :

$$\text{CO2}_{i,t}^{\text{conso}} = \text{CO2}_{i,t}^{\text{prod}} - \text{CO2}_{i,t}^{\text{export}} + \text{CO2}_{i,t}^{\text{import}} \quad (4.19)$$

Bien que l'on parle d'émissions en approche consommation, il est donc important d'avoir à l'esprit que cette mesure incorpore aussi la dimension production. Elle ajuste simplement l'empreinte carbone pour le CO2 incorporé aux exportations et aux importations de biens et services afin de la quantifier plus précisément en fonction de l'usage final des émissions de CO2. La figure 4.2 page suivante illustre la

trajectoire des émissions CO₂ de la France selon les deux mesures. Nous voyons qu'en dehors des effets crise, les trajectoires sont celles d'une stabilisation pour les émissions domestiques et d'une augmentation pour les émissions en approche consommation.

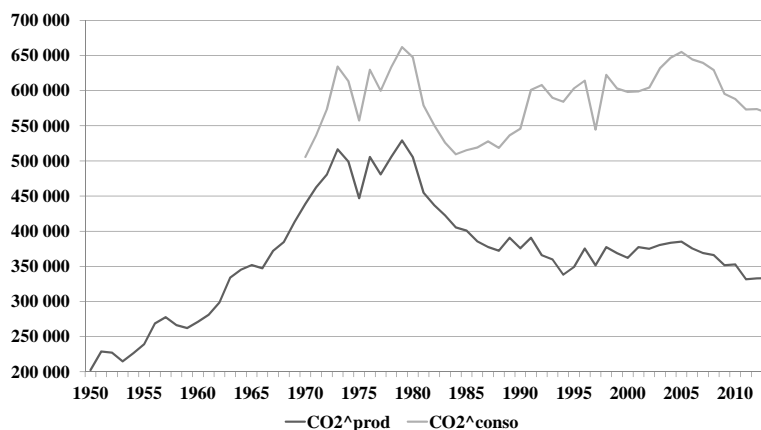


FIGURE 4.2 – Emissions de CO₂ de la France entre 1950 et 2013 en approches production et consommation. Unité : milliers de tonnes de CO₂. Sources des données : CDIAC (production) et Eora Input-Output Database (consommation).

Dans les estimations qui suivent, le CO₂ en approche consommation est dénommé *co2combi* : pour l'entièreté de la période 1951-2013 et pour la période fordiste (1951-1980), la série combine en fait les émissions en approche production de 1950 à 1969 et les émissions en approche consommation ensuite. Nous faisons là l'hypothèse que le CO₂ incorporé aux importations était marginal avant 1970. C'est bien évidemment une hypothèse forte qui est de plus problématique d'un point de vue statistique car elle induit un saut dans les émissions en 1970 et introduit du bruit dans la série. Les régressions avec *co2combi* pour 1951-2013 et la période fordiste doivent donc réellement être regardées comme des exercices prospectifs et non pas comme des régressions réellement robustes. Nous verrons d'ailleurs que seule la période néolibérale (1981-2013) peut être interprétée avec *co2combi* dans le cadre de l'approche ARDL : elle n'est pas concernée par ces problèmes puisque *co2combi* est homogène sur cette période. Le PIB à prix constant (prix 2010) provient de la banque de données macroéconomiques de l'Insee. Enfin le prix du pétrole est le prix par baril en dollars de 2014 tiré de la *BP Review 2015*. Le tableau 4.1 page suivante récapitule les variables, les données et les sources.

Toutes les variables sont en logarithme de sorte que les coefficients peuvent s'interpréter directement comme des élasticités : si le PIB varie de 1% le CO₂ varie de $\beta\%$.

4.4 Résultats : effets différenciés des rythmes de croissance et trajectoires d'ajustement distinctes

Cette section détaille l'ensemble de nos résultats : ceux des tests préliminaires de racine unitaire, de rupture structurelle et de symétrie des coefficients, puis les résultats eux-mêmes et, enfin, l'illustration graphique des trajectoires d'ajustement au moyen des multiplicateurs dynamiques.

Variable	Données	Source
<i>co2prod</i>	Émissions de CO2 en approche production de 1950 à 2013	<i>Carbon Dioxide Information Center</i>
<i>co2combi</i>	Combine les émissions en approche production (1950-1969) et les émissions en approche consommation (1970-2013)	<i>Carbon Dioxide Information Center et Eora Input-Output Database v. 199.82</i>
<i>pib</i>	Produit Intérieur Brut à prix constant (euro 2010)	Insee
<i>oil</i>	Prix du pétrole à prix constant (dollar 2014)	<i>BP Review 2015</i>

TABLEAU 4.1 – Variables, données et sources.

4.4.1 Tests de racine unitaire, de rupture structurelle et de symétrie des coefficients

Afin de spécifier correctement les modèles estimés et de vérifier la pertinence d'une approche ARDL, nous testons la présence d'une racine unitaire dans nos données d'une part et la présence d'une rupture structurelle d'autre part. À la suite des premières estimations, nous vérifions ensuite la validité de l'hypothèse de symétrie des coefficients afin de déterminer le meilleur modèle. Enfin, nous estimons le modèle le plus pertinent pour chacune des spécifications et des périodes étudiées.

Tests de racine unitaire

Les résultats des tests de racine unitaire sont présentés dans le tableau 4.2 page suivante. Par souci de robustesse des résultats, nous avons appliqué les tests *Augmented Dickey-Fuller* (ADF) (DICKEY et FULLER, 1979), de Philips et Perron (P&P) (PHILLIPS et PERRON, 1988) et *Dickey-Fuller Generalized Least Square* (DF-GLS) (ELLIOTT *et al.*, 1996). Le test de P&P présente l'avantage d'être robuste à la présence d'hétéroscédasticité et d'autocorrélation. Le test DF-GLS, a quant à lui, une plus grande puissance statistique que le test ADF. Comme ADF et P&P sont biaisés en présence de rupture structurelle, nous utilisons également le test de Zivot et Andrews qui permet de tester la présence d'une racine unitaire en cas de rupture structurelle. Pour mener les tests, nous avons sélectionné la structure des retards pour chaque variable selon le critère d'information bayésien de Schwarz. Ce dernier présente un avantage théorique sur le critère de Akaike : le critère de Schwarz (et le critère de Hannan-Quinn) fournit en effet une bonne estimation de la vraie structure de retards, alors que le critère de Akaike indique une structure de retard probablement surestimée (LÜTKEPOHL, 2007). Par ailleurs, le critère de Schwarz tend à être légèrement plus performant sur des échantillons réduits (PESARAN et SHIN, 1999). En pratique, toutefois, nous observons le plus souvent une convergence entre les différents critères d'information (de Schwartz, d'Akaike, de Hannan-Quinn) quant à la structure des retards à sélectionner. Nous autorisons quatre retards maximum, ce qui est conventionnel dans la littérature et paraît raisonnable dans le cas de données annuelles. Pour les émissions en approche production, nous n'incluons pas de terme de tendance pour le test sur l'ensemble de la période mais nous en incluons un pour chaque sous-période fordiste et néolibérale car il y a une tendance claire sur chacune d'elles. Pour les émissions en approche

consommation, nous incluons un terme de tendance pour l'ensemble de la période ainsi que pour les deux sous-périodes car une tendance claire se dessine dans les trois cas, effets crise mis à part. Il en est de même pour le PIB. Concernant les décompositions du PIB en sommes partielles, nous incluons un terme de tendance pour l'ensemble de la période et pour la période fordiste pour pib^{sup} et pour l'ensemble de la période et pour la période néolibérale pour pib^{inf} .

Les résultats indiquent dans leur très grande majorité la présence d'une racine unitaire pour chacune des séries à chaque période testée et permettent donc de conclure à leur non-stationnarité. Nous remarquons, toutefois, que les émissions en approche production semblent être stationnaires sur la période néolibérale d'après ADF et P&P mais pas d'après DF-GLS. Un doute subsiste donc sur leur ordre d'intégration concernant cette sous-période.

Test	Période	$co2prod$	$co2combi$	pib	pib^{sup}	pib^{inf}	oil
ADF	1951-2013	-2,10	-0,94	-0,70	-1,15	-1,53	-1,01
	Fordisme	-2,13	-2,52	-0,34	-0,97	-2,31	0,538
	Néolibéralisme	-3,85***	-3,05	-0,79	-1,24	-2,62	-1,22
P&P	1951-2013	-2,76**	-1,21	-0,25	-0,398	-1,00	-0,93
	Fordisme	-2,32	-2,14	-0,17	-1,57	-3,03	0,58
	Néolibéralisme	-3,93***	-3,15*	-0,65	-1,03	-2,50	-1,27
DF-GLS	1951-2013	-0,49	-0,71	-0,49	-0,76	-1,23	-0,65
	Fordisme	-2,35	-2,24	-0,97	-1,52	-0,47	0,06
	Néolibéralisme	-1,67	-1,61	-1,46	-0,56	-2,66	-0,93
Test de racine unitaire avec rupture structurelle							
Z&A [1, 2, 3]	1951-2013	-3,34	-2,91	-2,19	-3,03	-2,53	-3,05
		-3,73	-3,52	-3,70	-4,36*	-4,31	-2,03
		-4,07	-4,71	-3,45	-4,10	-3,79	-2,95

TABLEAU 4.2 – Tests de racine unitaire. L'hypothèse nulle pour tous les tests est celle de présence de racine unitaire, donc de non-stationnarité des variables. Significativité : 1% :***; 5% :**; 10% :*. L'hypothèse nulle est rejetée si la valeur est significative au moins au seuil de 10%. ADF : *Augmented Dickey-Fuller*; P&P : Phillips et Perron (statistique τ); DF-GLS : *Dickey-Fuller Generalized Least Square* et Z&A : Zivot et Andrews en (1) niveau, (2) tendance, (3) niveau et tendance (de haut en bas).

Afin de vérifier l'ordre d'intégration des variables, nous appliquons également un test ADF sur les variables en différence première (tableau 4.3). Ce test confirme que les variables sont intégrées d'ordre 1 car il suffit de les différencier une fois pour les rendre stationnaires. En cas de relation de long terme entre elles, nous pourrions donc considérer que ces variables sont cointégrées.

Test	Période	$\Delta co2prod$	$\Delta co2combi$	Δpib	Δpib^{sup}	Δpib^{inf}	Δoil
ADF	1951-2013	-7,49***	-5,2***	-5,83***	-3,29***	-6,13***	-7,75***
	Fordisme	-5,81***	-3,80**	-4,18***	-3,65***	-4,73***	-5,13***
	Néolibéralisme	-6,51***	-3,74**	-3,96***	-3,24**	-5,47***	-6,76***

TABLEAU 4.3 – Tests de racine unitaire pour les variables en différence. L'hypothèse nulle est celle de la présence d'une racine unitaire, donc de non stationnarité des variables. Significativité : 1% :***; 5% :**; 10% :*. L'hypothèse nulle est rejetée si la valeur est significative au moins au seuil de 10%.

Tests de rupture structurelle

Conformément à la littérature récente et à notre hypothèse théorique, nous cherchons ensuite à vérifier la présence d'une rupture structurelle dans la relation PIB-CO2 pour nos différentes spécifications. Nous avons donc procédé à une série de tests de rupture structurelle à date inconnue après les régressions portant sur l'ensemble de la période (1951-2013) pour vérifier la stabilité des coefficients des variables de PIB (et de prix du pétrole lorsque celui-ci est inclus comme variable de contrôle). Les tests sont les mêmes que ceux utilisés au chapitre 3 pour tester la stabilité de la relation PIB-énergie. Les tests *supremum* renvoient à une date précise. Les tests moyens et exponentiels permettent de tester la présence d'une rupture structurelle soit à une date précise, soit sur un intervalle donné. Comme au chapitre précédent, nous préférons tester ici un intervalle donné car il est bien évident que la transition d'un régime d'accumulation à un autre ne se fait pas à une date précise mais constitue un processus historique qui s'inscrit dans le temps long. Les tests moyens sont optimaux en cas de rupture structurelle de faible amplitude alors que les tests exponentiels sont optimaux en cas de rupture de forte amplitude.

Dans leur très grande majorité, les résultats présentés dans le tableau 4.4 page suivante confirment la présence d'une rupture structurelle dans la relation PIB-CO2, même si l'on prend en compte le prix du pétrole. Dans ce dernier cas cependant, les résultats concernant le CO2 en approche production sont moins évidents. En revanche, ceux concernant le CO2 en approche consommation ne laissent pas de doute sur la présence d'une rupture structurelle. Nous pouvons donc dire que ces résultats sont cohérents avec la littérature affirmant l'importance des ruptures structurelles dans la relation PIB-CO2. Ces résultats confortent en outre l'analyse selon laquelle il est utile d'historiciser cette relation en tenant compte des différents régimes d'accumulation et des configurations particulières de la production qui peuvent en découler. Enfin, d'un point de vue économétrique, ces résultats sont importants pour les tests de relation en niveau de l'approche ARDL : les valeurs critiques des tests proposés par PESARAN, SHIN et R. J. SMITH (2001) dans le cadre de l'approche ARDL ne sont pas valides en présence de rupture structurelle. Dès lors, pour les estimations portant sur l'ensemble de la période 1951-2013, nous complétons ces tests par ceux de GREGORY et HANSEN (1996a,b) qui permettent de tester la présence de co-intégration en cas de rupture structurelle.

Tests de symétrie des coefficients

Afin de spécifier le meilleur modèle à correction d'erreur, il nous faut savoir si l'hypothèse de symétrie des coefficients peut être rejetée. Nous appliquons donc un test de Wald de symétrie des coefficients sur les régressions asymétrie de long terme-asymétrie de court terme. L'objectif ici est de déterminer si les coefficients β_{pib}^{sup} et β_{pib}^{inf} d'une part et les coefficients de Δpib^{sup} et de Δpib^{inf} d'autre part, sont égaux entre eux. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5 page 115. Concernant la spécification avec le CO2 en approche production, le meilleur modèle est un modèle asymétrie de long terme-asymétrie de court terme pour l'ensemble de la période, pour le fordisme et pour le néolibéralisme. Lorsque nous incluons le prix du pétrole en variable de contrôle, le meilleur modèle pour l'ensemble de la période est un modèle à symétrie de long terme et asymétrie de court terme. Pour le fordisme, il s'agit d'un modèle

Spécification	Coef.	W_{suprem}	W_{moyen}	W_{exp}	L_{suprem}	L_{moyen}	L_{exp}
<i>co2prod</i>	β_i et α	1981***	1971-1986**	1971-1986***	1981***	1971-1986**	1971-1986***
	β_i	1981***	1971-1986**	1971-1986***	1981***	1971-1986**	1971-1986***
	α	1981***	1971-1986*	1971-1986***	1981***	1971-1986*	1971-1986***
<i>co2prod + oil</i>	β_i et α	1981**	1971-1986	1971-1986**	1981**	1971-1986	1971-1986**
	β_i	1981	1971-1986	1971-1986	1981	1971-1986	1971-1986
	α	1981	1971-1986	1971-1986	1981	1971-1986	1971-1986
<i>co2combi</i>	β_i et α	1970**	1971-1986*	1971-1986**	1970*	1971-1986*	1971-1986**
	β_i	1981**	1971-1986**	1971-1986**	1981*	1971-1986**	1971-1986**
	α	1981**	1971-1986	1971-1986**	1981**	1971-1986*	1971-1986**
<i>co2combi + oil</i>	β_i et α	1997***	1971-1986**	1971-1986***	1981**	1971-1986**	1971-1986***
	β_i	1981***	1971-1986***	1971-1986***	1981**	1971-1986**	1971-1986***
	α	1981**	1971-1986	1971-1986**	1981**	1971-1986	1971-1986***

TABLEAU 4.4 – Tests de rupture structurelle à date inconnue. Nous appliquons des tests de Wald (W_i) et du maximum de vraisemblance (L_i). Les tests supremum indiquent la date où la probabilité de rupture structurelle est la plus élevée. Les tests moyen et exponentiel testent la probabilité qu'il y ait une rupture structurelle sur un intervalle donné. L'hypothèse nulle est celle de l'absence de rupture structurelle. * : rejet de H_0 à 10%; ** : rejet de H_0 à 5%; *** : rejet de H_0 à 1%; en italique : non rejet de H_0 . Les tests portent sur le coefficient de la constante pour tester une rupture en niveau (α), sur les coefficients des variables de PIB et du prix du pétrole (lorsque ce dernier est inclus comme variable de contrôle dans la régression) pour tester une rupture structurelle en pente (β_i) et sur tous ces coefficients pour tester une rupture en niveau et en pente (β_i et α).

asymétrie-asymétrie et pour le néolibéralisme il s'agit d'un modèle à asymétrie de long terme mais symétrie de court terme. Pour la spécification avec le CO2 en approche consommation, nous pouvons estimer un modèle asymétrie-asymétrie pour l'ensemble de la période et pour le néolibéralisme, et un modèle asymétrie de long terme et symétrie de court terme pour la période fordiste. Avec le prix du pétrole en variable de contrôle, nous restons sur un modèle asymétrie-asymétrie pour l'ensemble de la période mais le meilleur modèle pour le fordisme et le néolibéralisme est un modèle avec asymétrie de long terme mais symétrie de court terme. Les spécifications en terme de symétrie et d'asymétrie des coefficients sont résumées dans le tableau 4.6 page ci-contre.

Enfin, concernant la structure optimale des retards des variables dans les modèles estimés, l'algorithme *ardl* de Stata opère automatiquement sa sélection au moyen du critère d'information bayésien (BIC). Une difficulté s'est posée pour les modèles asymétrie-symétrie et symétrie-asymétrie, qui n'étaient pas directement estimables par l'algorithme *ardl*, ce dernier ne permettant pas une telle spécification. Dans ces cas-là, nous avons codé directement le modèle dans sa forme à correction d'erreur avec différentes structures de retards pour les variables en différence (en partant de $p = 4$) et l'on a ensuite ôté progressivement les termes retardés non significatifs en les comparant à chaque fois au moyen du critère BIC. Cette procédure n'est donc pas totalement rigoureuse car elle n'a pas permis de comparer l'ensemble des cas possibles de structure des retards. Toutefois, les modèles asymétrie-symétrie et symétrie-asymétrie présentés ici sont ceux qui minimisent le critère BIC dans les comparaisons que nous avons effectuées.

Spécification	Période	W_{l-t}	W_{c-t}
<i>co2prod</i>	1951-2013	3,03*	33,31***
	Fordisme	9,22***	7,44***
	Néolibéralisme	5,68**	5,46**
<i>co2prod + oil</i>	1951-2013	2	23,1***
	Fordisme	22,22***	3,4*
	Néolibéralisme	3,05*	2,42
<i>co2combi</i>	1951-2013	15,71***	22,64***
	Fordisme	10,03***	0,24
	Néolibéralisme	2,73*	2,69*
<i>co2combi + oil</i>	1951-2013	15,20***	16,15***
	Fordisme	12***	0,58
	Néolibéralisme	4,13**	2,56

TABLEAU 4.5 – Tests de Wald sur la symétrie des coefficients de long terme (W_{l-t}) et de court terme (W_{c-t}). L'hypothèse nulle est celle de la symétrie des coefficients. Significativité : 1% :***; 5% :**; 10% :*. L'hypothèse nulle est rejetée si la valeur est significative au moins au seuil de 10%.

Spécification	Période	Symétrie et asymétrie des coefficients
<i>co2prod</i>	1951-2013	Asymétries de long terme et de court terme
	Fordisme	
	Néolibéralisme	
<i>co2prod + oil</i>	1951-2013	Symétrie de long terme mais asymétrie de court terme
	Fordisme	Asymétries de long terme et de court terme
	Néolibéralisme	Asymétrie de long terme mais symétrie de court terme
<i>co2combi</i>	1951-2013	Asymétries de long terme et de court terme
	Fordisme	Asymétrie de long terme mais symétrie de court terme
	Néolibéralisme	Asymétries de long terme et de court terme
<i>co2combi + oil</i>	1951-2013	Asymétries de long terme et de court terme
	Fordisme	Asymétrie de long terme mais symétrie de court terme
	Néolibéralisme	Asymétrie de long terme mais symétrie de court terme

TABLEAU 4.6 – Récapitulatif des meilleurs modèles en termes de symétrie et d'asymétrie des coefficients.

4.4.2 Résultats des estimations

Dans les tableaux des résultats des estimations (4.7 à 4.18), les symboles correspondent aux tests suivants : F_{PSS} et t_{BDM} sont les tests de relation de long terme de PESARAN, SHIN et R. J. SMITH (2001) et de BANERJEE *et al.* (1998) (H_0 : absence de relation de long terme), G&H est le test de co-intégration en présence de rupture structurelle de GREGORY et HANSEN (1996a,b) dans ses quatre variantes (1 : niveau ; 2 : niveau et tendance ; 3 : niveau et pente ; 4 : niveau, pente et tendance ; H_0 : absence de co-intégration), χ_{acd}^2 est le test alternatif d'autocorrélation de Durbin (H_0 : pas d'autocorrélation)⁷, χ_{acbg}^2 est le test

7. Le test alternatif de Durbin est adapté lorsque la variable dépendante retardée figure parmi les variables explicatives : le test de Durbin-Watson est alors biaisé. Il permet en outre de détecter l'autocorrélation d'ordre p contrairement au test de Durbin-Watson qui ne permet que de tester l'autocorrélation d'ordre 1.

d'autocorrélation de Breusch-Godfrey (H_0 : pas d'autocorrélation), χ^2_{hetbp} est le test d'hétéroscédasticité de Breusch-Pagan (H_0 : pas d'hétéroscédasticité) et F_{rr} est le test de forme fonctionnelle Ramsey's Reset (H_0 : pas de biais de variable omise). Nous n'avons pas appliqué de test d'endogénéité car nous avons considéré ce problème résolu théoriquement et logiquement : la production et la consommation induisent les émissions de CO₂ et non l'inverse, il apparaît dès lors illogique que le PIB soit corrélé avec le terme d'erreur expliquant la variance des émissions indépendante du PIB. En outre, comme le PIB est retardé, il ne peut pas dépendre du terme d'erreur en t . Concernant le prix du pétrole, son endogénéité aurait supposé que la France puisse à elle seule l'influencer, ce qui n'apparaît guère vraisemblable. Enfin, l'estimateur ARDL est robuste à la présence de régresseurs endogènes (PESARAN et SHIN, 1999).

CO₂ en approche production

Nous estimons d'abord les modèles portant sur la relation entre les émissions de CO₂ en approche production et le PIB sans variable de contrôle. Les résultats figurent dans le tableau 4.7 page suivante, les tests de co-intégration dans le tableau 4.8 page 118 et les tests de diagnostic dans le tableau 4.9 page 118. Nous observons que le terme d'ajustement est toujours négatif et significatif pour les trois périodes. Comme il a été expliqué à la section 4.2, le terme d'ajustement doit se situer dans l'intervalle $[-1,0]$ et représente la vitesse de retour à l'équilibre de la variable expliquée lorsque celle-ci s'écarte de sa valeur d'équilibre. Plus la valeur tend vers -1 , plus la vitesse d'ajustement est élevée. Nous voyons que le retour à l'équilibre est sensiblement plus rapide dans le fordisme que dans le néolibéralisme et sur l'ensemble de la période. Les tests de relation de long terme en niveau sont concluants pour le fordisme et le néolibéralisme mais pas pour l'ensemble de la période 1951-2013. Étant donné les limites de ces tests en présence de rupture structurelle, nous nous fions davantage aux résultats donnés par le test de Gregory et Hansen. Ceux-ci ne permettent pas de trancher de manière univoque mais donnent toutefois des indications en faveur de la présence de co-intégration sur l'ensemble de la période. Par ailleurs, les dates de rupture structurelle renvoyées par G&H sont plutôt cohérentes avec celles obtenues par les tests de rupture structurelle. Sur l'ensemble de la période, seule une croissance du PIB supérieure à la croissance de long terme produit un effet sur les émissions de CO₂ qui est positif et significatif à court terme et à long terme. Toutefois, le test de *Ramsey's Reset* indique un problème de forme fonctionnelle qui rend problématique l'interprétation des résultats car ceux-ci peuvent dès lors découler d'un biais de variable omise. Conformément à notre postulat théorique, les résultats sont beaucoup plus significatifs dès lors que l'on distingue entre les deux régimes d'accumulation. Les tests de relation de long terme sont très significatifs et comme les variables sont $I(1)$, nous pouvons en conclure la présence de co-intégration entre CO₂ et PIB dans chacun des deux régimes d'accumulation. Dans le fordisme, une augmentation du PIB supérieure à la moyenne a un effet positif et significatif à long terme. À court terme, la croissance supérieure à sa moyenne historique a un effet positif sur plusieurs années puisque l'on observe un effet significatif jusqu'à un retard de trois ans. Une augmentation du PIB inférieure à la moyenne a un effet négatif significatif à long terme. À court terme cependant l'effet est positif.

Dans le néolibéralisme, cette ambiguïté entre court et long termes disparaît. Les augmentations du PIB inférieures à leur moyenne historique ont un effet clairement négatif : les dynamiques de court et

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Variable	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
$co2prod_{t-1}$	-0,143**	0,049	-0,72***	0,001	-0,402***	0
pi_{t-1}^{sup}	0,071	0,172	0,575***	0	0,382**	0,048
pi_{t-1}^{inf}	-0,084	0,427	-1,185**	0,012	-0,361**	0,016
$\Delta co2prod_{t-1}$	-0,151	0,191	-0,251	0,155	—	—
Δpi_{t-1}^{sup}	1,633***	0	2,711***	0	0,382**	0,048
Δpi_{t-1}^{sup}	—	—	0,869**	0,049	—	—
Δpi_{t-2}^{sup}	—	—	0,512	0,107	—	—
Δpi_{t-3}^{sup}	—	—	0,735**	0,027	—	—
Δpi_{t-1}^{inf}	-0,084	0,427	2,382**	0,031	-0,361**	0,016
Const.	1,75*	0,051	8,833***	0,001	4,75***	0
β_{pi}^{sup}	0,49***	0,003	0,788***	0	0,947**	0,049
β_{pi}^{inf}	-0,586	0,243	-1,623*	0,051	-0,894***	0,002
$\overline{R^2}$	0,45	—	0,76	—	R^2 0,43	—

TABLEAU 4.7 – Résultats de la régression avec le CO2 en approche production. Lorsque la régression est corrigée de l'hétéroscédasticité, c'est le coefficient de détermination R^2 non ajusté pour le nombre de variables explicatives qui est fourni. Pour les régressions n'ayant pas nécessité de correction, il s'agit du R^2 ajusté. Ce dernier permet de mesurer si l'ajout d'une variable explicative supplémentaire améliore vraiment le pouvoir de prédiction du modèle (c'est-à-dire davantage que ce qui serait dû au hasard) tandis que le R^2 augmente mécaniquement avec l'ajout d'une variable supplémentaire sans que cela dise quoi que ce soit du réel pouvoir de prédiction du modèle. Le R^2 est toujours légèrement inférieur au R^2 .

de long termes sont cohérentes entre elles. Il en va de même pour la croissance du PIB supérieure à sa moyenne historique : les effets sont positifs et significatifs dans les deux cas. Pour le fordisme et le néolibéralisme, les tests de diagnostics indiquent que les régressions sont statistiquement correctes.

CO2 en approche production avec le prix du pétrole en variable de contrôle

Afin d'étayer la robustesse de ces résultats, nous ré-estimons le modèle en ajoutant le prix du pétrole comme variable de contrôle. Les résultats de la régression sont présentés dans le tableau 4.10 page 119 tandis que ceux des tests de co-intégration et de diagnostic figurent dans les tableaux 4.11 page 120 et 4.12 page 120. La relation de co-intégration entre les variables est incertaine pour l'ensemble de la période 1951-2013. Seuls les tests de G&H en niveau et tendance et en niveau, tendance et pente, donnent des indications en faveur d'une telle relation. En revanche, les tests de relation de long terme en niveau sont concluants pour les deux régimes d'accumulation fordiste et néolibéral. Nous voyons également que les tests de diagnostics ne présentent aucun problème particulier pour les trois régressions. En particulier, nous notons que le problème de spécification du modèle détecté par le test de Ramsey's Reset pour la régression sur 1951-2013 présentée dans le tableau 4.9 page suivante est résolu. Comme dans les résultats du tableau 4.7, le terme d'ajustement est toujours négatif et significatif. Nous remarquons une valeur très élevée pour le fordisme. Cela confirme et amplifie les résultats précédents concernant la différence

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
F_{PSS}	2,733	4,26 (10%)	9,922***	7,87 (1%)	13,29***	7,61 (1%)
t_{BDM}	-2,019	-3,21 (10%)	-4,007**	-3,53 (5%)	-4,42***	-4,10 (1%)
G&H (1)	ADF : -4,76*	-4,69 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -4,80*	-4,69 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -34,19	-42,49 (10%)	—	—	—	—
G&H (2)	ADF : -5,24*	-5,03 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -5,33**	-5,29 (5%)	—	—	—	—
	Z_a : -39,64	-48,94 (10%)	—	—	—	—
G&H (3)	ADF : -5	-5,23 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -5,04	-5,23 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -36,78	-52,85 (10%)	—	—	—	—
G&H (4)	ADF : -6,87***	-6,45 (1%)	—	—	—	—
	Z_t : -6,97***	-6,45 (1%)	—	—	—	—
	Z_a : -55,33	-63,10 (10%)	—	—	—	—

TABLEAU 4.8 – Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche production. F_{PSS} 1951-2013, fordisme et néolibéralisme : valeurs critiques de Narayan (2005) pour $N = 60$, $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 10%, pour $N = 30$, $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 1% et pour $N = 35$, $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 1% respectivement. t_{BDM} 1951-2013 et fordisme : valeurs critiques pour $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 10%, pour $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 5% et pour $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 1%.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	P-value	Stat.	P-value	Stat.	P-value
χ^2_{acd}	0,628	0,427	0,107	0,744	1,55	0,212
χ^2_{acbg}	0,704	0,402	0,184	0,667	—	—
χ^2_{hetbp}	2,3	0,129	0,01	0,911	Corrigée de l'hétéroscédasticité	
F_{rr}	2,86**	0,045	0,61	0,623	0,76	0,53

TABLEAU 4.9 – Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche production. Le test de Breusch-Godfrey pour l'autocorrélation n'est pas applicable lorsque la régression est corrigée de l'hétéroscédasticité.

entre le fordisme et le néolibéralisme pour le retour à leur trajectoire d'équilibre des émissions de CO2. Toutefois, une valeur supérieure à -1 interroge parce qu'elle signifie un surajustement et potentiellement un comportement explosif. Dans la mesure où l'on a inclut le prix du pétrole, nous pouvons interpréter cette valeur comme le produit des chocs pétroliers : l'effet des fortes variations du prix du pétrole implique un ajustement très fort pour que les variables co-intégrées retrouvent leur relation d'équilibre. Nous remarquons toutefois que l'effet du prix du pétrole ne se retrouve pas dans les coefficients associés pour la période fordiste, qui sont significatifs à long terme et à court terme (avec deux périodes de retard) mais qui sont tous nettement inférieurs à ceux des variables de PIB. Pour le fordisme, les résultats sont cohérents avec la régression sans le prix du pétrole concernant les effets de la croissance supérieure à sa moyenne historique : l'effet de long terme est quasiment identique et l'effet de court terme est de même signe, même si ce dernier est d'une magnitude inférieure. Pour ce dernier, les effets retardés disparaissent

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Variable	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
$co2prod_{t-1}$	-0,064**	0,034	-1,51***	0	-0,289**	0,042
pib_{t-1}^{sup}	—	—	1,201***	0	0,218	0,37
pib_{t-1}^{inf}	—	—	-0,946*	0,051	-0,125	0,54
pib_{t-1}	0,037***	0,01	—	—	—	—
oil_{t-1}	-0,016	0,153	-0,086***	0,001	-0,012	0,446
$\Delta co2prod_{t-1}$	-0,159	0,155	0,745***	0,003	-0,374**	0,033
$\Delta co2prod_{t-2}$	—	—	0,455***	0,003	—	—
Δpib^{sup}	1,623***	0	1,201***	0	—	—
Δpib^{inf}	0,446	0,426	0,845	0,369	—	—
Δpib_{t-1}^{inf}	—	—	2,651**	0,025	—	—
Δpib_{t-1}	—	—	—	—	0,87*	0,071
Δoil	0,049**	0,018	0,011	0,615	-0,015	0,574
Δoil_{t-1}	—	—	0,024	0,496	—	—
Δoil_{t-2}	—	—	0,157***	0,001	—	—
Const.	0,310	0,342	18,672	0	3,47**	0,039
β_{pib}^{sup}	—	—	0,796***	0	0,754	0,292
β_{pib}^{inf}	—	—	-0,621**	0,048	-0,430	0,438
β_{pib}	0,60**	0,025	—	—	—	—
β_{oil}	-0,274	0,26	-0,057***	0	-0,044	0,54
$\overline{R^2}$	0,48	—	0,83	—	0,42	—

TABLEAU 4.10 – Résultats pour la régression avec CO2 en approche production et le prix du pétrole comme variable de contrôle. Pour l'ensemble de la période 1951-2013, il s'agit d'un modèle avec asymétrie de court terme et symétrie de long terme. Pour le régime néolibéral, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

également. Pour la croissance inférieure à sa moyenne historique, nous retrouvons les effets de court terme mais avec un retard d'une période. Ceux de long terme sont nettement atténués par rapport à la régression sans le prix du pétrole : nous pouvons en déduire que les effets négatifs de long terme sur les émissions de CO2 qui ressortent de la régression précédente capturent pour une part les effets de la hausse du prix des énergies fossiles, même si le coefficient de long terme du prix du pétrole est faible. Nous remarquons toutefois que la constante a un coefficient particulièrement élevé, bien supérieur à celui de toutes les autres régressions. Cela peut indiquer d'importantes sources résiduelles de CO2 hors PIB.

Pour l'ensemble de la période, l'effet de long terme d'une augmentation du PIB supérieure à la croissance historique est positif et significatif. À court terme, la croissance du PIB supérieure à la moyenne a un effet positif. Le prix du pétrole est positif et significatif à court terme, ce qui est contre-intuitif bien que le coefficient soit faible : nous nous attendrions plutôt à ce que prix du pétrole et émissions de CO2 aient une relation décroissante dans la mesure où la hausse du premier serait de nature à diminuer l'usage des énergies fossiles. Son effet de long terme est non significatif.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
F_{PSS}	3,40	4,26 (10%)	10,439***	7,06 (1%)	6,02**	4,91 (5%)
t_{BDM}	-2,17	-3,21 (10%)	-6,39***	-4,37	-2,15	-3,46 (5%)
G&H (1)	ADF : -3,61	-4,69 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -3,69	-4,69 (10%)	—	—	—	—
G&H (2)	Z_a : -22,91	-42,49(10%)	—	—	—	—
	ADF : -5,71**	-5,29 (5%)	—	—	—	—
G&H (3)	Z_t : -5,80*** (1981)	-5,80 (1%)	—	—	—	—
	Z_a : -44,20 (1981)	-48,94 (10%)	—	—	—	—
G&H (4)	ADF : -5,01	-5,23 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -5,05 (1981)	-5,23 (10%)	—	—	—	—
G&H (5)	Z_a : -37,95 (1981)	-52,85 (10%)	—	—	—	—
	ADF : -7,04***	-6,45 (1%)	—	—	—	—
G&H (6)	Z_t : -7,21***	-6,45 (1%)	—	—	—	—
	Z_a : -55,94	-63,10 (10%)	—	—	—	—

TABLEAU 4.11 – Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche production et le prix du pétrole en variable de contrôle. F_{PSS} 1951-2013, fordisme et néolibéralisme : valeurs critiques de Narayan pour $N = 61$, $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 10%, pour $N = 30$, $k = 3$, $I(1)$ au seuil de 1% et pour $N = 35$, $k = 3$ et $I(1)$ à 5%. t_{BDM} 1950-2013, fordisme et néolibéralisme : valeur critique pour $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 10%, pour $k = 3$ et $I(1)$ au seuil de 1% et pour $k = 3$, $I(1)$ au seuil de 10%. Pour l'ensemble de la période 1951-2013, il s'agit d'un modèle avec asymétrie de court terme et symétrie de long terme. Pour le régime néolibéral, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
χ^2_{acd}	0,410	0,522	1,058	0,304	0,043	0,836
χ^2_{acbg}	0,477	0,49	1,956	0,162	0,059	0,807
χ^2_{hetbp}	0,02	0,893	2,54	0,111	2,52	0,111
F_{rr}	0,41	0,75	0,18	0,91	0,11	0,955

TABLEAU 4.12 – Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche production et le prix du pétrole en variable de contrôle. Pour l'ensemble de la période 1951-2013, il s'agit d'un modèle avec asymétrie de court terme et symétrie de long terme. Pour le régime néolibéral, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Concernant le néolibéralisme, les résultats semblent nettement moins robustes à la présence du prix du pétrole : en effet, hors terme à correction d'erreur et constante, seuls les coefficients de court terme de la croissance des émissions de CO2 et de la croissance du PIB retardées d'une période sont significatifs, le premier étant négatif et le second positif.

CO2 en approche consommation

Afin de tenir compte de la globalisation des chaînes de production et donc des chaînes d'émission de gaz à effet de serre, nous estimons également la relation PIB-CO2 avec le CO2 en approche consommation. Les résultats sont présentés dans les tableaux 4.13 à 4.15. Le coefficient du terme d'ajustement est

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Variable	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
$co2combi_{t-1}$	-0,217***	0,008	-0,379**	0,047	-0,473***	0
pib_{t-1}^{sup}	0,198***	0,009	0,445**	0,021	0,560**	0,043
pib_{t-1}^{inf}	-0,073	0,256	-1,279**	0,011	-0,126	0,445
Δpib^{sup}	1,52***	0	—	—	0,560**	0,043
Δpib^{inf}	-0,074	0,256	—	—	-0,126	0,445
Δpib	—	—	2,78***	0,000	—	—
Const.	2,637***	0,009	4,578*	0,051	5,529***	0,001
β_{sup}^{pib}	0,907***	0	1,173***	0,000	1,186**	0,038
β_{inf}^{pib}	-0,337	0,175	-3,366**	0,025	-0,268	0,448
R^2	0,39	—	0,62	—	$\overline{R^2}$	0,32

TABLEAU 4.13 – Résultats de la régression avec le CO2 en approche consommation. Pour le régime fordiste, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
F_{PSS}	2,73	4,26 (10%)	3,57	4,47 (10%)	5,87**	5,33 (5%)
t_{BDM}	-2,73	-3,21 (10%)	-2,10	-3,21 (10%)	-4,020**	-3,53 (5%)
G&H (1)	ADF : -4,16	-4,69 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -4,28	-4,69 (10%)	—	—	—	—
G&H (2)	Z_a : -27,72	-42,49 (10%)	—	—	—	—
	ADF : -4,28	-5,03 (10%)	—	—	—	—
G&H (3)	Z_t : -4,32	-5,03 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -27,96	-48,94 (10%)	—	—	—	—
G&H (4)	ADF : -4,45	-5,23 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -4,73	-5,23 (10%)	—	—	—	—
G&H (5)	Z_a : -31,98	-52,85 (10%)	—	—	—	—
	ADF : -5,10	-5,72 (10%)	—	—	—	—
G&H (6)	Z_t : -5,14	-5,72 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -37,68	-63,10 (10%)	—	—	—	—

TABLEAU 4.14 – Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche consommation. F_{PSS} 1951-2013, fordisme, néolibéralisme : valeurs critiques de Narayan pour $N = 60$, $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 10%, pour $N = 30$, $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 10% et $N = 35$, $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 5%. t_{BDM} pour 1950-2013, fordisme et néolibéralisme : valeur critique pour $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 10%, pour $k = 2$, $I(1)$ au seuil de 10% et pour $k = 2$ et $I(1)$ au seuil de 5%. Pour le régime fordiste, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

toujours négatif et significatif pour la totalité de la période et les deux sous-périodes, mais les tests de co-intégration pour 1951-2013 et le fordisme ne permettent pas de rejeter l'absence de co-intégration et de relation de long terme en niveau. Ce n'est guère surprenant dans la mesure où l'approche consommation des émissions de CO2 apparaît surtout pertinente pour la période néolibérale qui correspond à la période de mondialisation. Au-delà des limites statistiques qui se posent donc quant à la relation de co-intégration

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
χ^2_{acd}	0,023	0,877	0,499	0,470	0,055	0,813
χ^2_{acbg}	—	—	—	—	0,065	0,798
χ^2_{hetbp}	Corrigée de l'hétéroscédasticité		Corrigée de l'hétéroscédasticité		0,44	0,506
F_{rr}	0,58	0,633	0,97	0,424	0,37	0,776

TABLEAU 4.15 – Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche consommation. Pour le régime fordiste, il s'agit d'un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

pour la totalité de la période et le fordisme, c'est sur le régime d'accumulation néolibéral qu'il nous paraît pertinent de concentrer l'interprétation de ces résultats. Les tests de diagnostics ne présentent pas de problème particulier pour ce régime avec cette spécification. La relation de co-intégration observée dans le régime néolibéral est cohérente avec la globalisation des chaînes d'émissions. Nous observons des ordres de grandeur pour les coefficients qui sont cohérents avec ceux des spécifications en termes de CO2 en approche production. De la même façon qu'en approche production avec prix du pétrole, nous notons que les hausses du PIB inférieur à leur moyenne historique sont non significatives, tant à long terme qu'à court terme.

CO2 en approche consommation avec le prix du pétrole en variable de contrôle

Les résultats avec le prix du pétrole en variable de contrôle sont présentés dans les tableaux 4.16 à 4.18. Ils confirment largement les résultats obtenus pour la spécification précédente. Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse d'absence de co-intégration pour l'ensemble de la période ainsi que pour le régime fordiste. Concernant le régime néolibéral, les coefficients obtenus et leur significativité sont similaires à la régression du tableau 4.13 page précédente, en particulier pour les effets de long terme d'une croissance du PIB supérieure à sa moyenne historique. Toutefois, une différence notable concerne les effets à court terme d'une augmentation du PIB. Ceux-ci sont symétriques lorsque nous incluons le prix du pétrole dans la régression, le meilleur modèle étant alors un modèle asymétrie de long terme - symétrie de court terme. Néanmoins, ils sont non significatifs. Les effets du prix du pétrole sont significatifs à long terme mais faibles. En termes de propriété statistique, nous observons un très léger problème d'autocorrélation détectée par le test de Breusch-Godfrey. Toutefois, celle-ci n'est valide qu'à un seuil de 10% et n'est pas détectée par le test alternatif de Durbin. En outre, corriger cette possible autocorrélation en intégrant un deuxième retard de la variable de CO2 parmi les variables explicatives en niveau indique que les résultats ne sont guère affectés.

Tests de normalité des résidus

Enfin, afin de compléter les tests de diagnostics pour toutes les régressions présentées précédemment, nous vérifions que les résidus de chacune d'elles respectent la condition de normalité (tableau 4.19).

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Variable	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value	Coeff.	P-value
$co2combi_{t-1}$	-0,186**	0,017	-0,390**	0,026	-0,462***	0,001
pib_{t-1}^{sup}	0,188***	0,007	0,499***	0,01	0,52*	0,066
pib_{t-1}^{inf}	-0,062	0,338	-1,640***	0,007	-0,06	0,665
oil_{t-1}	-0,022	0,111	-0,030	0,168	-0,034**	0,022
Δpib^{sup}	1,301***	0	—	—	—	—
Δpib^{inf}	-0,062	0,338	—	—	—	—
Δpib	—	—	2,443***	0	0,162	0,79
Δoil_{t-1}	-0,022	0,111	-0,026	0,248	-0,031	0,363
Const.	2,321**	0,014	4,807**	0,029	5,564***	0,001
β_{sup}^{pib}	1,011***	0	1,277***	0	1,143**	0,039
β_{inf}^{pib}	-0,335	0,244	-4,202***	0,001	-0,150	0,657
β^{oil}	-0,116	0,218	-0,079*	0,082	-0,076**	0,038
R^2	0,42	—	0,64	—	$\overline{R^2}$	0,40

TABLEAU 4.16 – Résultats de la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle. Pour le fordisme et le néolibéralisme, le modèle estimé est un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
F_{PSS}	2,86	3,92 (10%)	3,1	4,15 (10%)	6**	4,91 (5%)
t_{BDM}	-2,47	-3,46 (10%)	-2,38	-3,46 (10%)	-3,81	-3,78 (5%)
G&H (1)	ADF : -4,24	-5,02 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -4,36	-5,02 (10%)	—	—	—	—
G&H (2)	Z_a : -28,17	-48,65 (10%)	—	—	—	—
	ADF : -4,28	-5,33 (10%)	—	—	—	—
G&H (3)	Z_t : -4,34	-5,33 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -27,97	-54,94 (10%)	—	—	—	—
G&H (4)	ADF : -4,73	-5,75 (10%)	—	—	—	—
	Z_t : -4,77	-5,75 (10%)	—	—	—	—
G&H (5)	Z_a : -34,48	-63,42 (10%)	—	—	—	—
	ADF : -5,24	-6,16 (10%)	—	—	—	—
G&H (6)	Z_t : -5,28	6,16 (10%)	—	—	—	—
	Z_a : -39,16	-72,75 (10%)	—	—	—	—

TABLEAU 4.17 – Tests de co-intégration pour la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle. F_{PSS} 1951-2013, fordisme et néolibéralisme : valeurs critiques de Narayan pour $N = 60$, $k = 3$ et $I(1)$ au seuil de 10%, pour $N = 30$, $k = 3$ et $I(1)$ au seuil de 10% et pour $N = 35$, $k = 3$ et $I(1)$ à 5%. t_{BDM} : valeurs critique pour $k = 3$, $I(1)$ au seuil de 10%, pour $k = 3$, $I(1)$ au seuil de 10% et pour $k = 3$, $I(1)$ au seuil de 5%. Pour le fordisme et le néolibéralisme, le modèle estimé est un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Deux légères incertitudes subsistent : le test de Shapiro-Wilk rejette la distribution normale des résidus au seuil de 10% pour la spécification avec le CO2 en approche production sur la période fordiste.

Ensemble de la période (1951-2013)			Fordisme (1951-1980)		Néolibéralisme (1981-2013)	
Test	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.	Stat.	Valeur crit.
χ_{acd}^2	0,351	0,552	0,523	0,469	2,434	0,119
χ_{acbg}^2	—	—	—	—	2,927*	0,086
χ_{hetbp}^2	Corrigée de l'hétéroscédasticité		Corrigée de l'hétéroscédasticité		1,69	0,192
F_{rr}	0,65	0,586	0,87	0,474	0,91	0,44

TABLEAU 4.18 – Tests de diagnostic pour la régression avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole en variable de contrôle. Pour le fordisme et le néolibéralisme, le modèle estimé est un modèle avec symétrie de court terme mais asymétrie de long terme.

Spécification	Période	Shapiro-Wilk	Skewness et kurtosis
<i>co2prod</i>	1951-2013	0,778	0,995
	Fordisme	0,063	0,386
	Néolibéralisme	0,830	0,837
<i>co2prod + oil</i>	1951-2013	0,204	0,79
	Fordisme	0,295	0,406
	Néolibéralisme	0,758	0,512
<i>co2combi</i>	1951-2013	0,925	0,493
	Fordisme	0,374	0,542
	Néolibéralisme	0,231	0,10
<i>co2combi + oil</i>	1951-2013	0,957	0,605
	Fordisme	0,312	0,945
	Néolibéralisme	0,076	0,107

TABLEAU 4.19 – Tests de normalité des résidus de Shapiro-Wilk et de la skewness et de la kurtosis. L'hypothèse nulle dans les deux cas est celle d'une distribution normale des résidus. Nous rejetons H0 si la *p-value* est inférieure ou égale à 0,1.

Cependant, le test portant sur la *skewness* et la *kurtosis* ne permet pas de rejeter l'hypothèse de normalité des résidus pour cette régression. Enfin, la régression qui porte sur la spécification avec le CO2 en approche consommation et le prix du pétrole pour la période néolibérale semble fragile concernant la distribution normale des résidus : le test de Shapiro-Wilk permet de rejeter cette hypothèse à 10% au contraire du test de *skewness* et *kurtosis* qui ne permet pas de la rejeter, avec toutefois peu de marge par rapport au seuil conventionnel des 10%. Ces résultats sont également importants pour la robustesse du test d'hétéroscédasticité de Breusch-Pagan qui fait l'hypothèse d'une distribution normale des résidus.

4.4.3 Illustration graphique de l'ajustement : trajectoires des multiplicateurs dynamiques

Il est également possible de présenter les résultats graphiquement en dépeignant le processus d'ajustement des émissions de CO2 après un choc sur le PIB à l'aide des multiplicateurs dynamiques⁸. Nous calculons ces multiplicateurs sur 35 périodes, soit un laps de temps cohérent avec la durée historique

8. Calculés à l'aide du logiciel Gauss avec le programme codé par Minjoo Kim.

des régimes d'accumulation étudiés. C'est également une durée suffisante pour observer dans la majeure partie des cas une convergence vers la valeur des multiplicateurs de long terme présentés dans les tableaux des régressions. La courbe de différence indique si l'asymétrie est positive ou négative à chaque point de temps (DELATTE et LÓPEZ-VILLAVICENCIO, 2012). La figure 4.3 représente la dynamique des multiplicateurs pour la spécification avec le CO2 en approche production. À court terme, nous

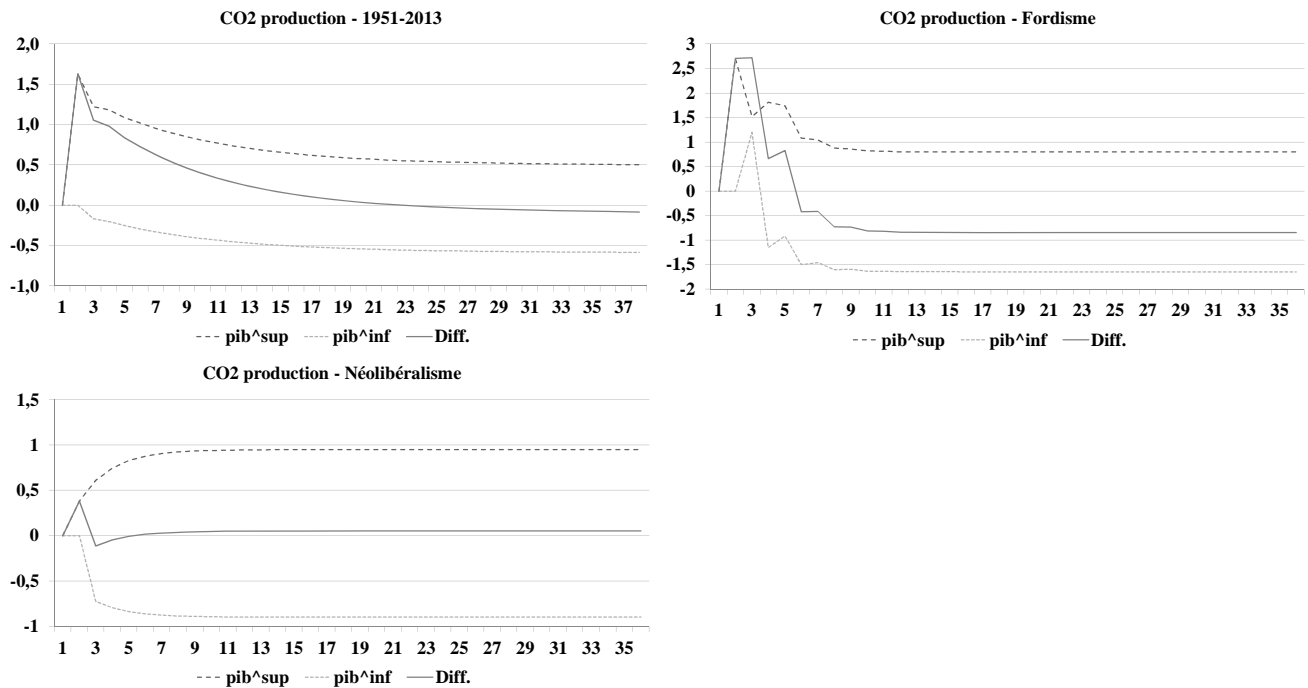


FIGURE 4.3 – Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour 1951-2013, pour le régime d'accumulation fordiste et pour le régime d'accumulation néolibéral pour la spécification avec le CO2 en approche production.

observons pour l'ensemble de la période que les émissions de CO2 réagissent fortement à une hausse du PIB supérieure à la moyenne historique mais bien plus faiblement à une hausse inférieure à la moyenne. Pour le régime d'accumulation fordiste, conformément aux résultats des régressions, nous voyons que les émissions augmentent sensiblement à court terme quelle que soit la hausse du PIB, mais à long terme l'effet d'une hausse du PIB inférieure à la croissance historique devient négatif. Concernant le régime d'accumulation néolibéral, les émissions réagissent fortement à une hausse inférieure à la moyenne, tandis que l'effet de court terme d'une hausse supérieure à la moyenne historique est moindre. Nous pouvons aussi voir que l'asymétrie de long terme est assez faible même si la symétrie de long terme est rejetée au seuil de 5% par le test de Wald (tableau 4.5 page 115).

Nous observons que les temps de convergence des multiplicateurs dynamiques vers la valeur des multiplicateurs de long terme sont assez longs, de l'ordre de 7 à 20 ans environ selon la période étudiée : environ 20 ans si nous étudions l'ensemble de la période, et entre 7 et 10 ans si l'on étudie les deux régimes d'accumulation séparément. Cela tend à confirmer que l'historicisation de la relation PIB-CO2 renvoie une image autre que si l'on l'étudie sans tenir compte des changements historiques dans les

modalités d'accumulation du capital. L'inclusion du prix du pétrole comme variable de contrôle modifie quelque peu l'interprétation graphique des résultats (figure 4.4). Pour l'ensemble de la période, il n'y a

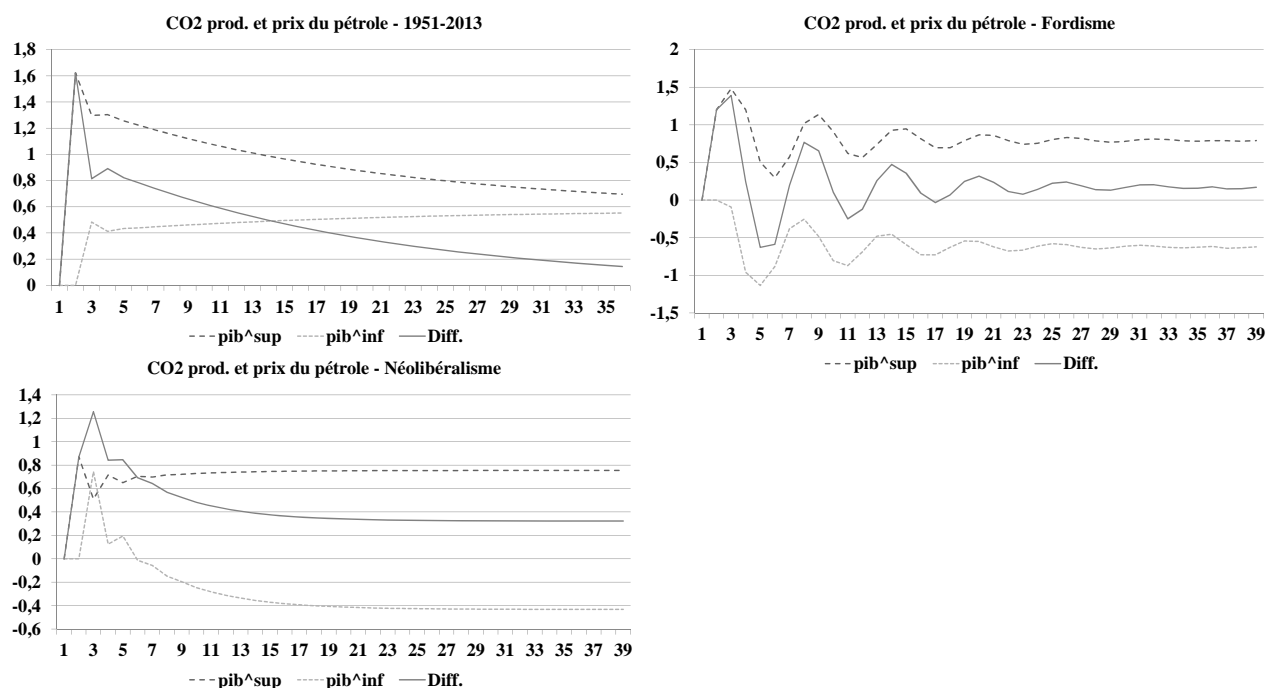


FIGURE 4.4 – Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour 1951-2013 et pour les deux régimes d'accumulation pour la spécification CO2 en approche production avec le prix du pétrole en variable de contrôle.

d'asymétrie qu'à court terme et les effets sont positifs, en particulier pour une hausse du PIB supérieure à la croissance de long terme. Les multiplicateurs convergent ensuite l'un vers l'autre conformément à la symétrie de long terme. Pour le fordisme, l'effet d'une hausse du PIB inférieure à la moyenne historique n'est jamais positif contrairement aux résultats précédents, tandis que l'effet d'une hausse du PIB supérieure à la moyenne est plus cohérente avec celui observé pour la régression précédente, même s'il l'est d'une magnitude inférieure. Concernant le régime d'accumulation néolibéral qui présente une symétrie de court terme et une asymétrie de long terme, nous voyons que la croissance du PIB augmente sensiblement les émissions de CO2 à court terme même si cela est moins que proportionnel à la croissance du PIB. Ensuite, l'effet d'une hausse du PIB supérieure à sa moyenne historique est similaire à l'effet de court terme tandis que l'effet d'une hausse du PIB inférieure à la croissance de long terme devient négatif au bout de six ans.

Le temps de convergence paraît extrêmement long si nous raisonnons sur l'ensemble de la période 1951-2013 puisque, au terme de trente-cinq ans, la convergence vers le nouvel équilibre semble tout juste se dessiner. Pour le régime d'accumulation fordiste, les multiplicateurs dynamiques oscillent autour de leur valeur de long terme et convergent à partir d'une grosse vingtaine d'années, soit un délai significativement plus long que pour la régression sans le prix du pétrole. Enfin, concernant le

néolibéralisme, l'ajustement de long terme des émissions de CO₂ à une augmentation du PIB supérieure à la moyenne historique se fait dans un laps de temps similaire à la spécification précédente, soit une dizaine d'années. L'ajustement à une hausse du PIB inférieure à la moyenne historique se fait, lui, sur un laps de temps plus long, une vingtaine d'années, soit le double de la période d'ajustement observée pour la spécification précédente. Une interprétation possible serait que lorsque l'on ne contrôle pas pour le prix du pétrole, l'ajustement aux variations du PIB capture également l'ajustement au choc sur le prix du pétrole — qui serait dès lors un ajustement à plus court terme que l'ajustement au choc sur la production. Une fois que l'on contrôle pour le prix du pétrole, l'ajustement observé au choc du PIB est purgé de l'effet-prix et révèle alors une dynamique d'ajustement beaucoup plus lente. En l'état actuel de ce travail, il n'est possible que de conjecturer une éventuelle causalité : cela peut refléter un effet de composition du PIB affectant les émissions de CO₂ sur le long terme au fur et à mesure des transformations structurelles du tissu productif de l'économie et donc des modalités d'accumulation du capital⁹.

Relativement aux multiplicateurs de la spécification avec le CO₂ en approche consommation, nous ne présentons que ceux concernant la période néolibérale dans la mesure où seules les régressions pour cette période-là faisaient sens avec cette spécification (figure 4.5 page suivante). Pour la spécification sans le prix du pétrole, les résultats sont assez cohérents avec la spécification en termes de CO₂ en approche production, mais les ajustements de court et long termes se font selon des magnitudes supérieures pour une croissance du PIB supérieure à sa moyenne historique et inférieures pour une croissance du PIB inférieure à sa croissance historique. Ces résultats sont confirmés lorsque nous incluons le prix du pétrole en variable de contrôle. Les trajectoires des multiplicateurs dynamiques sont sensiblement les mêmes, ainsi que les magnitudes. Nous observons un bref et léger effet positif d'une hausse du PIB inférieure à la croissance historique à court terme, conformément à la spécification en CO₂ production, mais la magnitude de cet effet est ici bien moindre.

4.5 Discussion : mise en perspective et robustesse

Dans cette section nous mettons en perspective les résultats obtenus en esquisant quelques causalités possibles et nous examinons ensuite leur robustesse.

4.5.1 Absence de découplage et intérêt de la périodisation entre fordisme et néolibéralisme

Les résultats sont synthétisés dans les tableaux 4.20 page 132 et 4.21 page 133 qui récapitulent respectivement la nature (découplage absolu, découplage relatif ou absence de découplage) et le sens de la relation entre PIB et CO₂ (relation croissante ou relation décroissante). Pour le CO₂ en approche production, l'ajustement est plus rapide sous le fordisme que sous le néolibéralisme. Les effets de court terme sont également bien plus forts sous le fordisme que sous le néolibéralisme : pour le premier,

9. Dans l'optique d'une publication, il faudrait approfondir cette approche : détailler la relation PIB-CO₂ en désagrégant par la part des secteurs dans le PIB afin de capturer les évolutions historiques du tissu productif et quantifier l'effet de composition sur l'évolution des émissions.

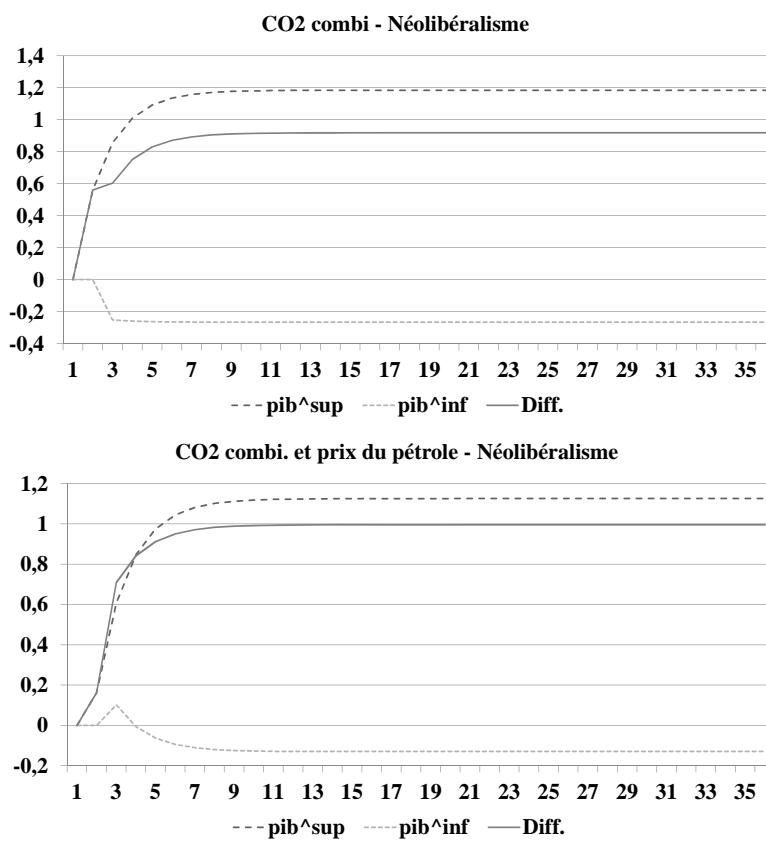


FIGURE 4.5 – Multiplicateurs dynamiques cumulatifs pour la spécification avec le CO2 en approche consommation sans et avec le prix du pétrole concernant le régime d'accumulation néolibéral.

nous assistons à un découplage relatif pour les effets retardés de la croissance supérieure à sa moyenne historique ; pour le second, le découplage relatif est plus prononcé mais il n'y a pas d'effet retardé. En revanche, la croissance inférieure à sa moyenne historique induit un découplage absolu à court terme ainsi qu'à long terme pour le régime néolibéral, alors que c'est seulement le cas à long terme pour le fordisme. L'effet de long terme de la croissance supérieure à sa moyenne historique est celui d'un découplage relatif pour les deux régimes et l'ordre de grandeur du coefficient est assez similaire. Les coefficients, dans l'ensemble sensiblement plus élevés pour la période fordiste que pour la période néolibérale, pourraient traduire deux choses : d'abord une composition du tissu productif plus dense en secteurs directement émetteurs de CO2, ensuite un taux de croissance moyen plus élevé ayant des effets d'entraînement plus importants sur les émissions. Toutefois, dans le régime fordiste, la discordance entre les signes des coefficients de court et de long termes pour la croissance inférieure à sa moyenne historique peut interloquer. Une piste d'explication pourrait être que la croissance inférieure à sa moyenne historique serait plutôt tirée par les activités à moindre gains de productivité, en particulier le secteur tertiaire qui est moins émetteur direct de CO2. Cela expliquerait l'effet négatif de long terme, traduisant les mutations

du tissu productif et la substitution entre les secteurs. À court terme, toutefois, une accélération de la croissance inférieure à la moyenne peut stimuler l'ensemble des secteurs de l'économie et pas seulement le secteur tertiaire : il en résulterait donc une hausse des émissions de CO₂. Creuser cette interprétation nécessitera de décomposer le PIB en fonction des secteurs d'activités pour quantifier précisément l'effet de composition. Pour expliquer l'effet de long terme de la croissance du PIB supérieure à sa moyenne historique qui est légèrement plus élevée dans le néolibéralisme que dans le fordisme, nous pouvons faire l'hypothèse que les forts taux de croissance étant rares dans le régime d'accumulation néolibéral, leur effet d'entraînement sur les émissions de CO₂ est plus important à long terme. Cela est confirmé par le terme d'ajustement du CO₂ qui est moins élevé dans le néolibéralisme, ce qui peut traduire un effet d'hystérèse : le CO₂ met plus longtemps à s'ajuster aux variations du PIB et réagit moins aux écarts de court terme.

Lorsque l'on inclut le prix du pétrole en variable de contrôle, l'ajustement est encore plus prononcé sous le fordisme que sous le néolibéralisme. Pour le premier, les résultats sont confirmés pour la croissance supérieure à sa moyenne historique ainsi qu'à court terme pour la croissance inférieure à sa moyenne historique. Pour cette dernière, ils sont en revanche sensiblement atténués à long terme même si l'on est toujours en présence d'un découplage absolu. L'effet-prix du pétrole est faible. Une interprétation possible est que l'effet-prix direct des chocs pétroliers sur les émissions de CO₂ est modeste, mais qu'il est important via la médiation du PIB¹⁰. Évidemment, une telle interprétation implique un certain degré de colinéarité entre variables de PIB et prix du pétrole, ce qui n'est guère surprenant. Toutefois, l'algorithme utilisé contrôle la présence de colinéarité et omet automatiquement les variables concernées en cas de colinéarité. Les résultats présentés ici sont donc robustes à ce problème¹¹. Pour le régime d'accumulation néolibéral, l'effet de court terme est celui d'un découplage relatif pour la croissance du PIB mais il est faible et les effets de long terme disparaissent, ce qui contredit les résultats de la régression sans le prix du pétrole. Alors que PIB et CO₂ sont fortement liés pendant la période fordiste, cette absence de significativité peut indiquer un découplage relatif de long terme entre PIB et émissions de CO₂ pendant la période néolibérale. Cela pourrait traduire le poids croissant de la tertiarisation de l'économie française ainsi que de la délocalisation des industries lourdes fortement émettrices de gaz à effet de serre. Toutefois, le test de co-intégration est largement significatif mais l'ajustement est lent. Cela interroge malgré tout la plausibilité d'une courbe de Kuznets environnementale pour la France en matière de CO₂ : l'absence d'effet positif à long terme semble plutôt bon signe mais l'absence d'effet négatif dément l'existence d'un découplage absolu entre production et émissions. Nous semblons donc ici hors d'un scénario de type CKE : ainsi, dans la spécification sans prix du pétrole, les effets dépendent-ils du rythme de la croissance du PIB et ne sont pas univoques alors que dans la spécification avec prix du pétrole il n'y a plus d'effet négatif à court et à long termes.

En approche consommation, l'ajustement des émissions de CO₂ dans le néolibéralisme est deux fois plus rapide que pour la spécification avec le CO₂ en approche production avec le prix du pétrole. En

10. À ce titre, une régression auxiliaire pour quantifier l'effet de ces variations sur les variables de PIB permettra d'affiner l'analyse dans le cadre d'une future publication de ce chapitre.

11. Par ailleurs, le diagnostic de colinéarité effectué au moyen de la commande *collin* de Stata et portant sur pib^{sup} , pib^{inf} et oil indique des valeurs pour le *Variance Inflation Factor* de 2,57, 4,08 et 2,22 respectivement, ce qui indique qu'il n'y a pas de problème particulier de colinéarité entre ces variables-là.

revanche, la prise en compte des émissions en approche consommation indique que l'ajustement des émissions aux variations du PIB est de même magnitude qu'en approche production sans le prix du pétrole. Nous observons des effets positifs de court et de long termes pour la croissance supérieure à sa moyenne historique, ce qui indique l'absence de découplage. Nous n'observons pas d'effet pour la croissance inférieure à sa moyenne historique. Cela tend à confirmer les réserves sur la pertinence d'une analyse en termes de courbe de Kuznets environnementale pour la France : il ne suffit pas que le PIB augmente pour qu'il y ait baisse des émissions. Une hypothèse plausible serait que les hausses du PIB inférieures à la croissance historique soient tirées par les secteurs les moins directement émetteurs de gaz à effet de serre tels que les services, qui sont aussi les secteurs les moins délocalisés. Leur effet sur les émissions en approche consommation serait donc faible à la hausse comme à la baisse. À l'inverse, les fortes hausses du PIB stimuleraient non seulement les émissions domestiques mais également les importations donc les émissions importées — ce qui accroît l'empreinte CO₂ de la France. Cela pourrait donc traduire l'importance des délocalisations des émissions de CO₂ qui seraient dès lors moins sensibles aux réglementations nationales en matières d'émissions de gaz à effet de serre de même qu'aux évolutions du tissu productif. L'inclusion du prix du pétrole efface tout découplage relatif à court terme et confirme l'absence de découplage à long terme. Ces résultats tendraient donc à indiquer que l'économie peut non seulement croître à un rythme faible sans augmenter l'empreinte carbone de la France mais également que cette dernière ne se réduit pas avec un ralentissement de la production et de la consommation. Comme nous le suggérons dans le cas des émissions domestiques sans prix du pétrole, cela pourrait indiquer un effet d'hystérèse de l'empreinte CO₂ de la France dans le néolibéralisme : dès lors qu'elle a crû, elle ne décroîtrait pas en dépit d'un ralentissement de la croissance, hors effet-crise dû à la crise économique mondiale, donc pas propre à la France. Ce possible effet d'hystérèse est cohérent avec le fait que les séries de CO₂ tendent à être $I(1)$: il s'agit de processus à mémoire et les chocs ont un effet permanent sur ces dernières. C'est effectivement ce que montre la trajectoire des émissions en approche consommation pour la France (figure 4.2 page 110). Décomposer le PIB du côté des dépenses tel que $Y = G + C + I + X - M$ permettra d'approfondir l'interprétation afin de mieux isoler les effets de la consommation et de la balance commerciale.

Au-delà des pistes de recherche qu'ils ouvrent, ces résultats illustrent l'importance d'analyser la relation CO₂-PIB en différenciant les régimes d'accumulation : nous voyons que chacun d'eux incorpore une relation de co-intégration, mais que celle-ci est moins évidente sans les différencier car elle change d'intensité d'un régime à l'autre, un résultat qui rejoint ceux d'APERGIS (2016). Nous observons aussi une rupture nette entre fordisme et néolibéralisme quant aux dynamiques de court terme bien plus prononcées dans le premier que dans le second. Ce constat tendrait à renforcer l'interprétation en termes d'hystérèse pour le régime néolibéral : les émissions évoluent surtout à long terme et essentiellement à la hausse. Par ailleurs, lorsque l'on analyse la relation avec les émissions de CO₂ mesurées au prisme de la consommation, la relation de co-intégration existe bel et bien dans le néolibéralisme mais disparaît dès lors qu'on ne différencie pas les régimes d'accumulation car elle n'existe pas dans le régime fordiste. Il est bien évident cependant que la combinaison de deux séries statistiques distinctes pour le régime fordiste (approche production de 1951 à 1969 puis approche consommation de 1970 à 1980) ajoute un

bruit conséquent dans l'estimation qui nécessiterait des données harmonisées pour être véritablement robuste. Il ne s'agit donc là que d'une première impression.

Si l'on reprend la typologie esquissée au chapitre 3, le fordisme apparaît comme un régime extensif en émissions de CO₂, mais cela implique que les gisements de baisse d'émissions étaient également importants comme en témoignent les coefficients associés aux effets négatifs d'un ralentissement de la croissance. Le néolibéralisme paraît plutôt intensif en émissions en ce qu'elles augmentent moins à la suite d'une accélération de la croissance à court terme, mais les effets sont accrus dès lors que l'on prend en compte les émissions délocalisées : nous voyons alors que les effets de long terme à la hausse sont même supérieurs à ceux observés pour le fordisme. En outre, les gisements de baisse possibles paraissent moins importants en l'état actuel de nos investigations pour les raisons évoquées ci-dessus : une part importante des émissions située hors de la juridiction des normes environnementales françaises et moins directement reliée aux évolutions du tissu productif du pays dont résulterait un possible effet d'hystérèse de l'empreinte carbone de la France. Ces résultats mettent en doute la pertinence d'une analyse en termes d'EKC et rejoignent ceux de GOHER-UR-REHMAN et STORM (2016).

Dans l'ensemble, nos résultats actuels tendent donc à valider le postulat théorique d'une périodisation en termes de fordisme et de néolibéralisme qui se retrouve dans les données de CO₂ comme dans celles de l'énergie et dans celles plus classiquement étudiées par les régulationnistes (part salariale, croissance de la productivité, variables de financiarisation etc.).

Spécification	Variable	1951-2013	Fordisme	Néolibéralisme
<i>co2prod</i>	Ajustement	Lent (-0,143)	Rapide (-0,72)	Moyen (-0,402)
	Δpib^{sup}	Pas de découplage (1,633)	Pas de découplage (4,315)	Découplage relatif (0,382)
	Δpib^{inf}	Non significatif	Pas de découplage (2,382)	Découplage absolu (-0,361)
	β_{pib}^{sup}	Découplage relatif (0,49)	Découplage relatif (0,788)	Découplage relatif (0,947)
	β_{pib}^{inf}	Non significatif	Découplage absolu (-1,623)	Découplage relatif (-0,894)
<i>co2prod + oil</i>	Ajustement	Très lent (-0,064)	Très rapide (-1,51)	Lent (-0,289)
	Δpib^{sup}	Pas de découplage (1,623)	Pas de découplage (1,201)	—
	Δpib^{inf}	Non significatif	Non significatif	—
	Δpib	—	—	Découplage relatif (0,87)
	β_{pib}^{sup}	—	Découplage relatif (0,796)	Non significatif
	β_{pib}^{inf}	—	Découplage absolu (-0,621)	Non significatif
	β_{pib}	Découplage relatif (0,60)	—	—
<i>co2combi</i>	Ajustement	—	—	Moyen (-0,473)
	Δpib^{sup}	—	—	Découplage relatif (0,560)
	Δpib^{inf}	—	—	Non significatif
	β_{pib}^{sup}	—	—	Pas de découplage (1,186)
	β_{pib}^{inf}	—	—	Non significatif
<i>co2combi + oil</i>	Ajustement	—	—	Moyen (-0,462)
	Δpib	—	—	Non significatif
	β_{pib}^{sup}	—	—	Pas de découplage (1,143)
	β_{pib}^{inf}	—	—	Non significatif

TABLEAU 4.20 – Synthèse des résultats par spécifications et périodes pour les variables de PIB. Les variables en différence traduisent les effets de court terme et les coefficients β_i^j traduisent les effets de long terme. Les valeurs des coefficients sont entre parenthèses. Le coefficient de court-terme Δpib^{sup} pour la spécification en CO2 production à la période fordiste est la somme des coefficients en t , $t-1$ et $t-3$ ($t-2$ pas significatif). L'interprétation des coefficients pour la croissance du PIB inférieure à sa moyenne historique pose une difficulté, car celle-ci recouvre aussi les épisodes de récession : dans ce cas un signe négatif indiquerait une hausse des émissions. Néanmoins, étant donné la trajectoire des émissions en période de récession (figure 4.2 page 110), il est clair que les récessions diminuent les émissions. Dès lors, le signe négatif traduit la relation décroissante entre hausse du PIB inférieure à la croissance de long terme et émissions de CO2.

Spécification	Variable	1951-2013	Fordisme	Néolibéralisme
<i>co2prod</i>	Ajustement	Lent (-0,143)	Rapide (-0,72)	Moyen (-0,402)
	Δpib^{sup}	Croissante (1,633)	Croissante (4,315)	Croissante (0,382)
	Δpib^{inf}	Non significatif	Croissante (2,382)	Décroissante (-0,361)
	β_{pib}^{sup}	Croissante (0,49)	Croissante (0,788)	Croissante (0,947)
	β_{pib}^{inf}	Non significatif	Décroissante (-1,623)	Décroissante (-0,894)
<i>co2prod + oil</i>	Ajustement	Très lent (-0,064)	Très rapide (-1,51)	Lent (-0,289)
	Δpib^{sup}	Croissante (1,623)	Croissante (1,201)	—
	Δpib^{inf}	Non significatif	Non significatif	—
	Δpib	—	—	Croissante (0,87)
	β_{pib}^{sup}	—	Croissante (0,796)	Non significatif
	β_{pib}^{inf}	—	Décroissante (-0,621)	Non significatif
	β_{pib}	Croissante (0,60)	—	—
<i>co2combi</i>	Ajustement	—	—	Moyen (-0,473)
	Δpib^{sup}	—	—	Croissante (0,560)
	Δpib^{inf}	—	—	Non significatif
	β_{pib}^{sup}	—	—	Croissante (1,186)
	β_{pib}^{inf}	—	—	Non significatif
<i>co2combi + oil</i>	Ajustement	—	—	Moyen (-0,462)
	Δpib	—	—	Non significatif
	β_{pib}^{sup}	—	—	Croissante (1,143)
	β_{pib}^{inf}	—	—	Non significatif

TABLEAU 4.21 – Sens de la relation entre le PIB et les émissions de CO2.

4.5.2 Robustesse des résultats

Pour vérifier la robustesse de nos résultats, nous avons procédé à des régressions complémentaires en ajoutant une variable de contrôle supplémentaire. L'ajout d'une seule variable de contrôle supplémentaire permet de rester dans le cadre de notre approche parcimonieuse tout en limitant l'apparition de problèmes économétriques par la multiplication des variables. Il fallait donc choisir une variable susceptible de jouer un rôle important dans l'évolution des émissions de CO₂ de la France : au vu de l'importance de l'énergie nucléaire en France, il nous a donc paru pertinent d'ajouter une variable d'intensité en CO₂ de l'énergie utilisée en France telle que $co2int = CO2/E$ avec $CO2$ les émissions de CO₂ domestiques et E l'énergie utilisée en France. Les détails du choix de cette variable et de sa construction sont donnés dans l'annexe C de même que tous les résultats détaillés des régressions, tests de diagnostic, de racine unitaire, de symétrie et asymétrie et de rupture structurelle inclus. Pour faciliter la lecture, nous ne reproduisons ici qu'un tableau de synthèse indiquant les coefficients du terme à correction d'erreur et des variables de PIB pour toutes les spécifications des régressions à chaque période : celles examinées précédemment et celles menées en complément (tableaux 4.22 page ci-contre et 4.23 page suivante).

Bien sûr, l'ajout d'une variable supplémentaire, $co2int$ modifie la valeur des coefficients obtenus. Toutefois, la cohérence générale des résultats est préservée : si les ordres de grandeur des coefficients peuvent parfois varier, les résultats ne se contredisent pas entre eux. Par exemple, l'ajout de la variable $co2int$ ne fait pas apparaître de découplage là où il n'y en avait pas avec les spécifications précédentes. De la même façon, nous n'observons pas de découplage absolu là où les résultats précédents indiquaient un découplage relatif ni de découplage relatif là où il y avait découplage absolu. Seul cas notable : pour la période néolibérale avec le CO₂ en approche production, la spécification avec $co2int$ fait disparaître l'asymétrie des coefficients de long terme et donc le découplage absolu observé entre β_{pib}^{inf} et $co2_{prod}$ pour la première spécification. Toutefois, ce dernier avait déjà disparu avec l'inclusion du prix du pétrole comme variable de contrôle.

Nous pouvons ainsi voir que, pour l'ensemble de la période 1950-2013 avec les émissions de CO₂ en approche production, la valeur des coefficients s'inverse entre long terme et court terme : dans la spécification avec $co2int$, le coefficient est nettement plus important à long terme qu'à court terme alors que c'est l'inverse pour les deux spécifications initiales. En revanche, cela n'est pas vrai pour la période fordiste : la valeur des coefficients reste dans des ordres de grandeur similaire même si le coefficient de long terme de β_{inf}^{sup} est sensiblement moins élevé dans la spécification avec le prix du pétrole comme unique variable de contrôle que pour les deux autres spécifications. Les changements les plus notables sont dans la structure en termes de symétrie et asymétrie des coefficients. Toutefois, cela n'est pas surprenant : l'inclusion de $co2int$ permet de capturer des effets auparavant inclus dans les autres variables, ce qui modifie la valeur des coefficients et donc leur possible symétrie ou asymétrie. Le seul cas où l'asymétrie des coefficients disparaît totalement est celui de la période néolibérale avec le CO₂ en approche consommation.

D'une manière générale les coefficients demeurent sensiblement plus élevés et significatifs dans la période fordiste que dans la période néolibérale et l'analyse que l'on peut en tirer n'est pas altérée. Bien sûr, il aurait été également possible de tester la robustesse de nos résultats avec d'autres variables de

Période	Variable	<i>co2prod</i>	<i>co2prod + oil</i>	<i>co2prod + co2int + oil</i>
1951-2013	Ajustement	-0,143	-0,064	-0,488
	β_{pib}^{sup}	0,490	—	1,020
	β_{pib}^{inf}	Non significatif	—	Non significatif
	β_{pib}	—	0,600	—
	Δpib^{sup}	1,633	1,623	0,499
	Δpib^{inf}	Non significatif	Non significatif	Non significatif
	Δpib	—	—	—
Fordisme	Ajustement	-0,72	-1,51	-0,690
	β_{pib}^{sup}	0,788	0,796	0,938
	β_{pib}^{inf}	-1,623	-0,621	-1,522
	β_{pib}	—	—	—
	Δpib^{sup}	4,315	1,201	—
	Δpib^{inf}	2,382	2,651	—
	Δpib	—	—	1,561
Néolibéralisme	Ajustement	-0,402	-0,289	-0,667
	β_{pib}^{sup}	0,947	Non significatif	—
	β_{pib}^{inf}	-0,894	Non significatif	—
	β_{pib}	—	—	0,555
	Δpib^{sup}	0,382	Non significatif	Non significatif
	Δpib^{inf}	-0,361	Non significatif	Non significatif
	Δpib	—	—	—

TABLEAU 4.22 – Synthèse des valeurs des coefficients pour le terme à correction d'erreur et les variables de PIB à toutes les périodes pour les spécifications avec le CO2 en approche production. β_{pib} : coefficients de long terme. Δpib : coefficients de court terme.

Période	Variable	<i>co2combi</i>	<i>co2combi + oil</i>	<i>co2combi + co2int + oil</i>
Néolibéralisme	Ajustement	-0,473	-0,462	-0,452
	β_{pib}^{sup}	1,186	1,143	—
	β_{pib}^{inf}	Non significatif	Non significatif	—
	β_{pib}	—	—	0,823
	Δpib^{sup}	0,560	—	—
	Δpib^{inf}	Non significatif	—	—
	Δpib	—	Non significatif	0,373

TABLEAU 4.23 – Synthèse des valeurs des coefficients pour le terme à correction d'erreur et les variables de PIB à toutes les périodes pour les spécifications avec le CO2 en approche consommation. β_{pib} : coefficients de long terme. Δpib : coefficients de court terme.

contrôle : néanmoins, cela posait des problèmes économétriques et la significativité des variables testées était limitée (annexe C).

4.6 Conclusion

La problématique de ce chapitre était d'une part de prolonger l'étude des dynamiques du carbone dans les régimes d'accumulation fordiste et néolibéral et d'autre part d'appliquer une technique récente d'économétrie asymétrique et non linéaire à la relation PIB-CO₂.

Empiriquement, les résultats de ce travail sont cohérents avec ceux du chapitre 3 : le fordisme était un régime extensif en carbone, le néolibéralisme tend à être plus intensif mais cela est dû en partie à la délocalisation des émissions de CO₂. Ces résultats indiquent également qu'il existe bien une relation de co-intégration entre émissions de CO₂ et PIB pour la France. Trois résultats principaux ressortent :

1. Cette relation est asymétrique. Au-delà de la rupture structurelle observée, dans les deux régimes l'asymétrie joue en faveur de la croissance supérieure à sa moyenne de long terme : les effets sont sensiblement plus élevés que ceux d'une croissance inférieure à court comme à long termes même si pour le régime fordiste cette conclusion est plus nuancée ;
2. Cette relation est mieux capturée en tenant explicitement compte des régimes d'accumulation comme le montrent les valeurs des coefficients et du terme à correction d'erreur. Sur ce dernier point, l'intensité de la co-intégration semble être dépendante du régime : le terme à correction d'erreur indique qu'elle est nettement plus élevée dans le fordisme que dans le néolibéralisme et ce, quelle que soit la spécification adoptée ;
3. La présence d'une relation de co-intégration est cohérente avec l'absence de découplage absolu entre PIB et émissions de CO₂.

Deux enseignements théoriques peuvent donc être tirés à ce stade. Le premier est que l'analyse de la relation PIB-CO₂ en termes de courbe de Kuznets environnementale pour la France semble peu pertinente, malgré la trajectoire affichée par les émissions domestiques. Dès lors que l'on tient compte du prix du pétrole puis des émissions incorporés aux importations, la croissance inférieure à sa moyenne de long terme ne semble avoir aucun effet sur les émissions dans le néolibéralisme, alors que la croissance supérieure a des effets à court et à long termes. Ce travail se place donc à la fois dans la continuité de la littérature sur les asymétries entre PIB et CO₂ et dans celle de la littérature critique de la CKE.

Le second — c'est sans doute le principal apport de ce chapitre à la littérature existante — est que la relation CO₂-PIB s'étudie mieux si nous l'ancrons dans un cadre macroéconomique et historique cohérent tenant compte des régimes d'accumulation du capital. Ces derniers donnent un sens aux ruptures structurelles de la relation CO₂-PIB. Reconnaître explicitement ces ruptures permet alors, à nos yeux, de rendre l'analyse plus féconde que si l'on ajuste les données au moyen d'un terme quadratique *ad hoc* qui permet de reproduire la trajectoire des émissions de CO₂ mais dont le sens économique est peu évident. En creux, cela fait une nouvelle fois ressortir la nécessité d'une macroéconomie écologique qui intègre les analyses de l'accumulation du capital et des dynamiques environnementales.

Toutefois, le caractère agrégé de ce travail restreint les analyses que l'on peut en tirer et le limite à être surtout descriptif. En prenant le parti de conserver une approche asymétrique, plusieurs pistes d'approfondissement ressortent donc :

- Inclure à l'étude les autres pays à haut revenu pour lesquels l'historicisation en termes de fordisme et de néolibéralisme peut avoir du sens, tels que ceux pris en compte au chapitre 3 (Allemagne, France, Japon, Royaume-Uni, États-Unis). Nous avons montré une rupture dans le rapport social à l'énergie dans ces pays : il peut donc également être pertinent d'analyser la relation PIB-CO2 en tenant compte des différents régimes d'accumulation.
- Décomposer le PIB du côté de la dépense pour estimer plus précisément ce qui tire les émissions en approche consommation.
- Décomposer le PIB en termes de valeurs ajoutées sectorielles et inclure des variables de progrès technique pour prendre explicitement en compte les effets de composition et de technologie bas-carbone dans la dynamique des coefficients et les inclure dans l'analyse en termes de régime d'accumulation.
- Confronter les résultats à d'autres décompositions en sommes partielles : par exemple, autour d'un seuil dynamique pour obtenir des séries moins polarisées d'un régime d'accumulation à l'autre ou en prenant comme seuil l'écart entre le PIB et le PIB potentiel et non la moyenne de la période.
- Modéliser l'asymétrie au moyen de variables binaires plutôt que de recourir à des sommes partielles¹². C'est d'ailleurs ce que font BURKE *et al.* (2015).

Ce travail, comme le chapitre 3, s'inscrit dans l'émergence en cours de la macroéconomie écologique et du développement des problématiques environnementales dans l'approche de la Régulation. Le chapitre précédent et celui-ci adoptent un prisme temporel et historique. Le chapitre 5 qui suit adopte un prisme spatial en replaçant la dynamique du carbone dans le capitalisme — entrevue cette fois à l'aune des engagements de réduction d'émissions — dans le contexte des capitalismes nationaux contemporains.

12. Nous remercions Antonia López pour cette suggestion

Volontarismes carbone et capitalismes contemporains

5.1 Introduction

L'accord signé lors de la vingt-et-unième conférence des parties (COP21) qui s'est tenue à Paris en décembre 2015 fut unanimement acclamé comme un progrès historique dans la lutte contre le changement climatique. Néanmoins, cet accord trace surtout une voie à suivre : il ne contient pas en lui-même d'engagement à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Dans les mois précédant la COP21, les pays participants soumièrent leur contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN)¹ dans laquelle ils exposent leur objectif de réduction d'émission de GES d'ici à 2030. Le succès futur de l'Accord de Paris réside donc dans la capacité et/ou la volonté des nations à respecter leur CPDN et à l'améliorer lors de chaque révision quinquennale prévue par l'Accord. À leur niveau actuel, les CPDN sont insuffisantes pour limiter le changement climatique à une augmentation de deux degrés celsius au-dessus des niveaux pré-industriels, comme l'Accord le reconnaît explicitement (CCNUCC, 2015, §17 p. 4). Il est donc crucial de comprendre ce qui sous-tend la volonté des pays à respecter leurs engagements de réduction des émissions de GES, ou, comme l'appellera dans le reste du chapitre : le *volontarisme carbone*.

En économie, la littérature sur les accords internationaux sur l'environnement (AIE) s'inscrit essentiellement dans le champ de la théorie des jeux. Les AIE sont analysés comme des jeux coopératifs ou non-coopératifs entre pays décrits comme des agents rationnels agissant individuellement ou collectivement pour maximiser leur fonction de bénéfice en réduisant leurs émissions ou pas en l'absence d'un mécanisme supranational contraignant (S. BARRETT, 1994, 2005 ; NORDHAUS, 2015 ; TULKENS, 1997, 2015). L'approche en termes de théorie des jeux peut être rapprochée de celle de l'École néoréaliste

1. Traduction de *Intended nationally Determined Contribution* (INDC) telle qu'adoptée dans la version française de l'Accord de Paris.

en économie politique internationale qui représente les États comme agents rationnels prenant leur décisions selon une analyse coûts-bénéfices (COHEN, 2007). Dans cette perspective, les États prendraient part aux AIE sur la base de leurs intérêts stratégiques pour sécuriser ou accroître leur pouvoir (ROBERTS *et al.*, 2004). Si elles offrent un moyen de modéliser et d'interpréter le procès de négociation lui-même, ces approches n'expliquent pas les facteurs sous-jacents à ces comportements stratégiques : au-delà de ces derniers, le *volontarisme carbone* peut être le produit organique d'une combinaison de facteurs économiques et socio-politiques historiquement situés. Ces facteurs sous-jacents doivent être pris en compte pour appréhender l'émergence des nouvelles régulations climatiques dans le contexte historique du capitalisme globalisé et financiarisé. En nous inspirant de l'École de la régulation (BOYER, 2015) et, dans une moindre mesure, de l'approche des variétés de capitalisme (AMABLE, 2005), nous fondons notre analyse sur certaines caractéristiques structurelles du capitalisme contemporain comme facteurs majeurs du capitalisme contemporain. Notre échantillon est composé des pays de l'OCDE et des BRICS.

Une autre voie intéressante à suivre, — peut-être davantage représentative de la méthodologie de la variétés des capitalisme — aurait été de partir des mesures de politique climatique (taxe carbone, marché carbone, subventions aux énergies renouvelables etc.) pour esquisser une typologie de la diversité des dispositifs institutionnels en matière de régulation du climat. Une telle approche a été adoptée par ÉLIE *et al.* (2012) qui analysent la diversité des dispositifs institutionnels de l'environnement et trouvent que ceux-ci correspondent dans une certaine mesure avec les cinq capitalismes de AMABLE (2005). Toutefois, et bien qu'ils se concentrent sur les pays à bas revenu et incluent bien plus de variables que nous — notamment des variables géographiques et démographiques — notre approche structurelle est plus proche de celle suivie par COSTANTINI *et al.* (2016) qui s'intéressent aux déterminants structurels des alliances entre pays en développement pour les négociations sur le climat. Nous pensons que ces deux approches sont pertinentes et complémentaires : la première part des réglementations et régulations environnementales pour déterminer si la typologie obtenue correspond à certaines caractéristiques socioéconomiques définissant les types de capitalisme, la seconde — celle que nous adoptons — part de caractéristiques structurelles des capitalismes nationaux pour déterminer si la typologie obtenue correspond au comportement observé en matière climatique.

Ce chapitre est organisé comme suit : la section 5.2 présente les facteurs sous-jacents hypothétiques du *volontarisme carbone* et la façon dont ils agissent en théorie. La méthodologie empirique est détaillée dans la section 5.3. La section 5.4 expose les résultats discutés dans la section 5.5.

5.2 Les facteurs économiques et socio-politiques du *volontarisme carbone*

Nous conceptualisons le *volontarisme carbone* comme le produit d'interactions entre facteurs socio-politiques et économiques au sein et entre les pays. Ces interactions interviennent dans le contexte du capitalisme globalisé au travers des chaînes globales de valeurs qui sont aussi des chaînes d'émission de GES. Les facteurs retenus sont, d'une part, les intérêts économiques nationaux, à travers la structure productive et la position relative du pays dans les chaînes globales de GES, d'autre part, les préférences

nationales en matière d'écologie, à travers la demande politique d'environnement et les dynamiques de classes internes, *in fine* à travers la financiarisation et la structure de classe des émissions de GES.

5.2.1 Les intérêts économiques nationaux : la structure productive de l'économie et la position relative dans les chaînes globales de GES

Nous faisons l'hypothèse que la posture adoptée par chaque pays à l'égard des AIE reflète ses intérêts économiques nationaux. Ces derniers façonnent donc dans une large mesure le *volontarisme carbone*. Cela est cohérent avec les approches en termes de théorie des jeux et d'économie politique internationale dans sa perspective néoréaliste : protéger leurs intérêts économiques nationaux serait un moyen pour ces pays de maximiser leur fonction de bénéfice dans le procès de négociation. Cette section se concentre donc sur les fondements stratégiques du *volontarisme carbone*.

La structure productive et le procès de tertiarisation

La structure productive de l'économie réfère à l'importance relative des secteurs primaire, secondaire et tertiaire : le premier est composé de l'agriculture, des activités d'extraction et de production d'énergie, le deuxième de l'industrie manufacturière et de la construction et le troisième des services. Un effet supposé par la littérature sur la courbe de Kuznets environnementale (CKE) est que le développement économique et l'augmentation du revenu s'accompagne d'un changement dans la structure productive avec un accroissement du secteur tertiaire. En retour, cela est considéré comme positif pour l'environnement dans la mesure où les services sont moins intensifs en intrants et extrants environnementaux. Cependant, cet effet peut être limité de deux façons. Premièrement, la structure de consommation requiert toujours des produits intensifs en matériaux, même dans les pays à haut revenu comme nous l'avons rappelé avec la figure 1.4 page 42 du chapitre 1, ces derniers n'ont pas réduit leur base matérielle malgré les tendances à la tertiarisation (MARTINEZ-ALIER, KALLIS *et al.*, 2010) dans la mesure où les services requièrent de grandes quantités d'intrants matériels (par exemple, l'industrie internet a besoin d'ordinateurs et de réseaux physiques pour fonctionner). Deuxièmement, comme nous l'avons dit aux chapitres 3 et 4, l'augmentation de la qualité de l'environnement est parfois trompeuse en raison de l'éventuelle délocalisation des industries polluantes. Néanmoins, la croissance du secteur tertiaire peut jouer un rôle politique dans la mise en place d'une politique climatique ambitieuse car les activités économiques, donc la base fiscale d'un gouvernement, sont moins directement liées aux émissions de GES. Le gouvernement ainsi concerné court, alors, moins de risques à impacter sa base fiscale s'il adopte une telle politique climatique ambitieuse.

Position relative dans les chaînes globales de GES et délocalisation des émissions : la compossibilité en jeu

La position relative dans les chaînes globales de GES illustre le fait que certains pays polluent pour les autres. Une part substantielle de la consommation des pays à haut revenu est, en effet, importée, ce qui implique des émissions de GES à l'étranger *ipso facto* incorporées au commerce international (PETERS,

DAVIS *et al.*, 2012 ; PETERS, MINX *et al.*, 2011). Ce procès peut être qualifié de délocalisation de GES (*GHG offshoring*) pour les pays importateurs et de relocalisation de GES pour les pays exportateurs (*GHG inshoring*). En illustrant la position relative dans les chaînes d'émissions, la délocalisation/relocalisation de GES reflète la mesure dans laquelle la base fiscale des gouvernements repose sur des activités intensives en GES, en parallèle de la structure productive. Pour tenir compte de la délocalisation/relocalisation des GES, nous prenons comme approximation la balance carbone d'un pays, selon qu'il est importateur net ou exportateur net de CO₂, calculée au moyen des émissions de CO₂ en approche consommation. Celles-ci sont les émissions totales induites par la consommation finale d'un pays nettes des émissions de ce pays induites par la consommation finale à l'étranger (PETERS, 2008) :

$$CO2_{consommation}^i = CO2_{production}^i - CO2_{export}^i + CO2_{import}^i \quad (5.1)$$

Les émissions en approche production sont les émissions domestiques sur une période donnée. La balance carbone est donc simplement égale à la différence entre émissions de CO₂ en approche consommation et en approche production. Cela nous donne la quantité de CO₂ incorporée aux importations nettes du pays considéré. Les importateurs nets sont les pays dont la consommation finale induit plus de CO₂ que ce qu'ils émettent sur leur territoire ; les exportateurs nets sont les pays dont la consommation finale induit moins de CO₂ que leurs émissions domestiques. Autrement dit, les exportateurs nets de CO₂ sont les pays en fin des chaînes globales de CO₂, ceux qui ont délocalisé leurs émissions de GES dans une large mesure. Les pays exportateurs nets de CO₂ se situent plus en amont des chaînes d'émission et qui ont relocalisé les émissions de CO₂. Le tableau 5.1 confirme que, pour notre échantillon, les nations les plus ambitieuses quant à leur objectif de réduction d'émission de GES tendent également à être importatrices nettes de GES. En moyenne, les pays importateurs net de CO₂ en 2013 prévoient une

	Objectif moyen de réduction d'émission de GES pour la COP21 d'ici à 2030 en % de 1990
Importateurs nets de CO₂ en 2013	6
Exportateurs nets de CO₂ en 2013	99

TABLEAU 5.1 – Moyennes des objectifs de réduction d'émission de GES déclarés pour la COP21. Sources : calculs de l'auteur d'après les données de l'UNFCCC et du *Climate Action Tracker* (CPDN) et de *Eora Input-Output Database* (balances carbone)

augmentation de leurs émissions de GES de 6% par rapport à 1990 d'ici à 2030. En comparaison, les pays exportateurs nets de CO₂ s'attendent à une augmentation de près de 99% de leurs émissions par rapport à 1990 d'ici à 2030. Dès lors, nous devons ici dépasser un certain nationalisme méthodologique (PECK et THEODORE, 2007) pour insister sur la compossibilité en matière de *volontarisme carbone* : cette dernière est définie par JESSOP (2014, p. 54) comme « l'appariement, la co-évolution et les complémentarités et exclusivités structurels et leur impact sur l'accumulation différentielle à l'échelle mondiale ». L'accumulation de capital à l'échelle mondiale d'ici 2030 va donc être probablement fondée sur un accroissement global des émissions de GES. La distribution de ces émissions illustre à la fois les complémentarités entre pays au sein des chaînes globales de GES et la co-évolution de leurs émissions : la diminution

des émissions à certains endroits du monde aura pour contrepartie leur accroissement dans d'autres endroits. En d'autres termes, cela signifie qu'au sein du capitalisme globalisé, le *volontarisme carbone* est exclusif : des régimes d'accumulation nationaux plus écologiques ici sont permis parce que, là, des régimes moins écologiques fournissent aux premiers une part importante de leur consommation finale. Il en découle que les ambitions en matière de réduction d'émission de GES ne peuvent se comprendre isolément dans le contexte du capitalisme globalisé en raison de l'entrelacs des régimes d'accumulations nationales. Comme fonction de la position relative dans les chaînes d'émission de GES, les objectifs de réduction d'émission de GES sont *de facto* un produit de la compossibilité. Il doit donc être bien clair que le regroupement de la structure productive des pays et de leur position relative dans les chaînes globales de GES comme objectifs économiques nationaux n'efface pas l'influence de facteurs externes sur le *volontarisme carbone* d'un pays.

5.2.2 Les préférences écologiques nationales : développement capitaliste, revenu et structure de classe des émissions

Au-delà des facteurs stratégiques comme les intérêts économiques nationaux et leur interconnexion au sein du capitalisme globalisé, la base politique des politiques climatiques est aussi façonnée par les préférences nationales en matière de soutenabilité. Nous nous appuyons sur le récit en termes de courbe de Kuznets environnementale et sur l'approche néoréaliste² pour discuter des déterminants socio-politiques du *volontarisme carbone*.

Revenu, développement capitaliste et récit en terme de courbe de Kuznets environnementale

L'impact du revenu et du niveau de développement sur l'environnement a été largement étudié par la littérature sur l'existence d'une EKC pour toute une série de dégradations environnementales. Bien que cette relation n'ait jamais été prouvée à l'échelle macroéconomique pour tous les types d'atteinte à l'environnement — en particulier il n'existe pas de consensus sur son existence pour le CO₂ (D. I. STERN, 2004) —, cela ne signifie pas que les niveaux de revenu et de développement ne jouent aucune rôle dans la détermination du *volontarisme carbone*. Suivant la littérature sur l'EKC, nous faisons l'hypothèse qu'ils peuvent être reliés au *volontarisme carbone* de trois façons principales.

Premièrement, à l'échelle microéconomique, une hypothèse habituelle est que la qualité environnementale est un bien de luxe. La demande de qualité environnementale affiche une élasticité-revenu positive, de sorte que les citoyen-nes deviendront plus soucieux en matière écologique une fois un certain niveau de niveau de vie atteint (BERTHE et ÉLIE, 2015; VAN ALSTINE et NEUMAYER, 2008). Cette hypothèse induit une notion de subordination des besoins et de non-substituabilité, ce qui la rend impossible à représenter dans un cadre théorique néoclassique au moyen d'une fonction d'utilité habituelle. La théorie du choix post-keynésienne fournit les outils pour l'appréhender au moyen de préférences lexicographiques incorporées dans un vecteur de caractéristiques : les ménages entreprennent de satisfaire la $n^{\text{ème}}$

2. L'approche néoréaliste développée notamment par Amable et Palombarini dont il sera question ici n'a rien à voir avec l'approche néoréaliste en économie politique internationale mentionnée précédemment. Les deux termes de "néoréalisme" renvoient à des champs différents.

caractéristique une fois que la $n^{\text{ème}} - 1$ est satisfaite (LAVOIE, 2014). Il a été montré que les préférences lexicographiques sont particulièrement pertinentes pour rendre compte des choix individuels en matière environnementale (GOWDY et MAYUMI, 2001 ; van den BERGH, FERRER-I-CARBONELL *et al.*, 2000). En termes littéraires, une CKE peut donc être qualifiée *d'effet Woody Allen* : c'est après que les personnes ont résolu la question matérielle qu'elles peuvent se permettre de passer un temps substantiel de leur vie à se poser des questions existentielles sur la vie, l'amour et le type de société dans laquelle elles aimeraient vivre, y compris d'un point de vue écologique. Dès lors, elles peuvent également s'autoriser à mener leur vie en cohérence avec ces valeurs. Cela expliquerait pourquoi les films de Woody Allen se passent souvent dans des environnements assez bourgeois. Un tel effet a été étudié dans le champ de l'économie écologique par Scruggs (1998). Ainsi, une CKE microéconomique ou locale peut émerger si les acteurs sont en mesure d'adapter leur existence à leurs croyances selon un ordre lexicographique de préférences incluant les problématiques écologiques. Des résultats empiriques ont suggéré l'existence d'une CKE pour des polluants locaux (DINDA, 2004).

Pendant, le déterminisme social de la CKE est problématique : le fait de s'enrichir ne suffit pas à devenir plus vertueux en matière environnementale. Concernant les GES, les données indiquent que les plus riches sont également les principaux émetteurs, même si certains résultats nuancent le constat en montrant que l'intensité en GES de la consommation tend à décroître avec l'augmentation du revenu (BERTHE et ÉLIE, 2015 ; CHANCEL et PIKETTY, 2015 ; LENGART *et al.*, 2010). Cela pourrait indiquer que, pour un niveau de vie donné, les ménages les plus riches essaieraient de réduire leur empreinte écologique, ce qui est cohérent avec la nature lexicographique des préférences environnementales.

Une deuxième limite du récit en termes de CKE est que, lorsqu'il est compris comme une relation mécanique entre revenu et vertu environnementale, il ne peut rendre compte des situations où l'environnement immédiat est directement en jeu pour la survie. Une dimension importante de l'environnementalisme des pauvres et des mouvements de justice environnementale (MARTINEZ-ALIER, 2014) est alors négligée. Dans ce cas, l'arbitrage entre revenu et écologie se révèle impossible et l'ordre lexicographique des préférences peut être questionné, voire inversé : la préservation de la nature peut venir en premier et l'accroissement du revenu peut constituer un objectif si, et seulement si, la première caractéristique du vecteur de préférence a été satisfaite. Analysé à l'échelle du ménage, le niveau de revenu peut donc être considéré comme un facteur de demande politique d'environnement mais il ne peut être considéré comme facteur suffisant.

Deuxièmement, le niveau de revenu et de développement peut jouer un rôle au niveau de la firme et au niveau macroéconomique à travers la dissémination des innovations améliorant la productivité et l'usage des ressources et la production de déchets. La relation de long terme entre croissance du PIB et technologie est bien connue tant théoriquement qu'empiriquement comme la loi de Kaldor-Verdoorn : l'augmentation de la demande agrégée incite à innover (ANGERIZ *et al.*, 2009 ; KALDOR, 1975 ; KNELL, 2004 ; MILLEMACI et OFRIA, 2014). Bien que l'effet environnemental de la technologie soit ambigu en raison de possibles effets Jevons — notamment l'accroissement de la consommation grâce aux économies d'énergie (VAN ALSTINE et NEUMAYER, 2008) — le développement capitaliste considéré comme une approximation de la capacité technologique à réduire les émissions de GES est donc un déterminant

possible du *volontarisme carbone*.

Enfin, au niveau macroéconomique, les politiques publiques peuvent s'avérer d'une plus grande importance pour la relation entre niveau de revenu, de développement et environnement que la somme des volontés individuelles des ménages et des firmes. De ce point de vue, nous supposons que les pays les plus riches seront davantage en capacité d'implémenter des politiques climatiques que les pays à bas revenu et à revenu intermédiaire simplement parce qu'ils ont plus de moyens financiers pour le faire. Ainsi, certains CPDN de pays pauvres et en transition explicitent la nécessité de transferts financiers pour mettre en place leurs objectifs de réduction d'émission ou pour les améliorer (c'est par exemple le cas du Mexique et du Gabon). De même, un enjeu crucial de la COP21 fut l'engagement financier des pays à haut revenu envers les pays à revenu inférieur.

En résumé, nous faisons l'hypothèse que le niveau de revenu et de développement capitaliste constitue un déterminant important du *volontarisme carbone* en raison d'un possible *effet Woody Allen* en matière de préférence environnementale des ménages, par l'élargissement des possibilités technologiques et par l'accroissement des moyens de financer les politiques publiques concernant le climat.

La demande politique d'environnement comme base sociale des politiques environnementales

Les dégradations et bénéfices environnementaux ne sont pas uniformément distribués socialement et géographiquement, et n'affectent donc pas toutes les classes sociales de la même manière ou avec la même intensité. Différentes classes peuvent alors avoir des intérêts divergents concernant les réglementations et régulations environnementales. Comme le montre l'approche néoréaliste, les attentes sociales sont le produit d'idéologies conflictuelles traduites en demandes politiques (AMABLE et PALOMBARINI, 2008; GUILLAUD et PALOMBARINI, 2006). Dès lors nous pouvons analyser l'émergence de l'environnementalisme en parallèle à la dégradation des conditions environnementales de l'existence comme un moyen d'orienter la médiation politique entre intérêts antagonistes en faveur de nouvelles institutions, par exemple des réglementations environnementales plus sévères. La politique climatique peut ainsi être vue comme un compromis entre classes antagonistes. Ce compromis est institutionnalisé au fur et à mesure que des réglementations environnementales tels les objectifs de réduction d'émission de GES sont mises en œuvre, pour assurer la reproduction des conditions environnementales de l'existence. Comme l'ont mis en évidence ÉLIE *et al.* (2012), les réglementations environnementales varient selon les modèles de capitalisme et n'émergent pas dans un vide historique : elles illustrent le procès d'institutionnalisation de l'environnementalisme. O'CONNOR (1988) insiste sur le rôle de l'environnementalisme dans le procès amenant à de nouveaux compromis institutionnalisés régulant le capitalisme (p. 27) : « De même que l'exploitation du travail (...) engendra un mouvement ouvrier qui, à des endroits et moments particuliers, opposa une "barrière sociale" au capital, l'exploitation de la nature (...) engendre un mouvement environnemental (...) qui peut aussi constituer une "barrière sociale" au capital ».

Dans le cadre d'analyse néoréaliste, les politiques environnementales sont de nouvelles institutions qui émergent comme compromis entre classes antagonistes qui forment, sur ces questions, un bloc social dominant. Comme base socio-politique de ces politiques, la demande politique d'environnement peut être un déterminant clef du *volontarisme carbone*. Elle permet également de traduire l'influence

d'organisations non-gouvernementales agissant à un niveau supranational, bien que l'on intègre la demande politique d'environnement aux préférences écologiques nationales. Plus ces organisations sont soutenues dans un pays, plus elles seront influentes aux niveaux national et international.

5.2.3 Les dynamiques de classe : la financiarisation et la structure de classe des émissions

La financiarisation désigne les transformations dans la nature de l'accumulation du capital depuis la fin du régime d'accumulation fordiste (BOYER, 2000). En nous appuyant sur la littérature, on définira de triple manière la financiarisation : comme procès d'émergence de la finance, comme secteur majeur de l'économie, comme principe organisateur de la gestion des sociétés non-financières (G. A. EPSTEIN, 2005 ; KRIPPNER, 2005 ; van der ZWAN, 2014). Il s'agit-là d'une définition synthétique qui ne prétend guère à l'exhaustivité quant aux multiples dimensions de la financiarisation. Cette dernière est considérée comme une caractéristique essentielle de la transformation des relations capital-travail depuis le milieu des années 1970 (DUMÉNIL et LÉVY, 2012). Dans ce chapitre, nous allons prendre en compte la seconde partie de la définition, la financiarisation de la gestion des entreprises, bien que la montée de la finance comme secteur est également prise en compte via la structure productive de l'économie. Pour distinguer de la financiarisation sectorielle, nous désignons par accumulation financière la financiarisation de la gestion des entreprises — car celle-ci a conduit à la primauté du capital financier sur le capital productif — et par financiarisation fonctionnelle le changement dans la répartition fonctionnelle de la valeur ajoutée entre travail et capital. Cette modification de la dynamique de classe entraînée par le procès de financiarisation produit des configurations particulières de structure de classe des émissions qui peuvent être des conséquences politiques pour les politiques climatiques.

La financiarisation de l'accumulation : l'éviction de l'investissement productif et de l'innovation

L'accumulation financière réfère à la décline de l'investissement productif relativement à l'investissement financier, aux rachats d'actions et aux profits distribués via les dividendes et les intérêts. Au niveau macroéconomique, plusieurs auteurs ont établi une relation négative entre financiarisation, investissement et accumulation de capital dans les pays à haut revenu (CORDONNIER, 2006 ; M. HUSSON, 2010 ; STOCKHAMMER, 2004, 2006, 2010). Au niveau des firmes, la littérature fournit également des indications d'un déplacement du modèle « garde les profits et réinvestis » (*retain and reinvest*) vers le modèle « réduis la voilure et distribue les profits » (*downsize and distribute*) dans la gestion des entreprises : ce dernier modèle a conduit à l'éviction de l'investissement productif et de l'innovation (CLÉVENOT *et al.*, 2010 ; LAZONICK, 2010 ; LAZONICK et O'SULLIVAN, 2000 ; ORHANGAZI, 2008).

L'arbitrage entre exigences financières et accumulation du capital s'illustre par l'aversion envers l'investissement de long terme et l'innovation. Cela peut provoquer un frein à une politique climatique ambitieuse pour quatre raisons : premièrement, en limitant la capacité des pays à renouveler leur tissu productif, notamment pour tendre vers des processus de production moins polluants, deuxièmement, en délocalisant les activités productives pour répondre aux exigences de rentabilité financière, troisiè-

mement, en nourrissant les réticences des gouvernements à implémenter des politiques climatiques ambitieuses afin de sauvegarder leur base fiscale dans le contexte de financiarisation, enfin, en diminuant relativement l'investissement productif entraînant ainsi un effet récessif sur l'activité économique et, potentiellement, sur l'emploi : la demande ralentie pouvant, en retour, affaiblir la relation de Kaldor-Verdoorn entre croissance et innovation et freiner la mutation vers des processus de production moins polluants.

Baisse de la part salariale et structure de classe des émissions

En parallèle à la croissance de l'accumulation du capital, la part des salaires dans le partage de la valeur ajoutée a également décliné au cours du processus de financiarisation, en a donc résulté une mutation du rapport salarial (BOYER, 2000). Plusieurs études, s'appuyant sur différentes mesures de financiarisation, montrent ainsi une relation décroissante avec la part salariale pour un grand nombre de pays (DÜNHaupt, 2011, 2012, 2013a,b; M. HUSSON, 2010; JAYADEV, 2007; JAYADEV et G. EPSTEIN, 2007; KÖHLER *et al.*, 2015; STOCKHAMMER, 2012).

La pression croissante sur la part des salaires peut aussi représenter un obstacle aux politiques climatiques : des réglementations plus sévères obligerait les firmes à investir pour adapter leur appareil productif et réduire leurs émissions alors que, contraintes par les exigences de rentabilité financière, les entreprises ne peuvent réduire la part du profit dévolue à sa satisfaction. En d'autres termes, pour un niveau de profit donné, les entreprises ne peuvent réduire la part allant au capital financier. Dès lors, afin de satisfaire aux nouvelles réglementations climatiques, les entreprises devraient réduire l'emploi ou les salaires. La part salariale en serait donc diminuée. La financiarisation fonctionnelle pourrait ainsi façonner le *volontarisme carbone* à travers quatre canaux : premièrement, les gouvernements pourraient être réticents à poursuivre des politiques climatiques pour ne pas accroître davantage la pression sur la part salariale, deuxièmement, la diminution de la part salariale peut avoir des effets négatifs en termes de préférences écologiques selon une dynamique de type CKE car elle nuirait au niveau de vie suffisant au-delà duquel les ménages sont suffisamment sensibilisés aux problèmes environnementaux, troisièmement, la décade de la part salariale pourrait déprimer l'activité économique et donc affaiblir la relation de Kaldor-Verdoorn et l'innovation, quatrièmement, comme facteur de creusement des inégalités, la baisse de la part salariale pourrait également affecter la structure de classe des émissions de GES. Comme nous l'avons dit précédemment, les ménages les plus riches sont, en effet, les plus gros émetteurs et dans le cas d'une structure de classe des émissions très inégale, le *volontarisme carbone* pourrait être affecté par deux processus politiques complémentaires : la classe dominante défendrait son mode de vie intensif en carbone et les classes populaires refuseraient de diminuer leurs émissions dans la mesure où elles sont inférieures car les désirs et les préférences se cristallisent souvent autour du mode de vie de la classe dominante (VEBLEN, 1979; WISMAN, 2011). Par conséquent, une structure de classe des émissions fortement polarisée peut empêcher la formation d'un bloc social dominant en faveur des politiques climatiques : le mode de vie dominant peut, en effet, être vu comme un pouvoir à acquérir, « qui s'est inscrit durablement dans le corps des dominés, sous la forme de schèmes de perception et de dispositions (à respecter, à admirer, à aimer, etc.) c'est-à-dire de croyances qui rendent sensible à

certaines manifestations symboliques, telles que les représentations publiques du pouvoir. » (BOURDIEU, 1997, p. 245). La figure 5.1 résume les liens théoriques entre les facteurs hypothétiques du *volontarisme carbone*

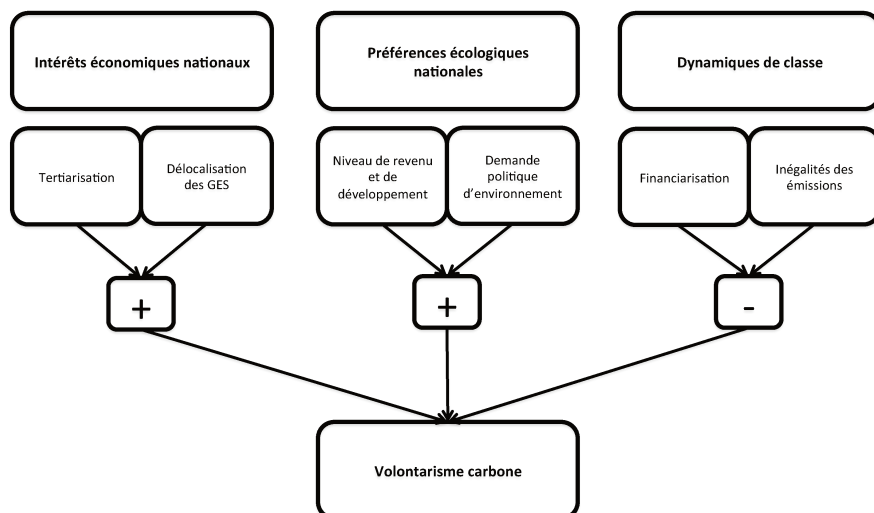


FIGURE 5.1 – Les facteurs du *volontarisme carbone* et leurs effets hypothétiques.

carbone et ce dernier. En nous appuyant sur notre conceptualisation du *volontarisme carbone* comme le produit de tous ces facteurs et de leur interactions, nous esquisserons une typologie des pays selon cette perspective. La section suivante présente l'échantillon, les données et la méthodologie suivie pour l'analyse statistique.

5.3 Méthodologie empirique

Cette section présente l'échantillon de pays ainsi que les données utilisées et les méthodes statistiques. Nous avons utilisé deux méthodes statistiques exploratoires : d'abord, nous avons procédé à une analyse en composante principale à partir des variables économiques et socio-politiques, ensuite, nous avons procédé à une classification mixte entre hiérarchie et nuées dynamiques pour obtenir une typologie des pays que nous avons comparé au *volontarisme carbone*.

5.3.1 Échantillon et données

Notre échantillon est composé de trente-sept pays de l'OCDE et des BRICS³. Ces pays compte pour 80% du PIB mondial, 60% de la population et, surtout, pour 70% des émissions de GES. Ils sont donc les principales parties prenantes dans les négociations climatiques. Quatorze variables sont incluses, dont

3. Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Canada, Chili, Chine, République tchèque, Danemark, Estonie, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Hongrie, Inde, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Pays-Bas, Nouvelle-Zélande, Norvège, Pologne, Portugal, Russie, Slovaquie, Slovénie, Afrique du Sud, Corée du Sud, Espagne, Suède, Suisse, Turquie, Royaume-Uni, États-Unis.

treize pour l'analyse statistique. Le tableau 5.2 page suivante présente les données, leur signification et les sources⁴.

Facteur	Variable	Signification	Source
Volontarisme car-bone	COP21	Objectif de réduction des GES pour la COP21	CPDN, <i>Climate Action tracker</i> , données d'émissions de la CNUCC, de Edgar v4.2 FT2012 et Eurostat, calculs de l'auteur
Structure productive	PrimAgri	Secteur primaire, agriculture (NACE : A)	OCDEStat, <i>World Development Indicators</i>
	PrimIndus	Secteur primaire, activités extractives et énergétiques (NACE : B à E sauf C)	
	SecManuf	Secteur secondaire, activité manufacturière (NACE : C)	
	SecConst	Secteur secondaire, construction (NACE : F)	
	Ter_Serv	Secteur tertiaire hors FIRE (NACE : G à U sauf K et L)	
	Ter_FIRE	Secteur tertiaire, activités financières, assurance, immobilier (NACE : K et L)	
Revenu et développement	GDPCap	PIB par habitant de 2015 en dollars 2014	<i>Total Economy Database</i>
Position relative dans les chaînes globales de GES	EmbCO2	Part du CO2 importé net en 2013	<i>Eora Input-Output Database v. 199.82</i>
Demande politique d'environnement	IUCN	Nombre d'organisations membres de l'UICN par millions d'habitants	UICN, <i>World Development Indicators</i> (population)
	GreenP	Soutiens financiers de Greenpeace en % de la population	Sites et rapports nationaux de Greenpeace, <i>World Development Indicators</i> (population)
Structure de classe des émissions	ClassGHG	Ratio inter-déciles des émissions selon le niveau de revenu	CHANCEL et PIKETTY (2015), OCDEStat
Financiarisation	FinIndex	Part du profit non-réinvesti en % du PIB	OCDEStat et Ameco
	WShare	Part salariale au coût des facteurs	

TABLEAU 5.2 – Variables et sources.

4. Les valeurs des variables sont fournies dans les tableaux D.1 page 200 et D.2 page 201 en annexe.

Mesurer le *volontarisme carbone*

Nous mesurons le *volontarisme carbone* par l'objectif de réduction d'émission déclaré pour la COP21 : nous faisons donc l'hypothèse que la contribution de chaque pays à la COP21 constitue un indicateur synthétique de son *volontarisme carbone* (variable COP21). Pour les pays ayant une autre année de base que 1990 ou qui ont fondé leur objectif sur un scénario de type *business-as-usual*, nous avons collecté les équivalences en termes de 1990 sur le site *Climate Action Tracker* (CAT)⁵ ou nous les avons calculées nous-mêmes selon la formule suivante :

$$\frac{(E_{anneebase}^i - \varphi_{E_{anneebase}}^i \times E_{anneebase}^i) - E_{1990}^i}{E_{1990}^i} \times 100 \quad (5.2)$$

avec E_{1990}^i et $E_{anneebase}^i$ les émissions du pays i respectivement en 1990 et lors de l'année de base et $\varphi_{E_{anneebase}}^i$ le pourcentage de réduction des émissions de l'année de base déclaré pour la COP21.

Les équivalences en niveau absolu lorsque les objectifs étaient déclarés en niveau relatif au PIB furent également collectées sur CAT ou calculées par l'auteur. Les équivalences en émissions excluant l'usage des terres, les changements dans l'usage des terres et la foresterie (UTCF) lorsque les CPDN étaient formulés en les incluant furent collectées sur CAT. La raison pour exclure l'UTCF est que cela permet de se concentrer sur les émissions des sources industrielles et de la combustion d'énergie, évitant ainsi le biais dû à la capture de CO₂ par les forêts et les plantes qui peut jouer comme mécanisme compensatoire. La mesure du CO₂ excluant l'UTCF reflète donc mieux la réduction réelle des émissions.

Quelques cas particuliers doivent être notés : d'abord, l'Union européenne (UE) a soumis un CPDN collectif portant sur un objectif commun de réduction de 40% des émissions d'ici à 2030 par rapport à 1990. La Commission européenne a rendu publiques plusieurs mois plus tard les cibles nationales de réduction d'émission pour les secteurs non inclus dans le système d'échange de quotas d'émissions (SEQE-UE) : l'agriculture, la construction, la gestion des déchets, le transport, la capture de CO₂ et son stockage et l'UTCF. Au niveau de l'UE, ces secteurs devront réduire leurs émissions totales de 30% d'ici à 2030 par rapport à 2005 (et non 1990)⁶. Le SEQE-UE inclut, quant à lui,

« les installations intensives en énergie, soit les centrales énergétiques et autres usines de combustion ayant un intrant thermique supérieur ou égal à 20MW (à l'exception des installations municipales de gestion des déchets et des installations de gestion des déchets dangereux), les raffineries de pétrole, les fours à coke, à fer et à acier, les installations produisant du ciment clinker, du verre, de la chaux, des briques, de la céramique, de la pâte à papier, du papier et du carton, de l'aluminium, les installations pétrochimiques, produisant de l'ammoniaque, de l'acide nitrique, adipique et glyoxylique, capturant le CO₂, le transport en pipelines et le stockage géologique de CO₂. Le SEQE-UE inclut aussi les vols à l'intérieur de l'UE jusqu'en 2016 (...) » (COMMISSION EUROPÉENNE, p.d., p. 20)⁷

5. <http://climateactiontracker.org/countries.html>, dernier accès au site le 27 juin 2017.

6. Les objectifs nationaux d'émissions sont des propositions et seront soumis à négociation. Par ailleurs, ils ne tiennent pas compte du *Brexit* à venir.

7. La situation de l'aviation à partir de 2017 dépendra des décisions de l'Organisation internationale de l'aviation civile. De plus, on remarque la capture et le stockage de CO₂ figurent à la fois dans les secteurs couverts et non couverts par le SEQE-UE : nous faisons l'hypothèse que certains types de capture et de stockage de CO₂ sont couverts par le SEQE-UE et que d'autres ne le sont pas

L'objectif de réduction d'émission pour les secteurs couverts par le SEQE-UE est de 43% d'ici à 2030 relativement à 2005. Nous avons calculé une valeur pour la variable *COP21* qui combine les objectifs nationaux pour les secteurs non couverts par le SEQE-UE et les objectifs communs pour les secteurs couverts par le SEQE-UE⁸.

Les objectifs individuels concernant les secteurs non SEQE-UE incluent l'UTCF et aucune équivalence excluant l'UTCF était disponible. Cependant, la différenciation avec l'objectif commun des pays de l'UE concernant les principales installations industrielles et énergétiques couvertes par le SEQE-UE diminue l'effet de l'inclusion de l'UTCF.

Le deuxième cas particulier est celui des États-Unis, dont le CPDN indique un objectif de 28% de réduction incluant l'UTCF d'ici à 2025 par rapport à 2005, alors que la norme des CPDN était d'établir un objectif d'ici à 2030. Pour calculer un objectif relativement jusqu'à 2030, nous avons calculé une projection à l'aide de l'équivalence excluant l'UTCF fourni par le CAT et du taux annuel moyen de diminution des émissions américaines entre 2005 et 2025. Nous faisons donc l'hypothèse que ce taux moyen serait maintenu pour la période 2025-2030 et avons calculé sur cette base les émissions excluant l'UTCF en 2030. Enfin, nous avons calculé l'équivalence en termes de 1990.

Troisièmes cas particuliers : la Nouvelle-Zélande, la Norvège et la Suisse ont indiqué des objectifs incluant l'UTCF et aucune équivalence n'était disponible. Aussi, il faut noter que la comptabilisation de l'UTCF par ces pays peut différer des autres pays.

Quatrièmement, quelques pays comme la Nouvelle-Zélande et la Suisse envisagent d'inclure la compensation des émissions à l'étranger au moyen d'instruments comme les Mécanismes de Développement Propres qui permettent d'obtenir des quotas d'émissions en diminuant ou évitant des émissions dans les pays en développement. En soi, l'inclusion de tels mécanismes dans les CPDN indique une volonté de réduire l'effet des politiques climatiques sur l'économie domestiques et signale donc un moindre *volontarisme carbone* que suggéré par la valeur prise par la variable *COP21* pour ces pays-là.

Pour calculer le *volontarisme carbone*, nous avons pris les données de la Convention des Nations Unies pour le Changement Climatique chaque que cela était possible. Lorsque les données manquaient, nous avons pris les données de la base Edgar : la comparaison des années où les données sont disponibles dans les deux bases a indiqué une grande cohérence entre elles. La variable *COP21* n'est pas incluse dans l'analyse en composante principale ni dans la classification : nous avons mené l'analyse statistique sur les facteurs hypothétiques du *volontarisme carbone*. Nous avons ensuite comparé la typologie ainsi obtenue au *volontarisme carbone* pour voir si cela correspondait à notre raisonnement théorique.

La structure productive de l'économie

La structure productive de l'économie est représentée par la part respective des secteurs primaire, secondaire et tertiaire. Chacun d'eux est scindé en deux activités ou groupes d'activités pour affiner l'analyse. Nous avons pris les valeurs pour 2015, à l'exception de l'Australie, de l'Irlande, d'Israël, de la Russie, de l'Afrique du Sud, de la Corée du Sud, de la Suisse, de la Turquie, des États-Unis (2014), de la Chine (2013), de la Nouvelle-Zélande (2012), du Brésil (2011) et de l'Inde (2009).

8. Les détails du calcul sont fournis en annexe.

Concernant la classification des activités productives, nous nous sommes appuyé sur les données de la révision 4 de l'ISIC, sauf pour l'Afrique du Sud et la Russie (version 3). Pour ces pays-là, le secteur des FIRE (*finance insurance real estate*) peut donc être surestimé car il est mélangé à d'autres activités. Pour la Chine, les données de l'OCDE et de la Banque Mondiale furent combinées pour isoler l'industrie manufacturière. Le niveau de revenu et de développement capitaliste sont représentés par le niveau de PIB par habitant en 2015. La position relative dans les chaînes globales de GES est approximée par la part du CO₂ dans les importations nettes en 2013.

La demande politique d'environnement

La demande politique d'environnement est approximée par deux variables : le nombre d'organisations non gouvernementales et gouvernementales membres de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) normalisé par millions d'habitants à date d'août 2015 et le nombre de donateurs financiers de Greenpeace en pourcentage de la population pour l'année la plus récente disponible. Trois pays — l'Estonie, l'Irlande et le Portugal — n'ont pas de représentation nationale de Greenpeace et ont donc une valeur de 0 pour cette variable. Bien que cela puisse induire un biais dans l'analyse, l'absence d'une ONG de cette importance peut également constituer une information concernant la demande locale d'environnement.

La structure de classe des émissions

La structure de classe des émissions est estimée à travers le ratio des émissions du neuvième décile de la distribution des revenus sur les émissions du premier décile de la distribution des revenus pour 2013, sauf pour l'Australie (2003), la Nouvelle-Zélande (1998) et la Suisse (ratio D9/D2). Les données étaient manquantes pour le Chili : la valeur du ratio a donc été approximée par le ratio du revenu de ces deux déciles car le ratio des émissions et le ratio du revenu (provenant de l'OCDE) apparaissaient très proches pour l'ensemble de l'échantillon.

La financiarisation

Enfin, la financiarisation est modélisée par deux variables : l'indice FinIndex constitue une approximation de l'accumulation financière et mesure la différence entre le taux de marge brute et la formation brute de capital fixe. En d'autres termes, cet indice mesure la part du PIB non réinvestie. Les valeurs de 2014 furent prises sauf pour l'Australie, le Chili, le Japon, le Mexique, la Nouvelle-Zélande, la Pologne, la Russie, l'Afrique du Sud, la Corée du Sud, la Suisse, les États-Unis (2013), la Chine, Israël (2012), l'Inde (2009) et la Turquie (2006). La financiarisation fonctionnelle est représentée par la part salariale ajustée aux coûts des facteurs provenant d'Ameco. Pour les BRICS et Israël, la part salariale fut calculée à partir de données OCDE comme $W/(Y - T) \times 100$ avec W la compensation des employés, Y le PIB et T les taxes et subventions sur la production et les importations, afin d'obtenir la part salariale aux coûts des facteurs. Nous avons pris les valeurs de 2015 sauf pour l'Australie, la Nouvelle Zélande (2014), le Chili, la Russie, la Corée du Sud, l'Afrique du Sud (2013), la Chine, Israël, le Mexique (2012), l'Inde

(2009) et la Turquie (2006). Il faut noter ici qu'une part salariale plus importante signifie une moindre financiarisation fonctionnelle.

5.3.2 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique exploratoire qui permet de synthétiser un ensemble de variables en un nombre limité de composantes orthogonales : les axes factoriels. Chaque composante synthétise une fraction décroissante mais supplémentaire de la variance totale (inertie) des variables. Le premier axe synthétise la part la plus importante de la variance, le deuxième axe une part additionnelle mais plus petite etc. : les axes sont additifs les uns aux autres car ils sont totalement décorrélés (ROUX, 2014; VYAS et KUMARANAYAKE, 2006). Pour choisir le nombre d'axe à garder, nous avons suivi le critère de Keiser : ont été conservés les axes avec une valeur propre supérieure à la moyenne. Dans la mesure où nous avons mené une analyse en composantes principales sur les variables centrées-réduites, la somme des valeurs propres est égale au nombre des variables actives : la moyenne des valeurs propres est donc de 1. Dans notre analyse, les axes 1 à 5 remplissent ce critère⁹. Procéder à une analyse en composantes principales en premier permet d'obtenir des classes plus stables car le bruit est ôté des données via l'exclusion des axes résiduels (F. HUSSON *et al.*, 2010).

5.3.3 Classification

Nous avons ensuite procédé à une classification ascendante hiérarchique consolidée par la méthode des *k-means* (nuées dynamiques). La classification ascendante hiérarchique permet de déterminer le nombre de classes en fonction des axes factoriels obtenus par l'analyse en composantes principales, ce qui permet de ne pas choisir un nombre de classe *ex ante* de façon arbitraire. Pour décider du nombre de classes à conserver, nous nous sommes appuyé sur plusieurs critères : le nombre optimal de classes suggéré par l'algorithme¹⁰, le gain en inertie de l'ajout d'une classe supplémentaire, la longueur des liens sur le diagramme de classification et la mesure dans laquelle chaque classe est interprétable (*ibid.*). En fonction de ces critères, nous avons conservé quatre classes. La consolidation des classes par la méthode des nuées dynamiques permet ensuite de réduire l'inertie interne à chaque classe pour rendre celles-ci plus homogènes, ce qui améliore le partitionnement. Les tableaux 5.3 et 5.4 page suivante indiquent les résultats de la classification¹¹.

Pour chaque classe, le paragon (soit le pays le plus proche du barycentre de la classe) est en gras et le pays le plus distinctif (soit le pays le plus éloigné du barycentre des autres classes) est en italique. Les variables significatives permettant de caractériser une classe ont leur valeur en gras pour la classe correspondante. La significativité est donnée par la valeur-test reportée en annexe.

9. Les résultats détaillées de l'analyse en composantes principales sont fournis en annexe.

10. L'analyse statistique a été faite avec le programme FactoMineR de R.

11. Comme expliqué, la classification a été effectuée à partir des axes factoriels obtenus par l'analyse en composante principale et non depuis les données brutes. Cependant, il est plus pertinent de revenir à celles-ci pour l'analyse des résultats. Les résultats de la classification en termes des axes factoriels sont présentés en annexe.

Classe	Variables	COP21	PrimAgri	PrimIndus	SecManuf	SecConst	Ter_Serv	Ter_FIRE
1	Moyenne	171	6,79	6,94	17,96	7,1	46,13	12,38
	Écart-type	175	4,67	3,08	5,33	0,95	7,04	3,64
2	Moyenne	-6	2,46	14,12	10,86	6,48	48,4	18,4
	Écart-type	20	0,97	5,68	3,28	1,55	3,61	3,5
3	Moyenne	-15	2,1	3,61	17,61	4,93	55,06	16,25
	Écart-type	46	1,03	0,96	5,63	1,03	3,88	3,23
4	Moyenne	-40	2,08	3,56	14,04	5,38	59,25	15,38
	Écart-type	13	1,64	1,12	2,56	0,58	4,41	2,91
Moyenne		21	3,16	5,74	16	5,71	53,14	15,51
Écart-type		118	3,09	4,46	5,39	1,36	6,82	3,79

TABLEAU 5.3 – Résultats de la classification, valeurs moyennes et écart-types des variables pour chaque classe et pour l'échantillon total. Les valeurs des variables permettant de caractériser chaque classe sont en gras. Les parangons sont en gras et les pays les plus distincts en italique. Classe 1 : Brésil, Chili, Chine, *Inde*, *Mexico*, Pologne, Slovaquie, Turquie. Classe 2 : Australie, *Canada*, *Norvège*, Russie, Afrique du Sud. Classe 3 : Autriche, République Tchèque, Estonie, Allemagne, *Grèce*, Hongrie, Irlande, Israël, Italie, *Japon*, Portugal, Slovénie, Corée du Sud, Espagne, R-U., É-U. Classe 4 : Belgique, *Danemark*, Finlande, France, Pays-Bas, Nouvelle-Zélande, Suède, *Suisse*. Les variables *COP21*, *PrimAgri*, *PrimIndus*, *SecManuf*, *SecConst*, *Ter_Serv* et *Ter_Fire* sont exprimées en pourcentage.

Classe	Variables	COP21	GDPCap	EmbCO2	IUCN	GreenP	FinIndex	Wshare	ClassGHG
1	Moyenne	171	18 568	7,52	0,12	0,06	27,7	45	7,74
	Écart-type	175	6 955	17,9	0,07	0,05	15,69	8,31	3,4
2	Moyenne	-6	40 328	-0,33	0,6	0,22	16,47	59	6,27
	Écart-type	20	18 878	21,27	0,4	0,22	4,77	4,52	2,56
3	Moyenne	-15	36 712	16,83	0,54	0,19	23,05	60	4,75
	Écart-type	46	8 610	13,42	0,33	0,31	7,21	6,09	1,72
4	Moyenne	-40	45 684	27	1,58	1,05	15,84	65	3,84
	Écart-type	13	6 225	20,16	0,53	0,7	4,23	4,05	0,85
Moyenne		21	35 218	14,7	0,68	0,35	21,61	57,7	5,41
Écart-type		118	13 681	19,3	0,62	0,54	10,12	9,1	2,61

TABLEAU 5.4 – Résultats de la classification, valeurs moyennes et écart-types des variables pour chaque classe et pour l'échantillon total (suite). Les variables *COP21*, *EmbCO2*, *GreenP*, *FinIndex* et *WShare* sont exprimées en pourcentage.

5.4 Résultats : une concordance entre capitalismes nationaux et volontarismes carbone

Un premier constat est que chacune des classes est relativement hétérogène en termes de *volontarisme carbone*, comme le montrent les écart-types pour la variable *COP21*. En effet, en dernière analyse, chaque pays ayant son propre positionnement en matière de politique climatique donc la classification comporte nécessairement une part d'arbitraire et de nuances. Les classes incluent ainsi au moins un pays qui ne correspond au *volontarisme carbone* moyen : la Pologne et la Slovaquie dans la classe 1, la Norvège dans la classe 2, Israël, le Portugal, la Corée du Sud et l'Espagne dans la classe 3 et la Nouvelle-Zélande dans la classe 4. Cependant, cela ne signifie pas que notre typologie soit incohérente : nos résultats indiquent

ainsi des tendances claires d'un *volontarisme carbone très faible* vers un *volontarisme carbone haut* qui correspondent à nos hypothèses théoriques¹².

La première classe est composée de pays émergents ainsi que de la Pologne et de la Slovaquie. Cette classe a le *volontarisme carbone* le plus faible. Le secteur primaire est au cœur des intérêts économiques nationaux des pays qui la composent, comme le montrent la part de l'agriculture dans la valeur ajoutée brute — la plus élevée de toutes les classes — et la part des activités extractives et énergétiques, la seconde plus élevée. Cette classe affiche également la plus importante part pour l'industrie manufacturière et la plus faible pour le secteur tertiaire. La structure productive moyenne et la faible importance du CO2 importé indiquent que ces pays se situent au début des chaînes globales d'émission. Cette classe est également caractérisée par les préférences écologiques les plus faibles, comme le montrent les valeurs pour *IUCN* et *GreenP*. On note de fortes dynamiques de classe : la variable *FinIndex* est la plus élevée de toutes les classes tandis que la part salariale est la plus faible. La structure de classe des émissions est, quant à elle, la plus élevée.

La classe 2 est composée de pays émergents et de pays à haut revenu dont l'économie repose fortement sur le secteur primaire, en particulier les activités extractives et énergétiques. Elle affiche le deuxième *volontarisme carbone* le plus faible. De même que ceux de la classe 1, les pays de la classe 2 peuvent donc être considérés comme se situant en amont des chaînes globales de GES, comme l'étaye la part négative du CO2 incorporé aux importations nettes : cela montre qu'en moyenne les pays de cette classe sont exportateurs nets de CO2. La structure de classe des émissions est la deuxième plus inégale après la classe 1.

La classe 3 est composée pour plus de la moitié de pays d'Europe du sud, centrale et de l'est. Cette classe affiche un faible *volontarisme carbone* selon les hypothèses retenues pour les objectifs individuels des membres de l'UE. Ces pays sont caractérisés par un secteur secondaire important, notamment les activités manufacturières, au contraire de leur secteur primaire qui est faible. Le secteur tertiaire est également important. La demande politique d'environnement est similaire à celle de la classe 2. En revanche, sa structure de classe des émissions est plus égalitaire.

Enfin, la quatrième classe est composée de pays d'Europe du Nord et de la Nouvelle-Zélande. Ces pays ont un secteur tertiaire important. Ils se situent à la fin des chaînes globales de GES comme l'indique la part importante de CO2 incorporé aux importations nettes. En moyenne, ils affichent aussi la valeur la plus faible pour *FinIndex* et la part salariale la plus importante. La structure de classe des émissions y est la plus égalitaire et les pays qui la composent sont également ceux où la demande politique d'environnement est la plus forte.

5.5 Discussion : la variété des *volontarismes carbone*

À partir de nos résultats le tableau 5.5 synthétise les variétés de *volontarisme carbone* de *très faible* à *haut* selon une référence fondée sur le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2014).

12. Voir le tableau 5.5 et l'annexe pour les détails de la caractérisation des différents *volontarismes carbone* de *très faible* à *haut*.

Classe	GIEC	COP21	Variétés de volontarisme carbone	
			Classement	Résumé
1	3	171	<i>Très faible</i>	Pays émergents, secteurs primaire et secondaire importants, faible demande politique d'environnement, financiarisation accrue et structure de classe des émissions inégalitaire
2	-42	-6	<i>Faible</i>	Pays émergents et à haut revenu, exportateurs nets de GES, activités extractives et énergétiques importantes, structure de classe des émissions inégalitaire
3	-51	-15	<i>Faible</i>	Pays à haut revenu, secteurs secondaire et tertiaire importants
4	-55	-40	<i>Haut</i>	Pays à haut revenu, secteur tertiaire important, importateurs nets de GES, financiarisation moins élevée, structure de classe des émissions moins inégalitaire, forte demande politique d'environnement

TABLEAU 5.5 – Caractérisation des *volontarismes carbone* en fonction du taux de réduction d'émission de référence pour chaque classe selon le GIEC. Le scénario 2.6 du GIEC (66-100% de chance de limiter le changement climatique à 2 degrés celsius) a été utilisé comme référence IPCC, 2014. Les *volontarismes carbone* sont classés de *très faible* à *haut* selon les règles suivantes : *très faible* correspond à un accroissement des émissions de GES d'ici à 2030 ; *faible* signifie une réduction des émissions de moins de la moitié du taux de référence *moyen* signifie une réduction comprise entre la moitié et les deux tiers du taux de référence ; *haut* correspond à une réduction des émissions à partir de deux tiers du taux de référence. Les détails du calcul sont fournis dans l'annexe D.

Ces résultats suggèrent, comme première constatation, qu'expliquer le *volontarisme carbone* entièrement par les niveaux de revenu et de développement d'un pays est insuffisante. Bien que ces derniers soient liés à la structure productive, nous voyons que celle-ci semble avoir un rôle autonome : par exemple, la classe 2 est composée de pays à haut revenu et de pays émergents qui dépendent fortement du secteur primaire et qui n'affichent pas un *volontarisme carbone* très élevé alors que la valeur moyenne de *GDPCap* pour cette classe est supérieure à celle de la classe 3. Cela correspond à notre hypothèse selon laquelle les pays adoptent une politique climatique en rapport avec leur base fiscale. En effet, le *volontarisme carbone* suit les intérêts économiques nationaux : plus un pays dépend du secteur primaire, moins son *volontarisme carbone* est élevé. Ce résultat peut éclairer l'incertitude entourant l'existence d'une CKE pour les polluants globaux : le niveau de revenu et de développement ne détermine pas seul une tendance linéaire vers plus de politique environnementale. La structure sous-jacente de l'économie doit être prise en compte pour comprendre la trajectoire d'un pays en la matière.

Cela devrait, de plus, nous inciter à une vision plus nuancée que la représentation usuelle des politiques climatiques en termes d'opposition entre pays à haut revenu et pays en développement. Comme le montrent nos résultats, cette représentation n'est pas fautive, mais elle simplifie à l'excès les explications possibles du *volontarisme carbone* d'un pays donné : pays en développement comme pays à haut revenu ne sont ni homogènes entre eux ni ne constituent une entité uniforme sans dynamique

interne propre¹³. Bien sûr, cela ne signifie pas que le niveau de revenu et de développement capitaliste ne jouent aucune rôle : comme nous le voyons, il y a une tendance claire à ce que les nations les plus riches fassent preuve d'un plus grand *volontarisme carbone*. Cependant, cette conclusion doit être nuancée par la position relative des pays dans les chaînes globales de GES. À l'exception des pays à haut revenu de la classe 2, les pays les plus riches se situent en aval des chaînes de GES et affichent la plus grande part de CO₂ importé. En d'autres termes, ils ont largement délocalisé leurs émissions, comme le montrent les valeurs prises par la variable *EmbCO₂*. Ce résultat indique que la compossibilité au sein du capitalisme globalisé joue un rôle important dans la détermination du *volontarisme carbone* : les pays en fin de chaîne dépendent des pays émergents pour une large part des émissions causées par leur propre consommation. Apparaît donc comme un déterminant clef du *volontarisme carbone* au niveau global la division internationale du travail qui chevauche de près la division internationale des émissions de GES.

Bien que les niveaux de revenu et de développement doivent donc être nuancés, les préférences écologiques nationales semblent être un facteur important. Plus forte est la demande politique d'environnement, plus élevé est le *volontarisme carbone*, comme le montrent les valeurs prises par *IUCN* et *GreenP*, qui sont les plus élevées pour la classe 4 et les plus faibles pour la classe 1. Cependant, la faible demande politique d'environnement pour la classe 1 pourrait également signifier que le type d'environnementalisme qui domine dans les pays émergents s'apparente plutôt à l'environnementalisme des pauvres et à la justice environnementale (MARTINEZ-ALIER, 2002; MARTINEZ-ALIER, 2014) qu'à l'environnementalisme reflété par nos variables ressortissant davantage à l'ordre de l'environnementalisme institutionnel. L'existence d'une forte demande politique d'environnement dans les pays les plus volontaristes en matière climatique peut également refléter l'existence d'un bloc social dominant en faveur de ces politiques. Cette explication est cohérente avec les résultats en matière de dynamiques de classe interne. Il y a une tendance claire à ce que de plus faibles niveaux de financiarisation — pour les deux dimensions de la financiarisation prises en compte ici — soient associés à un plus grand *volontarisme carbone*. Cela pourrait donc indiquer que, plus la financiarisation est faible, plus les gouvernements sont volontaires en matière climatique car ils craignent moins d'affecter leur base fiscale et d'accroître la pression sur la part salariale. Enfin, nos résultats indiquent qu'une structure de classe plus égalitaire s'accompagne d'un plus grand *volontarisme carbone* : dans les pays les plus égalitaires en termes d'émission de GES, il peut être plus simple de parvenir à un compromis institutionnalisé en faveur des politiques climatiques car les émissions ne sont pas, alors, le privilège de la classe dominante.

13. À cet égard, le récent retrait des États-Unis de l'Accord de Paris constitue un bon exemple : alors que l'État fédéral se désengage, certains États et certaines villes déclarent vouloir respecter l'Accord de Paris, forment des groupes d'intérêts et vont jusqu'à signer des accords bilatéraux avec d'autres pays comme la Californie avec la Chine, outrepassant complètement l'État fédéral. Voir par exemple : <http://www.iflscience.com/environment/california-signed-climate-change-agreement-china/>; <http://www.iflscience.com/environment/two-republican-governors-joined-climate-alliance-fight-trump/> et <http://www.iflscience.com/environment/onethird-america-declares-we-still-in-paris-agreement/>. Dernier accès aux liens : 29 juin 2017.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons esquissé une typologie des *volontarismes carbone* à partir d'un ensemble de caractéristiques économiques et socio-politiques des capitalismes nationaux des pays de l'OCDE et des BRICS, afin de replacer l'analyse des politiques climatiques dans le contexte historique du capitalisme globalisé et financiarisé. Nos résultats sont cohérents avec notre raisonnement théorique. Ils indiquent que le niveau de revenu et de développement capitaliste joue un rôle substantiel dans le positionnement des pays en matière de réduction d'émission de GES. Toutefois, ces résultats indiquent également qu'il nous faut regarder au-delà afin de parvenir à une compréhension plus nuancée et plus complexe. Les intérêts économiques nationaux apparaissent ainsi jouer un grand rôle : la structure productive des économies et leur position relative dans les chaînes globales de GES doivent être prises en compte pour appréhender la trajectoire menant au *volontarisme carbone*. Les préférences écologiques nationales sont également un facteur important, comme le montre le niveau de la demande politique d'environnement dans les pays les plus ambitieux en matière climatique. Les résultats pour les dynamiques de classe internes invitent à conclure, quant à eux, qu'une structure de classe des émissions plus égalitaire joue en faveur d'un plus fort *volontarisme carbone* alors que le procès de financiarisation agit comme un frein : une financiarisation fonctionnelle et une accumulation financière moins importantes s'accompagnent, aussi, d'un *volontarisme carbone* plus prononcé.

À partir de ces résultats, nous avons donc élaboré une typologie des *volontarismes carbone* allant de *très faible* à *haut*. Les pays les moins volontaristes sont ceux situés en amont des chaînes globales de GES et reposant fortement sur leur secteur primaire, ayant une plus faible demande politique d'environnement et une structure de classe des émissions plus inégalitaire. Les pays les plus volontaristes sont, à l'inverse, ceux affichant la demande politique d'environnement la plus élevée, une structure de classe des émissions plus égalitaire, une plus faible financiarisation, qui reposent davantage sur le secteur tertiaire et qui importent une large part de leurs émissions de CO₂. Ce chapitre est donc complémentaire à la littérature en termes de théorie des jeux sur les AIE : nos résultats mettent en évidence les facteurs sous-jacents au comportement des États en prenant en compte les caractéristiques économiques et socio-politiques de leur positionnement dont la combinaison et les interactions produisent le *volontarisme carbone*. Une piste de recherche prometteuse serait, à présent, d'analyser plus avant les dispositifs institutionnels nationaux en matière environnementale et climatique, la mesure dans laquelle ils reflètent le *volontarisme carbone* du pays considéré et leur correspondance avec les modèles de capitalisme.

En termes de politique publique, une conclusion possible du présent travail est que les chaînes globales de GES devraient être prises en compte dans les négociations internationales sur le climat et dans les politiques climatiques. Une combinaison de mesures semble appropriée : par exemple, œuvrer à de plus amples transferts financiers et technologiques vers les pays exportateurs nets de GES pour favoriser leur transition vers une économie bas-carbone tout en mettant en place des taxes kilométriques sur les importations pour aider à la relocalisation des activités productives vers les pays aux réglementations climatiques plus sévères. Ce travail prétend, *in fine*, que des politiques de réduction des inégalités et de dé-financiarisation s'avèreraient, d'un point de vue climatique *aussi*, singulièrement pertinentes.

Conclusion de la deuxième partie

Les trois chapitres composant cette partie ont permis d'esquisser une analyse conjointe des dynamiques de l'énergie, du carbone et de l'accumulation du capital. D'une part, fordisme et néolibéralisme ont été caractérisés en termes de leur rapport social à l'énergie et de la relation PIB-CO₂. D'autre part, les *volontarismes carbone* ont été reliés à des caractéristiques structurelles des capitalismes nationaux des principaux pays émetteurs ressortissant au capitalisme globalisé et financiarisé contemporain. Le chapitre 3 montre que le fordisme était fondé sur un rapport social extensif à l'énergie, avec une forte augmentation de la quantité d'énergie entrant dans le système de production à l'appui de gains de productivité du travail importants qui ancrèrent le compromis social de ce régime. Le néolibéralisme, à l'inverse, est bâti sur un rapport social plus intensif à l'énergie mais également sur une utilisation délocalisée de celle-ci. Cela s'est accompagné d'une érosion des gains de productivité du travail et du compromis social hérité du régime précédent. Ces caractéristiques se retrouvent dans l'analyse de la relation entre PIB et émissions de CO₂ menée dans le chapitre 4. Ce dernier indique que le fordisme était un régime extensif en CO₂ avec une forte influence de la croissance du PIB sur les émissions. À court terme il n'y a pas de découplage entre le PIB et les émissions tandis qu'à long terme apparaissent un découplage relatif pour la croissance supérieure à sa moyenne historique et un découplage absolu pour la croissance inférieure à sa moyenne historique. Toutefois, les épisodes de cette dernière sont peu nombreux dans ce régime d'accumulation. Le régime néolibéral apparaît être plus intensif étant donné la faiblesse relative et la non significativité des coefficients associés aux variables de PIB, notamment à court terme. Les résultats font également ressortir une asymétrie dans la relation CO₂-PIB, avec des coefficients distincts pour les deux rythmes de croissance dans la plupart des cas testés. Ces deux chapitres permettent donc de caractériser les deux régimes d'accumulation fordiste et néolibéral d'un point de vue physique en termes d'énergie et d'émissions de CO₂, en écho aux caractérisations socioéconomiques habituellement menées dans les littératures régulationniste et post-keynésienne. Le tableau 5.6 page suivante résume cette caractérisation.

Le chapitre 5 a adopté un prisme spatial pour replacer les ambitions en matière de réduction d'émission de gaz à effet de serre dans le contexte du capitalisme contemporain globalisé et financiarisé. Ce chapitre illustre l'importance de la prise en compte des facteurs économiques et socio-politiques structurels des pays qui ne peuvent dès lors s'appréhender uniquement comme des entités homogènes et rationnelles poursuivant un objectif de maximisation d'une fonction de bénéfice dans une négociation stratégique. Plusieurs types de *volontarismes carbone* ressortent, associés à certains types de capitalismes

Régime	Énergie	CO2
Fordisme	Rapport social à l'énergie extensif	Extensif en CO2 Fort ajustement des émissions aux écarts à l'équilibre avec le PIB Découplage absolu à long terme avec la croissance inférieure à sa moyenne historique
Néolibéralisme	Rapport social à l'énergie intensif Délocalisation de l'utilisation de l'énergie	Intensif en CO2 Ajustement plus faible du CO2 aux écarts à l'équilibre avec le PIB Pas de découplage, surtout si l'on prend en compte les émissions en approche consommation

TABLEAU 5.6 – Synthèse du chapitre 4. Caractérisation physique du fordisme et du néolibéralisme en termes d'énergie et de carbone.

nationaux. Le tableau 5.7 résume en deux grands types les résultats obtenus.

Capitalisme	Volontarisme carbone
Capitalisme industriel, inégalitaire et à faible sensibilité environnementale	Faible
Capitalisme de service à industrie délocalisée, plus égalitaire et à forte sensibilité environnementale	Haut

TABLEAU 5.7 – Résumé des résultats du chapitre 5.

Ces chapitres réunis esquissent ce qu'il pourrait advenir d'une intégration accrue de l'École de la Régulation et de l'Économie écologique pour tendre vers une analyse conjointe des dynamiques environnementales et socioéconomiques et ainsi aboutir à une compréhension systémique des interactions et interdépendances entre sphères environnementale, sociale et économique. Caractériser les régimes d'accumulation en termes physiques, analyser comment la contrainte environnementale cristallise un certain nombre de rapports de force aboutissant à des compromis sociaux institutionnalisés et replacer les politiques climatiques dans le contexte du capitalisme contemporain constituent à ce titre un premier pas.

Embrasser le monde fini

Notre recherche a porté sur la soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes. Sa problématique générale a donc été relative aux interconnexions et interdépendances entre accumulation du capital et dynamiques environnementales. Cette problématique fut déclinée de deux manières : d'une part par l'analyse des liens entre soutenabilité et caractéristiques fondamentales de l'accumulation du capital — i.e. les rapports sociaux invariants du capitalisme et le système monétaire — d'autre part, en replaçant les dynamiques de l'énergie et du carbone dans le contexte des régimes d'accumulation et des capitalismes nationaux contemporains.

Rappel des résultats

Le premier chapitre a souligné l'incomplétude du cadre analytique de certains économistes écologiques : ceux-ci développent une critique de la croissance sans en faire de même pour l'organisation socioéconomique qui l'engendre, le mode de production capitaliste. En mobilisant deux exemples historiques — l'effondrement supposée de la civilisation pascuane et le processus d'adoption des énergies fossiles — ainsi que les théories éco-marxistes étayées par des données empiriques, nous avons montré, à la suite de plusieurs auteurs, que la mise au travail de la nature n'est indépendante ni de l'organisation socioéconomique dans laquelle elle intervient ni des rapports de production constitutifs de cette organisation. Ceux-ci ne peuvent donc être ignorés dans une analyse des relations société-nature.

Le chapitre 2 a permis d'enclencher un dialogue avec les économistes écologiques et post-keynésiens sur la question de la monnaie et du système monétaire, deux champs d'étude privilégiés des seconds. Ce chapitre s'est attaqué à une idée reçue chez certains économistes écologiques selon laquelle la création de monnaie par la dette portant intérêt empêcherait d'atteindre un état stationnaire en phase avec les limites écologiques de la planète. Celle-ci est en contradiction directe avec l'économie monétaire post-keynésienne. La théorie de la monnaie endogène et la tradition cambridgienne-kaleckienne permettent de montrer que c'est la croissance de la production qui entraîne celle de la masse monétaire, d'une part, et qu'un état stationnaire peut parfaitement émerger en présence d'un taux d'intérêt positif du moment que des profits nets sont réalisés, d'autre part, ce qui est possible grâce à la consommation tirée de la richesse.

Le chapitre 3 a caractérisé les régimes d'accumulation fordiste et néolibéral en fonction de leur rapport social à l'énergie. Le fordisme était un régime extensif en énergie, dont la quantité incorporée

au processus de production augmentait rapidement et permettait de soutenir une utilisation intensive du travail et de forts gains de productivité. Ces derniers fondaient un compromis social favorable au travail. Le néolibéralisme est, lui, caractérisé par une utilisation plus intensive de l'énergie et de moindres gains de productivité. Toutefois, ce changement dans le rapport social à l'énergie s'accompagne d'une délocalisation de l'utilisation de l'énergie, ce qui induit un phénomène de trompe-l'œil dans l'amélioration de l'efficacité énergétique du PIB.

Le chapitre 4 a prolongé sur le plan économétrique le chapitre 3. Nous y avons étayé le contraste entre fordisme et néolibéralisme, cette fois-ci du point de vue du carbone. Les résultats de ce chapitre ont confirmé le caractère extensif du fordisme et le caractère intensif du néolibéralisme vis-à-vis du carbone. Ils ont également mis en lumière l'asymétrie de la relation entre PIB et CO₂ : une accélération de la croissance du PIB a, dans la plupart des cas, de plus grands effets sur les émissions de CO₂ qu'une décélération. Enfin, la présence de co-intégration ne plaide pas en faveur d'une trajectoire de type courbe de Kuznets environnementale, *a fortiori* si l'on tient compte des émissions délocalisées.

S'écarter du prisme historique des deux chapitres précédents, le cinquième et dernier chapitre a adopté un prisme spatial pour replacer les dynamiques du carbone et de l'énergie, ici entrevues à l'aune des engagements en matière de réduction de gaz à effet de serre, dans les capitalismes nationaux contemporains. Bien que peu ou prou attendus, les résultats de ce chapitre permettent de formaliser les ambitions climatiques en partant de certaines caractéristiques fondamentales des économies nationales. Ressort en particulier le rôle clef de la structure productive des économies et de la demande politique d'environnement mais également de la position relative dans les chaînes globales de gaz à effet de serre et de la structure de classe des émissions. La financiarisation paraît également jouer un rôle. Ce chapitre a, *in fine*, souligné l'importance de la compossibilité définie au chapitre 3 qui apparaît structurante dans le contexte du capitalisme globalisé et financiarisé.

Retour sur la problématique

L'analyse développée au fil de ces cinq chapitres indique donc que les dynamiques environnementales sont largement produites par les rapports de production constitutifs du capitalisme, ceux-ci forgeant les formes institutionnelles, elles-mêmes à la base des différents régimes d'accumulation. Les conditions environnementales de l'existence exercent, quant à elles, des contraintes qui peuvent engendrer les conditions de la crise économique, ou, du moins, les renforcer. Ce faisant, les contraintes environnementales peuvent également s'avérer un facteur parmi d'autres des mutations des régimes d'accumulation. À l'inverse, les caractéristiques structurelles des économies conditionnent l'émergence de nouvelles régulations environnementales. Les contraintes environnementales sont ainsi bel et bien intégrées aux rapports de classe cristallisés dans des compromis institutionnalisés.

Toutefois, au-delà des différences institutionnelles, une constatation invariante est que l'accumulation du capital qui émerge des rapports de production du capitalisme provoque une mise au travail de la nature selon une temporalité qui n'est pas celle des ressources naturelles. Cette contrainte ne fut pas immédiatement visible dans le mode de production capitaliste grâce à l'abondance de l'énergie fossile bon

marché, ressource stock qui permet de dissocier temps économiques et temps naturels. Cette discordance des temps ne peut être dépassée dans la mesure où la thermodynamique interdit de parvenir à un découplage absolu entre production et intrants environnementaux. L'accumulation du capital est donc insoutenable et la régénération des conditions environnementales de l'existence ne peut être mise en œuvre que dans le cadre d'un ré-alignement des temps économiques sur les temps naturels. La question de la compatibilité d'un tel ré-alignement avec le mode de production capitaliste est donc clairement posée.

Apports de la thèse

Un premier apport de ce travail, notamment des chapitres 1 et 3, est d'étayer et de développer les réserves soulevées par ANDERSON et M'GONIGLE (2012) et OZKAYNAK *et al.* (2012) et BUCH-HANSEN (2014) sur le déficit de prise en compte des formations socioéconomiques par l'Économie écologique.

Toutefois, cette recherche ne se contente pas d'étayer ces réserves — et c'est son *deuxième apport* : elle tente d'y répondre partiellement. Cela permet de donner à voir le tissage serré des liens qui unissent dynamiques socioéconomiques et dynamiques de l'énergie et du carbone en montrant comment celles-ci ne sont dissociables ni des rapports de production capitalistes, ni des compromis institutionnalisés qui forgent les régimes d'accumulation ni des caractéristiques structurelles des capitalismes nationaux contemporains.

En s'inscrivant dans la perspective d'une analyse institutionnaliste, ce travail établit un pont entre École de la régulation et Économie écologique au niveau macroéconomique, jusque-là peu investi. *Il en découle le troisième apport* de ce travail qui est ainsi d'approfondir la prise en compte de la contrainte environnementale dans le cadre analytique régulationniste.

En quatrième apport, ce travail permet de doter les analyses économétriques visant à quantifier les relations économie-environnement d'un cadre théorique qui tient explicitement compte des spécificités de la formation socioéconomique dans lesquelles interviennent ces relations. Autrement dit, cela permet de dépasser le caractère souvent purement empirique de ces travaux pour les ancrer dans un cadre historicisé et contextualisé ; celui-ci mène à une caractérisation plus fine des relations économie-environnement en différenciant les régimes d'accumulation du capital, eux-mêmes articulés autour de modalités différentes et, donc, autour d'un rapport à la nature différent.

Enfin, ce travail de thèse s'inscrit dans la démarche actuelle de la macroéconomie écologique qui consiste en l'intégration de différentes approches. Jusqu'à présent il s'agissait essentiellement de l'Économie écologique et de l'Économie post-keynésienne. En confirmant que la macroéconomie monétaire post-keynésienne est compatible avec certains des principes fondamentaux de l'Économie écologique, ce travail de thèse renforce cette intégration en cours. Plus encore, par son positionnement théorique original, ce travail de thèse participe d'une dimension qualitative plus historique et institutionnaliste qui doit dorénavant ressortir à la macroéconomie écologique et souligne la complémentarité entre théorisation éco-marxiste et critique thermodynamique de la croissance.

Perspectives de recherche

Au-delà des pistes d'approfondissement mentionnées dans certains chapitres, ce travail de thèse a donné le jour à de nombreuses pistes de recherche, tant théoriques qu'empiriques. La liste qui suit n'est en rien exhaustive.

A, notamment, surgi la nécessité de travailler à une meilleure intégration des explications environnementales et socioéconomiques des crises pour aboutir, peut-être, à un cadre théorique unifié dans le cadre de la macroéconomie écologique. Ainsi, comme nous l'avons écrit dans la conclusion du chapitre 3, il reste à expliquer comment le changement dans le rapport social à l'environnement contribue au passage d'un régime à l'autre.

À titre d'exemple, si l'on resserre à nouveau la focale sur le volet énergétique de la contrainte physique, en guise de prolongement du chapitre 3, nous pouvons constater l'étroite corrélation entre productivité horaire et efficacité thermodynamique agrégées pour l'Union européenne à 15 pays¹⁴ (figure 5.2) entre 1960 et 2009. Cette dernière traduit la capacité à tirer du *travail utile* de l'exergie incorporée au processus de production. En d'autres mots, elle indique la part de services énergétiques extraite de l'énergie de qualité suffisante pour produire un travail physique, ou encore, si l'on reformule dans les termes de la seconde contradiction du capitalisme, elle quantifie l'accès aux services énergétiques.

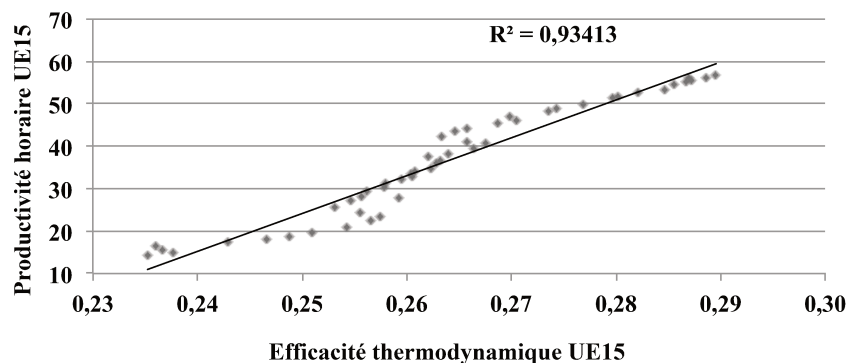


FIGURE 5.2 – Corrélation entre efficacité thermodynamique et productivité horaire. Sources : calculs de l'auteur d'après les données de la *Total Economy Database* et de SERRENHO *et al.* (2014).

Nous pouvons aussi constater que croissance de la productivité et gains thermodynamiques fluctuent de façon similaire, comme l'illustre la figure 5.3.

L'interprétation graphique de cette figure suggère que les gains thermodynamiques pourraient exercer une force de rappel sur la croissance de la productivité. Cela invite donc à penser que l'amélioration de l'accès aux services énergétiques et l'accroissement de la productivité horaire peuvent être liés. Cette hypothèse est, au reste, cohérente avec les résultats de notre troisième chapitre et se voit étayée par les tests de causalité dont les résultats sont indiqués dans le tableau 5.8.

Les résultats de ces tests indiquent une causalité de Granger bi-directionnelle entre efficacité thermo-

14. Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Suède, Royaume-Uni

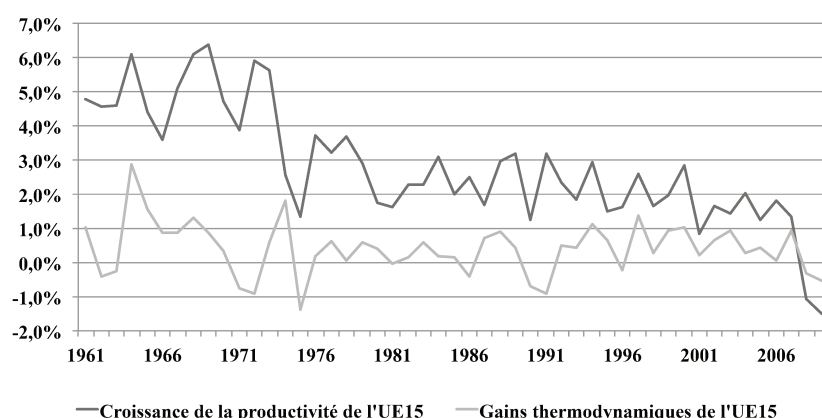


FIGURE 5.3 – Croissance de la productivité horaire et gains thermodynamiques pour l’UE15 de 1960 à 2009. Sources des données : calculs de l’auteur d’après les données de la *Total Economy Database* et de SERRENHO *et al.* (ibid.).

Tests de causalité de Toda-Yamamoto sur les variables en niveau co-intégrées			
	χ^2	df	P-value
Effi. thermo cause productivité	6,603	3	0,086
Tout cause productivité	6,603	3	0,086
Productivité cause effi. thermo	6,917	3	0,075
Tout cause effi. thermo	6,917	3	0,075

TABLEAU 5.8 – Tests de causalité de Toda-Yamamoto entre l’efficacité thermodynamique et la productivité horaire (EU15 1960-2009). « Tout cause X » signifie que Y et X_{t-j} causent X. Sources des données : *Total Economy Database* et SERRENHO *et al.* (ibid.).

dynamique et productivité horaire. Ils sont, bien sûr, très préliminaires car ils portent sur les données agrégées de 15 pays de l’Union européenne et ne différencient pas selon les types de services énergétiques (chaleur, travail mécanique, lumière etc.). Ces résultats peuvent donc masquer des réalités différentes d’un pays à l’autre ou d’un type de service énergétique à l’autre. Néanmoins, ils invitent à s’interroger sur les mécanismes sous-jacents à cette possible bi-causalité. En particulier, nous pouvons nous demander s’il y a, là, la manifestation d’un phénomène de type seconde contradiction : le ralentissement des gains thermodynamiques, c’est-à-dire le ralentissement de l’amélioration de l’accès aux services énergétiques, est-il une cause physique du ralentissement des gains de productivité ayant entraîné l’entrée en crise du fordisme telle que théorisée par les régulationnistes ? À l’inverse, il est possible, par exemple, de s’interroger sur le rôle de la baisse du taux d’investissement productif qui accompagne l’émergence du néolibéralisme dans le ralentissement des gains thermodynamiques ou sur le rôle des autres facteurs avancés pour expliquer la baisse tendancielle de la productivité.

Au-delà de l’analyse quantitative, il s’agira de mettre en évidence l’entrelacs des dynamiques socioéconomiques et des dynamiques écologiques dans le cadre des compromis institutionnalisés qui forgent les capitalismes contemporains. À titre d’hypothèse de recherche future, nous pouvons ainsi mentionner celle qui fait de la responsabilité sociale et environnementale des entreprises le levier d’un nouveau compromis entre parties prenantes des centres d’accumulation décentralisés en remplacement du principe

de la maximisation de la valeur actionnariale et donc, éventuellement, le levier d'une transition vers un nouveau type de régime d'accumulation¹⁵.

Ce travail de thèse invite alors à systématiser la prise en compte des caractéristiques structurelles des régimes d'accumulation du capital pour l'étude des relations économie-nature. Un moyen de procéder peut être d'intégrer aux modélisations en macroéconomie écologique de certaines de ces caractéristiques structurelles. Il en est ainsi, par exemple, d'une dimension qui manque actuellement dans les modèles stock-flux cohérents écologiques, pourtant citée comme piste de recherche à mettre en œuvre : la financiarisation (NAQVI, 2015). En outre, notons que la modélisation stock-flux cohérente a constitué un point de rencontre entre Économie post-keynésienne et École de la régulation pour l'étude de la financiarisation et ce, avant d'être l'espace d'intégration de l'Économie post-keynésienne et de l'Économie écologique. Dès lors, nous pouvons envisager qu'elle serve également à une intégration des trois approches. À titre de proposition, nous joignons en annexe un travail en cours qui modélise une dimension de la financiarisation — la maximisation de la valeur actionnariale — et la performance environnementale des entreprises dans un cadre macroéconomique stock-flux cohérent (annexe E).

Considérations de politique publique

Les résultats de ce travail de recherche ne sont pas aisément traduisibles en recommandations de politiques publiques. Ils engagent néanmoins à considérer les politiques environnementales, et notamment leurs dimensions énergétique et climatique, comme un sous-ensemble structurant des relations sociales. Par conséquent, un constat général ressort de ces considérations : la transition vers une société soutenable ne peut s'accommoder de changements à la marge portant sur quelques réglementations environnementales. *Ce sont les rapports sociaux fondamentaux engendrant la non-soutenabilité de nos sociétés dont il faut se soucier en premier lieu pour aboutir, avant qu'il ne soit trop tard, à une organisation socioéconomique compatible avec les limites écologiques de la planète.* À ce titre, par exemple, la transition énergétique ne semble pas pouvoir être pensée sans tenir compte, en même temps, des antagonismes de classe. Chaque chapitre ouvre néanmoins la voie à différentes propositions.

Le chapitre 2 indique qu'une réforme du système monétaire dans une perspective de soutenabilité n'aurait pas besoin de s'attacher à remettre en cause les mécanismes historiques de création monétaire par la dette portant intérêt. À l'inverse, celle-ci pourrait offrir un levier d'action puissant, à travers, par exemple, des taux d'intérêts différenciés selon le degré de soutenabilité des investissements à financer. Les chapitres 3 et 5 suggèrent, à leur tour, que l'émergence de nouvelles régulations environnementales ne peut se faire indépendamment de nouveaux compromis sociaux et donc, de nouvelles régulations portant sur les dimensions socioéconomiques des capitalismes contemporains. Le chapitre 5 décline, *in fine*, une série de mesures concrètes qui aideraient à renforcer les réglementations climatiques, comme une taxe carbone aux frontières, la relocalisation des activités productives ou la lutte contre les inégalités.

À rebours d'une foi excessive dans le génie humain et la technologie, à rebours de la rationalité moderne bâtie sur une fiction faisant de l'expansion continue et infinie la fin en soi de toute entreprise

15. Hypothèse soulevée par Robert Guttman lors d'un séminaire du Centre d'Économie de Paris-Nord en juin 2017.

humaine, *embrasser le monde fini* signifie développer les outils analytiques pour penser l'humanité dans les limites de la biosphère. Autrement dit, faire de la finitude du monde un élément structurant de l'analyse des sociétés humaines et non plus la frontière à dépasser d'un système socioéconomique qui fait d'elle une contradiction fondamentale. C'est la tâche que s'est donnée le champ émergent de la macroéconomie écologique — ou macroéconomie post-croissance — et à laquelle ce travail de recherche s'est modestement greffé.

Bibliographie

- AGLIETTA, Michel 1997, *Régulation et crises du capitalisme*, 65, Paris : Odile Jacob, 486 p.
- 2003, Le renouveau de la monnaie, in : *L'économie mondiale 2003*, Paris : La Découverte, p. 91–106.
- AJMI, Ahdi Noomen *et al.* 2015, On the relationships between CO2 emissions, energy consumption and income : The importance of time variation, *Energy Economics* 49, p. 629–638, DOI : 10.1016/j.eneco.2015.02.007.
- AMABLE, Bruno 2005, *Les cinq capitalismes : diversité des systèmes économiques et sociaux dans la mondialisation*, Paris : Éditions du Seuil.
- AMABLE, Bruno et Stefano PALOMBARINI 2008, A neorealist approach to institutional change and the diversity of capitalism, *Socio-Economic Review* 7.1, p. 123–143, DOI : 10.1093/ser/mwn018.
- ANDERSON, Blake et Michael M'GONIGLE 2012, Does ecological economics have a future? : Contradiction and reinvention in the age of climate change, *Ecological Economics, The Economics of Degrowth* 84, p. 37–48, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2012.06.009.
- ANDREWS, Donald W. K. et Werner PLOBERGER 1994, Optimal Tests when a Nuisance Parameter is Present Only Under the Alternative, *Econometrica* 62.6, p. 1383, DOI : 10.2307/2951753.
- ANGERIZ, Alvaro, John S. L. McCOMBIE et Mark ROBERTS 2009, Increasing Returns and the Growth of Industries in the EU Regions : Paradoxes and Conundrums, *Spatial Economic Analysis* 4.2, p. 127–148, DOI : 10.1080/17421770902833972.
- APERGIS, Nicholas 2016, Environmental Kuznets curves : New evidence on both panel and country-level CO2 emissions, *Energy Economics* 54, p. 263–271, DOI : 10.1016/j.eneco.2015.12.007.
- ARESTIS, Philip et Peter HOWELLS 2002, The "Great Inflation", 1520-1640 : Early views on endogenous money, in : *Money, Macroeconomics and Keynes*, sous la dir. de Philip ARESTIS, Meghnad DESAI et Sheila Dow, Routledge.
- AYRES, Robert U. 1999, The second law, the fourth law, recycling and limits to growth, *Ecological Economics* 29.3, p. 473–483, DOI : 10.1016/S0921-8009(98)00098-6.
- AYRES, Robert U., Jeroen C.J.M. van den BERGH et John M. GOWDY 1998, Viewpoint : Weak versus strong sustainability, *Tinbergen Institute Discussion Paper IT 98-103/3*.
- AYRES, Robert U. et Vlasios VOUDOURIS 2014, The economic growth enigma : Capital, labour and useful energy?, *Energy Policy* 64, p. 16–28, DOI : 10.1016/j.enpol.2013.06.001.
- AYRES, Robert U. et Benjamin S. WARR 2005, Accounting for growth : the role of physical work, *Structural Change and Economic Dynamics* 16.2, p. 181–209, DOI : 10.1016/j.strueco.2003.10.003.
- AZOMAHOU, Théophile, François LAISNEY et Phu NGUYEN VAN 2006, Economic development and CO2 emissions : A nonparametric panel approach, *Journal of Public Economics* 90.6, p. 1347–1363, DOI : 10.1016/j.jpubeco.2005.09.005.
- BAHN, Paul G. et John R. FLENLEY 1992, *Easter Island, Earth Island*, New York : Thames & Hudson Ltd, 240 p.
- BANERJEE, Anindya, Juan DOLADO et Ricardo MESTRE 1998, Error-correction Mechanism Tests for Cointegration in a Single-equation Framework, *Journal of Time Series Analysis* 19.3, p. 267–283, DOI : 10.1111/1467-9892.00091.

- BARCA, Stefania 2011, Energy, property, and the industrial revolution narrative, *Ecological Economics* 70.7, p. 1309–1315, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.03.012.
- BARRETT, Adam B. 2017, Stability of zero-growth economics analysed with a Minskyan model, *arXiv preprint arXiv :1704.08161*.
- BARRETT, Scott 1994, Self-enforcing international environmental agreements, *Oxford Economic Papers*, p. 878–894, URL : <http://www.jstor.org/stable/2663505>.
- 2005, The theory of international environmental agreements, in : *Handbook of Environmental Economics : Economywide and International Environmental Issues*, sous la dir. de Karl-Göran MÄLER et Jeffrey R. VINCENT, t. 3, Elsevier, p. 1457–1516.
- BAUMOL, William J., Robert E. LITAN et Carl J. SCHRAMM 2007, *Good Capitalism, Bad Capitalism, and the Economics of Growth and Prosperity*, New Haven : Yale University Press, 336 p.
- BECKER, Joachim et Werner RAZA 2000, Theory of regulation and political ecology : an inevitable separation?, *Économie et Sociétés, Théorie de la Régulation* 11, p. 55–70.
- BELLAMY FOSTER, John 1999, Marx's Theory of Metabolic Rift : Classical Foundations for Environmental Sociology 1, *American journal of sociology* 105.2, p. 366–405.
- 2002, Capitalism and Ecology : The Nature of the Contradiction, *Monthly Review* 54.4, p. 8, DOI : 10.14452/MR-054-04-2002-08_2.
- 2011, Capitalism and Degrowth An Impossibility Theorem, *Monthly Review* 62.8.
- 2015a, *Author's Response (Marxism and Ecology)*, Great Transition Initiative, URL : <http://www.greattransition.org/commentary/author-response-marxism-and-ecology-john-bellamy-foster> (visité le 10/05/2016).
- 2015b, *Marxism and Ecology : Common Fonts of a Great Transition*, Great Transition Initiative.
- BELLAMY FOSTER, John et Hannah HOLLEMAN 2014, The theory of unequal ecological exchange : a Marx-Odum dialectic, *The Journal of Peasant Studies* 41.2, p. 199–233, DOI : 10.1080/03066150.2014.889687.
- BERG, Matthew, Brian HARTLEY et Oliver RICHTERS 2015, A Stock-Flow Consistent Input-Output Model with Applications to Energy Price Shocks, Interest Rates, and Heat Emissions, *New Journal of Physics* 17, DOI : <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/17/1/015011>.
- BERR, Eric 2009, Keynes and Sustainable Development, *International Journal of Political Economy* 38.3, p. 22–38, DOI : 10.2753/IJP0891-1916380302.
- BERTHE, Alexandre et Luc ÉLIE 2015, Mechanisms explaining the impact of economic inequality on environmental deterioration, *Ecological Economics* 116, p. 191–200, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2015.04.026.
- BINSWANGER, Mathias 2009, Is there a growth imperative in capitalist economies? a circular flow perspective, *Journal of Post Keynesian Economics* 31.4, p. 707–727, DOI : 10.2753/PKE0160-3477310410.
- BLAUWHOF, Frederik Berend 2012, Overcoming accumulation : Is a capitalist steady-state economy possible?, *Ecological Economics* 84, p. 254–261.
- BODEN, T.A., R.J. ANDRES et G. MARLAND 2016, *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions*.
- BOURDIEU, Pierre 1997, *Méditations pascaliennes : éléments pour une philosophie négative*, Paris : Seuil.
- BOYER, Robert 2000, Is a Finance-led growth regime a viable alternative to Fordism? A preliminary analysis, *Economy and Society* 29.1, p. 111–145, DOI : 10.1080/030851400360587.
- 2004, *Théorie de la régulation. Tome 1 : les fondamentaux*, Paris : La Découverte.
- 2015, *Économie politique des capitalismes*, Paris : La Découverte, 376 p.
- BOYER, Robert et Yves SAILLARD 2002, *Regulation Theory : The State of the Art*, Routledge, 401 p.
- BRENNER, Robert 1977, The origins of capitalist development : a critique of neo-Smithian Marxism, *New Left Review* 104.1, p. 25–92.
- BRENNER, Robert et Mark GLICK 1991, The regulation approach : theory and history, *New Left Review* 188, p. 45–119.

- BRUNS, Stephan B., Christian GROSS et David I. STERN 2014, Is There Really Granger Causality Between Energy Use and Output?, *The Energy Journal* 35.4, DOI : 10.5547/01956574.35.4.5.
- BUCH-HANSEN, Hubert 2014, Capitalist diversity and de-growth trajectories to steady-state economies, *Ecological Economics* 106, p. 167–173, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2014.07.030.
- BURKE, Paul J., Md. SHAHIDUZZAMAN et David I. STERN 2015, Carbon dioxide emissions in the short run : The rate and sources of economic growth matter, *Global Environmental Change* 33, p. 109–121, DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2015.04.012.
- BURKETT, Paul 2004, Marx's reproduction schemes and the environment, *Ecological Economics* 49.4, p. 457–467, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2004.02.007.
- CAHEN-FOUROT, Louison et Cédric DURAND 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.
- CAHEN-FOUROT, Louison et Marc LAVOIE 2016, Ecological monetary economics : A post-Keynesian critique, *Ecological Economics* 126, p. 163–168, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.03.007.
- CAMINEL, Thierry et al. 2014, *Produire plus, polluer moins, l'impossible découplage?*, Paris : Les Petits Matins et Institut Veblen.
- CARPENTER, Seth et Selva DEMIRALP 2012, Money, reserves, and the transmission of monetary policy : Does the money multiplier exist?, *Journal of Macroeconomics* 34.1, p. 59–75, DOI : 10.1016/j.jmacro.2011.09.009.
- CAVERZASI, Eugenio et Antoine GODIN 2015, Post-Keynesian stock-flow-consistent modelling : a survey, *Cambridge Journal of Economics* 39.1, p. 157–187, DOI : 10.1093/cje/beu021.
- CCNUCC 2015, Accord de Paris, *Adoption de l'Accord de Paris FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1*.
- CHANCEL, Lucas et Thomas PIKETTY 2015, *Carbon and inequality : from Kyoto to Paris. Trends in the global inequality of carbon emissions (1998-2013) and prospects for an equitable adaptation fund*, Paris School of Economics.
- CHEN, Ping-Yu, Sheng-Tung CHEN et Chi-Chung CHEN 2012, Energy consumption and economic growth : New evidence from meta analysis, *Energy Policy* 44, p. 245–255, DOI : 10.1016/j.enpol.2012.01.048.
- CHESNAIS, François et Claude SERFATI 2003, Ecologie et conditions physiques de la reproduction sociale, in : *Capital contre nature*, sous la dir. de Jean-Marie HARRIBEY et Michael LÖWY, Presses Universitaires de France, p. 217.
- CHESTER, Lynne 2010, Determining the economic-environment relation : a regulationist approach, *International Journal of Green Economics* 4.1, p. 17–42.
- 2014, « Understanding the conjunction of capitalism's ecological, energy and economic crises for a successful climate change exit strategy », in : Association for Heterodox Economics Conference, University of Greenwich, London.
- CIPOLLA, Carlo M. 1955, La prétendue « révolution des prix » : réflexions sur l'« expérience italienne », *Annales. Histoire, Sciences Sociales* 10.4, p. 513–516, DOI : 10.3406/ahess.1955.2485.
- CLARK, Brett et John BELLAMY FOSTER 2009, Ecological Imperialism and the Global Metabolic Rift : Unequal Exchange and the Guano/Nitrates Trade, *International Journal of Comparative Sociology* 50.3, p. 311–334, DOI : 10.1177/0020715209105144.
- CLÉVENOT, Mickaël, Yann GUY et Jacques MAZIER 2010, Investment and the rate of profit in a financial context : the French case, *International Review of Applied Economics* 24.6, p. 693–714, DOI : 10.1080/02692170903426112.
- COHEN, Benjamin J. 2007, The transatlantic divide : Why are American and British IPE so different?, *Review of International Political Economy* 14.2, p. 197–219, DOI : 10.1080/09692290701288277.
- COMMISSION EUROPÉENNE, *EU ETS Handbook*, Union européenne.
- COMMON, Michael S et Sigrid STAGL 2005, *Ecological economics : an introduction*, Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press.
- COMMONER, Barry 1972, *L'encerclement - problèmes de survie en milieu terrestre*, Éditions du Seuil.

- CORDONNIER, Laurent 2006, Le profit sans l'accumulation : la recette du capitalisme gouverné par la finance, *Innovations, Cahiers d'économie de l'innovation* 1, p. 79–108.
- COSTANTINI, Valeria, Giorgia SFORNA et Mariangela ZOLI 2016, Interpreting bargaining strategies of developing countries in climate negotiations. A quantitative approach, *Ecological Economics* 121, p. 128–139, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2015.11.026.
- COSTANZA, Robert 1989, What is ecological economics?, *Ecological Economics* 1.1, p. 1–7, DOI : 10.1016/0921-8009(89)90020-7.
- COSTANZA, Robert, Gar ALPEROVITZ *et al.* 2013, *Building a sustainable and desirable economy-in-society-in-nature*, New-York : United Nations Division for Sustainable Development.
- COSTANZA, Robert, John H. CUMBERLAND *et al.* 2015, *An introduction to ecological economics*, Boca Raton, Floride, États-Unis. : CRC Press.
- COSTANZA, Robert, Richard B. HOWARTH *et al.* 2016, Influential publications in ecological economics revisited, *Ecological Economics* 123, p. 68–76, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.01.007.
- COURT, Victor et Florian FIZAINE 2017, Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions, *Ecological Economics* 138, p. 145–159, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2017.03.015.
- CRAFTS, Nicholas 2004, Steam as a general purpose technology : a growth accounting perspective, *The Economic Journal* 114.495, p. 338–351.
- CRUTZEN, Paul J. 2002, Geology of mankind, *Nature* 415.6867, p. 23–23.
- CSEREKLYEI, Zsuzsanna, Maria del Mar Rubio VARAS et David I. STERN 2016, Energy and Economic Growth : The Stylized Facts, *The Energy Journal* 37.2, DOI : <http://dx.doi.org/10.5547/01956574.37.2.zcse>.
- DAFERMOS, Yannis, Maria NIKOLAIDI et Giorgos GALANIS 2017, A stock-flow-fund ecological macroeconomic model, *Ecological Economics* 131, p. 191–207, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.08.013.
- DALY, Herman E. 2010, The operative word here is "somehow", *Real World Economics Review* 54, p. 103.
- DALY, Herman E. et Joshua FARLEY 2010, *Ecological economics : principles and applications*, Washington, DC : Island Press, 509 p.
- DAVIS, S. J. et K. CALDEIRA 2010, Consumption-based accounting of CO2 emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107.12, p. 5687–5692, DOI : 10.1073/pnas.0906974107.
- DEBEIR, Jean-Claude, Jean-Paul DELÉAGE et Daniel HÉMERY 2013, *Une histoire de l'énergie. Les servitudes de la puissance*, Paris : Flammarion.
- DELATTE, Anne-Laure et Antonia LÓPEZ-VILLAVICENCIO 2012, Asymmetric exchange rate pass-through : Evidence from major countries, *Journal of Macroeconomics* 34.3, p. 833–844, DOI : 10.1016/j.jmacro.2012.03.003.
- DELÉAGE, Jean-Paul 1989, Eco-Marxist critique of Political economy, *Capitalism Nature Socialism* 1.3, p. 15–31, DOI : 10.1080/10455758909358382.
- DIAMOND, Jared 1995, Easter's End, *Discover Magazine* 16.8, p. 62–69.
- 2006, *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Paris : Gallimard.
- DICKEY, David A. et Wayne A. FULLER 1979, Distribution of the estimators for Autoregressive time series with a unit root, *Journal of the American Statistical Association* 74.366, p. 427–431.
- DINDA, Soumyananda 2004, Environmental Kuznets Curve Hypothesis : A Survey, *Ecological Economics* 49.4, p. 431–455, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2004.02.011.
- DIOP, Momar 2014, « Étude critique de la théorie quantitative de la monnaie dans l'histoire des crises des prix », thèse de doct., Université de Bourgogne.
- DODA, Baran 2013, Emissions-GDP Relationship in Times of Growth and Decline, *Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper* 136.
- DOS SANTOS, Claudio et Antônio MACEDO E SILVA 2009, Revisiting (and connecting) Marglin–Bhaduri and Minsky : an SFC look at financialization and profit-led growth.

- DOUAI, Ali 2017, Ecological marxism and ecological economics : From misunderstanding to meaningful dialogue, in : *The Routledge Handbook of Ecological Economics : Nature and Society*, sous la dir. de Clive L. SPASH.
- DOUAI, Ali et Mathieu MONTALBAN 2012, Institutions and the environment : the case for a political socio-economy of environmental conflicts, *Cambridge Journal of Economics* 36.5, p. 1199–1220, DOI : 10.1093/cje/bes046.
- DOUAI, Ali et Gaël PLUMECOCQ 2017, *L'économie écologique*, Repères 678, Paris : La Découverte.
- DOUTHWAITE, Richard 2000, Commercially-Produced Money, in : *The Ecology of Money*, Green Books.
- DRUMMOND, Ian et Terry K. MARSDEN 1995, Regulating sustainable development, *Global Environmental Change* 5.1, p. 51–63.
- DUMÉNIL, Gérard et Dominique LÉVY 2012, Neoliberalism, in : *The Elgar companion to Marxist economics*, sous la dir. de Ben FINE, Alfredo SAAD-FILHO et Marco BOFFO, p. 240–245.
- 2014, *La grande bifurcation : en finir avec le néolibéralisme*, L'horizon des possibles, Paris : La Découverte, 199 p.
- DÜNHAUPT, Petra 2011, The Impact of Financialization on Income Distribution in the USA and Germany : A Proposal for a New Adjusted Wage Share, *IMK Working Paper* 7/2011.
- 2012, Financialization and the rentier income share – evidence from the USA and Germany, *International Review of Applied Economics* 26.4, p. 465–487, DOI : 10.1080/02692171.2011.595705.
- 2013a, Determinants of functional income distribution : theory and empirical evidence, *Global Labour University working paper* 18.
- 2013b, The effect of financialization on labor's share of income, *Institute for International Political Economy Berlin Working Paper* 17/2013.
- DUNZ, Nepomuk et Asjad NAQVI 2016, Environmental and Labor Policies in a North-South SFC Model.
- DURAND, Cédric 2010, *Le capitalisme est-il indépassable ?*, Paris : Textuel, 142 p.
- DURAND, Cédric et Philippe LÉGÉ 2013, Regulation beyond growth, *Capital & Class* 37.1, p. 111–126, DOI : 10.1177/0309816812474778.
- DURBIN, James 1970, Testing for Serial Correlation in Least-Squares Regression when some of the Regressors are Lagged Dependent Variables, *Econometrica* 38.3.
- ÉCHAUDÉMAISON, Claude-Danièle *et al.* 2001, *Dictionnaire d'économie et de sciences sociales*, Paris : Nathan.
- ÉLIE, Luc *et al.* 2012, Approche régulationniste de la diversité des dispositifs institutionnels environnementaux des pays de l'OCDE, *Revue de la régulation* 12.
- ELLIOTT, Graham, Thomas J. ROTHENBERG et James H. STOCK 1996, Efficient tests for an autoregressive unit root, *Econometrica* 64.4, p. 813–836.
- ENG, Yoke-Kee et Chin-Yoong WONG, Toward a decarbonizing economic expansion : evidence from nonlinear ARDL approach.
- EPSTEIN, Gerald A 2005, *Financialization and the world economy*, Cheltenham : Edward Elgar.
- ESTEVE, Vicente et Cecilio TAMARIT 2012, Threshold cointegration and nonlinear adjustment between CO2 and income : The Environmental Kuznets Curve in Spain, 1857-2007, *Energy Economics* 34.6, p. 2148–2156, DOI : 10.1016/j.eneco.2012.03.001.
- FANTACCI, Luca 2013, Why Banks Do What They Do. How the Monetary System Affects Banking Activity, *Accounting, Economics and Law* 3.3, DOI : 10.1515/ael-2013-0017.
- FARLEY, Joshua *et al.* 2013, Monetary and Fiscal Policies for a Finite Planet, *Sustainability* 5.6, p. 2802–2826, DOI : 10.3390/su5062802.
- FELIPE, Jesus et John S. L. McCOMBIE 2015, *The Aggregate Production Function and the Measurement of Technical Change : Not Even Wrong*, Edward Elgar, 400 p.
- FISCHER-KOWALSKI, Marina et Helmut HABERL 1993, Metabolism and Colonization. Modes of Production and the Physical Exchange between Societies and Nature, *Innovation in Social Sciences Research* 6.4, p. 415–442.

- FIZAINE, Florian et Victor COURT 2016, The energy-economic growth relationship : A new insight from the EROI perspective, *Chaire Économie du Climat Working Paper* 2016-01.
- FRANK, Andre Gunder 1993, Transitional Ideological Modes : Feudalism, Capitalism, Socialism, in : *The World System, Five Hundred Years or Five Thousand?*, sous la dir. d'Andre Gunder FRANK et Barry K. GILLS, London : Routledge, p. 200–217.
- FREEMAN, Richard 2007, The great doubling : The challenge of the new global labor market, in : *Ending Poverty in America : How to Restore the American Dream*, sous la dir. de John EDWARDS, Marion CRAIN et Arne L. KALLEBERG, New York : The New Press.
- FRESSOZ, Jean-Baptiste et Christophe BONNEUIL 2016, *L'évènement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Paris : Points, 334 p.
- FRESSOZ, Jean-Baptiste, Frédéric GRABER *et al.* 2014, *Introduction à l'histoire environnementale*, Paris : La Découverte.
- FROGER, Géraldine *et al.* 2016, Qu'est-ce que l'économie écologique?, *L'Économie politique* 69, p. 8–23.
- GALBRAITH, James K. 2014, Kapital for the Twenty-First Century?, *Dissent Magazine*.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas 1995, *La décroissance : entropie, écologie, économie*, trad. par Jacques GRINEVALD et IVO RENS, Paris : Sang de la terre (1979).
- GERBER, Jean-David et Julien-François GERBER 2017, Decommodification as a foundation for ecological economics, *Ecological Economics* 131, p. 551–556, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.08.030.
- GIBBS, David 1996, Integrating sustainable development and economic restructuring : A role for Regulation Theory?, *Geoforum* 27.1, p. 1–10.
- GIRAUD, Gaël et Zeynep KAHRAMAN 2014, How Dependent is Growth from Primary Energy? The Dependency ratio of Energy in 33 Countries (1970-2011), *Documents de Travail du Centre d'Économie de la Sorbonne* 2014.97.
- GODARD, Olivier 2007, Le Rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique?, *Revue d'économie politique* 117.4, p. 475–506.
- GODLEY, Wynne et Marc LAVOIE 2012, *Monetary economics : An integrated approach to credit, money, income, production and wealth*, Houndmills, Basingstoke, Hampshire ; New York : Palgrave Macmillan.
- GOHER-UR-REHMAN, Mir et Servaas STORM 2016, Carbon Emissions and Economic Growth : Production-based versus Consumption-based Evidence on Decoupling, *Institute for New Economic Thinking Working Paper Series* 41.
- GOWDY, John M. et Jon D. ERICKSON 2005, The approach of ecological economics, *Cambridge Journal of Economics* 29.2, p. 207–222.
- GOWDY, John M., Mario GIAMPIETRO *et al.* 2009, Incorporating biophysical foundations in a hierarchical model of societal metabolism, in : *Post Keynesian and Ecological Economics : Confronting environmental issues*, sous la dir. de Richard P. F. HOLT, Steven PRESSMAN et Clive L. SPASH, Cheltenham : Edward Elgar, p. 203–220.
- GOWDY, John M. et Kozo MAYUMI 2001, Reformulating the foundations of consumer choice theory and environmental valuation, *Ecological Economics* 39.2, p. 223–237, DOI : 10.1016/S0921-8009(01)00197-5.
- GRAEBER, David 2011, *Debt : the first 5,000 years*, Brooklyn, N.Y : Melville House, 534 p.
- GREGORY, Allan W. et Bruce E. HANSEN 1996a, Practitioners corner : tests for cointegration in models with regime and trend shifts, *Oxford bulletin of Economics and Statistics* 58.3, p. 555–560.
- 1996b, Residual-based tests for cointegration in models with regime shifts, *Journal of Econometrics* 70.1, p. 99–126, DOI : 10.1016/0304-4076(99)41685-7.
- GRUBLER, Arnulf 2012, « Grand designs : historical patterns and future scenarios of energy technological change. Historical Case Studies of Energy Technology Innovation. », in : GRUBLER, Arnulf *et al.*, *The Global Energy Assessment*, Cambridge University Press.
- GUILLAUD, Elvire et Stefano PALOMBARINI 2006, Evolution des attentes sociales et comportement électoral : France, 1978-2002, *PSE Working Papers*.

- HANSEN, Bruce E. 2001, The new econometrics of structural change : Dating breaks in US labor productivity, *The Journal of Economic Perspectives* 15.4, p. 117–128.
- HARDT, Lukas et Daniel W. O'NEILL 2017, Ecological Macroeconomic Models : Assessing Current Developments, *Ecological Economics* 134, p. 198–211, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.12.027.
- HARRIBEY, Jean-Marie 2002, Richesse et valeur dans une perspective de soutenabilité, *ContreTemps* 4, p. 71–84.
- 2011, Prospérité sans croissance et croissance sans prospérité, *Etopia* 9.
- 2012, « Contre le retour de l'épargne préalable, une conception sociale de la monnaie », in : *Séminaire « Économistes atterrés » sur la monnaie*, Séminaire « Économistes atterrés » sur la monnaie.
- HARVEY, David 2014, *Brève histoire du néolibéralisme*, Paris : Les Prairies Ordinaires, 314 p.
- HERVIEUX, Marie-Sophie et Pierre-Alexandre MAHIEU 2014, A detailed systematic review of the recent literature on environmental Kuznets curve dealing with CO₂, *LEMNA Working Papers* 2014/15.
- HOLT, Richard 2005, Post-Keynesian economics and sustainable development, *International Journal of Environment, Workplace and Employment* 1.2, p. 174–186.
- 2009, The relevance of Post-Keynesian economics to sustainable development, in : *Environment and Employment : A Reconciliation*, sous la dir. de Philip LAWN, New-York : Routledge.
- HOLT, Richard, Steven PRESSMAN et Clive L. SPASH 2009, *Post Keynesian and Ecological Economics : Confronting Environmental Issues*, Edward Elgar Publishing Ltd, 296 p.
- HOOVER, Kevin D. 2008, Causality in economics and econometrics, *The new Palgrave dictionary of economics* 2.
- HORNBERG, Alf 2012, *Global Ecology and Unequal Exchange : Fetishism in a Zero-Sum World*, Routledge, 206 p.
- HORNBERG, Alf et Carole L. CRUMLEY, éd. 2007, *The world system and the Earth system : global socio-environmental change and sustainability since the Neolithic*, Walnut Creek, CA : Left Coast Press, Inc, 395 p.
- HUDSON, Michael 2002, Reconstructing the origins of interest-bearing debt and the logic of clean slates, in : *Debt and economic renewal in the ancient near east*. Sous la dir. de Michael HUDSON et Marc VAN DE MIEROOP, Bethesda, MD : CDL Press.
- HUGOT, Yves-David 2013, Où et quand le capitalisme est-il né ? Conceptualisations et jeux d'échelle chez Robert Brenner, Immanuel Wallerstein et André Gunder Frank, *Actuel Marx* 53.1, p. 76, DOI : 10.3917/amx.053.0076.
- HUNT, Terry L. 2007, Rethinking Easter Island's ecological catastrophe, *Journal of Archaeological Science* 34.3, p. 485–502, DOI : 10.1016/j.jas.2006.10.003.
- HUSSON, François, Julie JOSSE et Jérôme PAGÈS 2010, « Analyse de données avec R : complémentarité des méthodes d'analyse factorielle et de classification », in : *42èmes Journées de Statistique*.
- HUSSON, Michel 2010, Le partage de la valeur ajoutée en Europe, *La Revue de l'IRES* 64.
- 2012, Le néolibéralisme, stade suprême ?, *Actuel Marx* 51.1, p. 86, DOI : 10.3917/amx.051.0086.
- IEA, OECD et EUROSTAT 2005, *Energy statistics manual*.
- IPCC 2014, *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. Geneva, Switzerland : Intergovernmental Panel on Climate Change.
- JACKSON, Robert V. 1992, Rates of Industrial Growth during the Industrial Revolution, *The Economic History Review* 45.1, p. 1–23, DOI : 10.2307/2598326.
- JACKSON, Tim 2011, *Prosperity without Growth : Economics for a Finite Planet*, Routledge, 288 p.
- 2015, *Commentary on Marxism and Ecology : Common Fonts of a Great Transition* 4, Great Transition Initiative, URL : <http://www.greattransition.org/commentary/tim-jackson-marxism-and-ecology-john-bellamy-foster> (visité le 10/05/2016).
- JACKSON, Tim, Ben DRAKE et al. 2014, Foundations for an Ecological Macroeconomics : literature review and model development, *WWWForEurope Working Paper* 65.

- JACKSON, Tim et Peter A. VICTOR 2015, Does credit create a growth imperative? A quasi-stationary economy with interest-bearing debt, *Ecological Economics* 120, p. 32–48, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2015.09.009.
- JAKAB, Zoltan et Michael KUMHOF 2015, Banks are not intermediaries of loanable funds—and why this matters, *Bank of England Working Paper* 529.
- JAYADEV, Arjun 2007, Capital account openness and the labour share of income, *Cambridge Journal of Economics* 31.3, p. 423–443, DOI : 10.1093/cje/be1037.
- JAYADEV, Arjun et Gerald EPSTEIN 2007, The Correlates of Rentier Returns in OECD Countries.
- JESSOP, Bob 2014, Capitalist diversity and variety : Variegation, the world market, compossibility and ecological dominance, *Capital & Class* 38.1, p. 45–58.
- JEVONS, William Stanley 1865, *The coal question : an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*, sous la dir. d'Alfred William FLUX, New York : A.M. Kelley.
- KALDOR, Nicholas 1966, Marginal Productivity and the Macro-Economic Theories of Distribution : Comment on Samuelson and Modigliani, *The Review of Economic Studies* 33.4, p. 309, DOI : 10.2307/2974428.
- 1975, Economic Growth and the Verdoorn Law : A Comment on Mr Rowthorn's Article, *The Economic Journal* 85.340, p. 891, DOI : 10.2307/2230633.
- KALECKI, Michal 1971, *Selected Essays on the Dynamics of the Capitalist Economy 1933-1970*, Cambridge University Press, 214 p.
- KALIMERIS, Panos, Clive RICHARDSON et Kostas BITHAS 2014, A meta-analysis investigation of the direction of the energy-GDP causal relationship : implications for the growth-degrowth dialogue, *Journal of Cleaner Production* 67, p. 1–13, DOI : 10.1016/j.jclepro.2013.12.040.
- KALLIS, Giorgos 2015, *Is there a growth imperative in capitalism? A commentary on John Bellamy Foster (part I)*, ENTITLE blog.
- KALLIS, Giorgos, Christian KERSCHNER et Joan MARTINEZ-ALIER 2012, The economics of degrowth, *Ecological Economics* 84, p. 172–180, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2012.08.017.
- KANDER, Astrid, Paolo MALANIMA et Paul WARDE 2013, *Power to the people : energy in Europe over the last five centuries*, Princeton, N.J : Princeton University Press, 457 p.
- KEEN, Steve 2014, Endogenous money and effective demand, *Review of Keynesian Economics* 2.3, p. 271–291.
- KEUCHEYAN, Razmig 2017, Financiariser les catastrophes naturelles : assurance, finance et changement climatique, *Actuel Marx* 61, p. 79–94.
- KNELL, Mark 2004, Structure Change and the Kaldor-Verdoorn law in the 1990s, *Revue d'économie industrielle* 105.1, p. 71–83, DOI : 10.3406/rei.2004.3036.
- KNIGHT, Frank H. 1921, *Risk, uncertainty and profit*, t. 31, Hart, Schaffner and Marx Prize Essays, Boston et New York : Houghton Mifflin.
- KOCH, Max 2011, *Capitalism and climate change : theoretical discussion, historical development and policy responses*, Houndmills, Basingstoke Hampshire ; New York : Palgrave Macmillan, 220 p.
- KÖHLER, Karsten, Alexander GUSCHANSKI et Engelbert STOCKHAMMER 2015, How does Financialisation Affect Functional Income Distribution? A Theoretical Clarification and Empirical Assessment, *Post-Keynesian Economics Study Group Working Paper* 1507.
- KOVACIC, Zora et al. 2017, Finance, energy and the decoupling : an empirical study, *Journal of Evolutionary Economics*, p. 1–26.
- KRAUSMANN, Fridolin et al. 2008, The Global Sociometabolic Transition : Past and Present Metabolic Profiles and Their Future Trajectories, *Journal of Industrial Ecology* 12.5, p. 637–656, DOI : 10.1111/j.1530-9290.2008.00065.
- KRIPFGANZ, Sebastian et Daniel C. SCHNEIDER 2016, « ardl : Stata module to estimate autoregressive distributed lag models », Stata Conference, Chicago.

- KRIPPNER, Greta R. 2005, The financialization of the American economy, *Socio-Economic Review* 3.2, p. 173–208, DOI : 10.1093/SER/mwi008.
- KRISHNAN, Rajaram, Jonathan M HARRIS et Neva R. GOODWIN, édés. 1995, *A survey of ecological economics*, 1, Washington, DC : Island Press, 384 p.
- KRONENBERG, Tobias 2010, Finding common ground between ecological economics and post-Keynesian economics, *Ecological Economics* 69.7, p. 1488–1494, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.03.002.
- LAURENT, Éloi 2017, Reconnaître, en France, l'inégalité et la justice environnementales, *Actuel Marx* 61, p. 64–78.
- LAVOIE, Marc 1996, Monetary policy in an economy with endogenous credit money, in : *Money in Motion : the Post-Keynesian and Circulation Approaches*, sous la dir. d'Edward J. NELL et Ghislain DELEPLACE, Basingstoke et New York : MacMillan et St. Martin's Press, p. 532–545.
- 2008, Financialisation Issues in a Post-Keynesian Stock–flow Consistent Model, *European Journal of Economics and Economic Policies : Intervention* 5.2, p. 331–356.
- 2009, Post Keynesian consumer choice theory and ecological economics, in : *Post-Keynesian and Ecological Economics : Confronting environmental issues*, sous la dir. de Richard P. F. HOLT, Steven PRESSMAN et Clive L. SPASH, Edward Elgar, p. 141–157.
- 2014, *Post-Keynesian Economics : New Foundations*, Northampton, MA : Edward Elgar, 680 p.
- LAVOIE, Marc et Wynne GODLEY 2001, Kaleckian models of growth in a coherent stock-flow monetary framework : a Kaldorian view, *Journal of Post Keynesian Economics*, p. 277–311.
- LAWN, Philip 2011, Is steady-state capitalism viable? A review of the issues and an answer in the affirmative, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1219.1, p. 1–25, DOI : 10.1111/j.1749-6632.2011.05966.x.
- LAZONICK, William 2010, Innovative Business Models and Varieties of Capitalism : Financialization of the U.S. Corporation, *Business History Review* 84.4.
- LAZONICK, William et Mary O'SULLIVAN 2000, Maximizing shareholder value : a new ideology for corporate governance, *Economy and Society* 29.1, p. 13–35, DOI : 10.1080/030851400360541.
- LE HÉRON, Edwin et Amine MAROUANE 2015, Une histoire de la modélisation post keynésienne Stock-Flux Cohérente contemporaine, *Cahiers du GREThA* 2015.
- LE HÉRON, Edwin et Tarik MOUAKIL 2008, A post-Keynesian stock-flow consistent model for dynamic analysis of monetary policy shock on banking behaviour, *Metroeconomica* 59.3, p. 405–440.
- LENGLART, Fabrice, Christophe LESIEUR et Jean-Louis PASQUIER 2010, Les émissions de CO2 du circuit économique en France, *L'économie française*.
- LENZEN, Manfred *et al.* 2013, Building Eora : A global multiregion input-output database at high country and sector resolution, *Economic Systems Research* 25.1, p. 20–49, DOI : 10.1080/09535314.2013.769938.
- LIETAER, Bernard, Christian ARNSPERGER et Stefan Brunnhuber {and} Sally GOERNER 2012, *Money and Sustainability : The Missing Link*, Triarchy Press Ltd, 216 p.
- LIPIETZ, Alain 1995, « Écologie politique régulationniste ou économie de l'environnement ? », in : BOYER, Robert et Yves SAILLARD, *Théorie de la Régulation : l'état des savoirs*, La Découverte, p. 350–6.
- 1997, The post-Fordist world : labour relations, international hierarchy and global ecology, *Review of International Political Economy* 4.1, p. 1–41.
- LOEHR, Dirk 2012, The euthanasia of the rentier — A way toward a steady-state economy?, *Ecological Economics* 84, p. 232–239, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2011.11.006.
- LOISEAU, Bernard, Jacques MAZIER et Marie-Brigitte WINTER 1977, Rentabilité du capital dans les économies dominantes : des tensions accrues, *Economie et statistique* 86.1, p. 39–54, DOI : 10.3406/estat.1977.6111.
- LONDON, Jack 2003, *Le Talon de fer*, Paris : Phébus (1908), 320 p.
- LÜTKEPOHL, Helmut 2007, *New introduction to multiple time series analysis*, Berlin : Springer, 764 p.

- MALM, Andreas 2013, The Origins of Fossil Capital : From Water to Steam in the British Cotton Industry, *Historical Materialism* 21.1, p. 15–68.
- 2014, Fleeing the Flowing Commons : Robert Thom, Water Reservoir Schemes, and the Shift to Steam Power in Early Nineteenth-Century Britain, *Environmental History* 19.1, p. 55–77, DOI : 10.1093/envhis/emt106.
- 2016, *Fossil Capital : The Rise of Steam Power and the Roots of Global Warming*, London ; New York : Verso, 496 p.
- 2017, Nature et société : un ancien dualisme pour une situation nouvelle, *Actuel Marx* 61, p. 47–63.
- MALM, Andreas et Alf HORNBORG 2014, The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative, *The Anthropocene Review* 1.1, p. 62–69.
- MARTINEZ-ALIER, Joan 2002, Currents of environmentalism, in : *The environmentalism of the poor : a study of ecological conflicts and valuation*, Cheltenham : Edward Elgar, p. 1–15.
- MARTINEZ-ALIER, Joan 2014, L'économie écologique : "tenir compte de la nature", in : *L'écologisme des pauvres. Une étude des conflits environnementaux dans le monde*, Paris : Les Petits Matins et Institut Veblen, p. 53–100.
- MARTINEZ-ALIER, Joan, Giorgos KALLIS *et al.* 2010, Social Metabolism, Ecological Distribution Conflicts, and Valuation Languages, *Ecological Economics* 70.2, p. 153–158, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.09.024.
- MARTINEZ-ALIER, Joan et Klaus SCHLÜPMANN 1987, *Ecological Economics : Energy, Environment, and Society*, Basil Blackwell, 286 p.
- MASTERS, Michael et Adam K. WHITE 2008, *The accidental hunt brothers : How Institutional Investors Are Driving Up Food And Energy Prices*, Special Report, www.accidentalthuntbrothers.com.
- MAUCOURANT, Jérôme 2003, « Karl Polanyi, les marchés et le Marché », in : Karl Polanyi et le marché, Maison des Sciences de l'Homme, Nanterre, France.
- MAZIER, Jacques, Maurice BASLE et Jean-François VIDAL 1993, *Quand les crises durent*, Paris : Economica, 596 p., ISBN : 978-2-7178-2376-9.
- MCLEAY, Michael, Amar RADIA et Ryland THOMAS 2014, Money creation in the modern economy, *Bank of England Quarterly Bulletin* 54.1, p. 14–27.
- MEARMAN, Andrew 2005, Why have post-Keynesians had (relatively) little to say on the economics of the environment?, *International Journal of Environment, Workplace and Employment* 1.2, p. 131–154.
- MEIKSINS WOOD, Ellen 2002, *The Origin of Capitalism : A Longer View*, London : Verso, 213 p.
- MELMIÈS, Jordan et Thomas DALLERY 2014, Price competition, inter-firms relationships, bank discrimination and wage inequalities : a post-Keynesian perspective, *Revue de la régulation* 16.
- MENEGAKI, Angeliki N. 2014, On energy consumption and GDP studies ; A meta-analysis of the last two decades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, p. 31–36, DOI : 10.1016/j.rser.2013.08.081.
- MILLEMACEI, Emanuele et Ferdinando OFRIA 2014, Kaldor-Verdoorn's law and increasing returns to scale : A comparison across developed countries, *Journal of Economic Studies* 41.1, p. 140–162.
- MITCHELL, Timothy 2009, Carbon democracy, *Economy and Society* 38.3, p. 399–432, DOI : 10.1080/03085140903020598.
- 2013, *Carbon democracy : le pouvoir politique à l'ère du pétrole*, trad. par Christophe JAQUET, Paris : La Découverte.
- MOORE, Jason W. 2015, *Capitalism in the Web of Life : Ecology and the Accumulation of Capital-*, New York : Verso, 336 p.
- MORAN, Daniel D. *et al.* 2013, Does ecologically unequal exchange occur?, *Ecological Economics* 89, p. 177–186, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2013.02.013.
- MURADIAN, Roldan, Mariana WALTER et Joan MARTINEZ-ALIER 2012, Hegemonic transitions and global shifts in social metabolism : Implications for resource-rich countries. Introduction to the special section, *Global Environmental Change* 22.3, p. 559–567, DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2012.03.004.

- MURPHY, David J. et Charles AS HALL 2010, Year in review—EROI or energy return on (energy) invested, *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185.1, p. 102–118.
- NAKANO, Satoshi *et al.* 2009, The measurement of CO2 embodiments in international trade : Evidence from the harmonised input-output and bilateral trade database, *OECD STI Working Paper* 2009-3.
- NAQVI, Asjad 2015, Growth, Distributions, and the Environment : A Stock-Flow Consistent Framework for Policy Analysis, *WWWForEurope Policy Paper* 18.
- NIKIFOROS, Michalis et Gennaro ZEZZA 2017, Stock-Flow Consistent Macroeconomic Models : A survey, *Levy Economics Institute Working Papers Series* 891.
- NORDHAUS, William 2015, Climate Clubs : Overcoming Free-riding in International Climate Policy, *American Economic Review* 105.4, p. 1339–1370, DOI : 10.1257/aer.15000001.
- NOREL, Philippe 2013, L'émergence du capitalisme au prisme de l'histoire globale, *Actuel Marx* 53.1, p. 63, DOI : 10.3917/amx.053.0063.
- O'CONNOR, James 1988, Capitalism, nature, socialism : a theoretical introduction, *Capitalism Nature Socialism* 1.1.
- 1991, On the two contradictions of capitalism, *Capitalism Nature Socialism* 2.3, p. 107–109, DOI : 10.1080/10455759109358463.
- OMRI, Anis 2014, An international literature survey on energy-economic growth nexus : Evidence from country-specific studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, p. 951–959, DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.084.
- ORHANGAZI, O. 2008, Financialisation and capital accumulation in the non-financial corporate sector : A theoretical and empirical investigation on the US economy : 1973-2003, *Cambridge Journal of Economics* 32.6, p. 863–886, DOI : 10.1093/cje/ben009.
- OZKAYNAK, B., F. ADAMAN et P. DEVINE 2012, The identity of ecological economics : retrospects and prospects, *Cambridge Journal of Economics* 36.5, p. 1123–1142, DOI : 10.1093/cje/bes021.
- PASSET, René 1979, *L'Économique et le vivant*, Paris : Payot, 287 p.
- PAYNE, James E. 2010, Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth, *Journal of Economic Studies* 37.1, p. 53–95, DOI : 10.1108/01443581011012261.
- PECK, Jamie et Nik THEODORE 2007, Variegated capitalism, *Progress in Human Geography* 31.6, p. 731–772, DOI : 10.1177/0309132507083505.
- PESARAN, M. Hashem et Yongcheol SHIN 1999, « An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis », in : *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century : The Ragnar Frisch Centennial Symposium*, t. 11.
- PESARAN, M. Hashem, Yongcheol SHIN et Richard J. SMITH 2001, Bounds testing approaches to the analysis of level relationships, *Journal of Applied Econometrics* 16.3, p. 289–326, DOI : 10.1002/jae.616.
- PETERS, Glen P. 2008, From production-based to consumption-based national emission inventories, *Ecological Economics* 65.1, p. 13–23, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2007.10.014.
- PETERS, Glen P., S. J. DAVIS et R. ANDREW 2012, A synthesis of carbon in international trade, *Biogeosciences* 9.8, p. 3247–3276, DOI : 10.5194/bg-9-3247-2012.
- PETERS, Glen P., Jan C. MINX *et al.* 2011, Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108.21, p. 8903–8908.
- PHILLIPS, Peter C. B. et Pierre PERRON 1988, Testing for a unit root in time series regression, *Biometrika* 75.2, p. 335–346.
- PIKETTY, Thomas 2013, *Le capital au XXIe siècle*, Paris : Éditions du Seuil.
- PLUMECOCQ, Gaël 2014, The second generation of ecological economics : How far has the apple fallen from the tree?, *Ecological Economics* 107, p. 457–468, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2014.09.020.
- PODOBNIK, Bruce 2006, *Global energy shifts : fostering sustainability in a turbulent age*, Philadelphia, PA : Temple University Press, 223 p.
- POLANYI, Karl 2009, *La Grande transformation : Aux origines politiques et économiques de notre temps*, Paris : Gallimard.

- PRZEWORSKI, Adam 2009, Conquered or Granted? A History of Suffrage Extensions, *British Journal of Political Science* 39.2, p. 291.
- RAFTERY, Adrian E. *et al.* 2017, Less than 2 degree celsius warming by 2100 unlikely, *Nature Climate Change*, DOI : 10.1038/nclimate3352.
- REZAI, Armon et Sigrid STAGL 2016, Ecological macroeconomics : Introduction and review, *Ecological Economics* 121, p. 181–185, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2015.12.003.
- REZAI, Armon, Lance TAYLOR et Reinhard MECHLER 2013, Ecological macroeconomics : An application to climate change, *Ecological Economics* 85, p. 69–76, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2012.10.008.
- RICHTERS, Oliver et Andreas SIEMONEIT 2017a, Consistency and Stability Analysis of Models of a Monetary Growth Imperative, *Ecological Economics* 136, p. 114–125.
- 2017b, Fear of stagnation? A review on growth imperatives, *VÖÖ Discussion Papers* 6.
- 2017c, How imperative are the Joneses? Economic growth between desire and social coercion, *VÖÖ Discussion Papers* 4.
- ROBERTS, J. Timmons, Bradley C. PARKS et Alexis A. VÁSQUEZ 2004, Who ratifies environmental treaties and why? Institutionalism, structuralism and participation by 192 nations in 22 treaties, *Global Environmental Politics* 4.3, p. 22–64.
- ROCHON, Louis-Philippe et Sergio ROSSI 2013, Endogenous money : the evolutionary versus revolutionary views, *Review of Keynesian Economics* 1.2, p. 210–229.
- ROCKSTRÖM, Johan *et al.* 2009, Planetary boundaries : exploring the safe operating space for humanity, *Ecology and Society* 14.
- RODINSON, Maxime 1966, *Islam et capitalisme*, Paris : Éditions du Seuil.
- ROSENBAUM, Eckehard 2015, Zero growth and structural change in a post Keynesian growth model, *Journal of Post Keynesian Economics* 37.4, p. 623–647, DOI : 10.1080/01603477.2015.1050334.
- ROUSSEAU, Sandrine et Bertrand ZUINDEAU 2007, Théorie de la régulation et développement durable, *Revue de la régulation* 1.
- ROUX, Brigitte Le 2014, *Analyse géométrique des données multidimensionnelles*, Paris : Dunod, 408 p.
- SAMUELSON, Paul A. 1955, *Economics : An introductory analysis*, New York : MacGraw-Hill.
- SATO, Misato 2014, Embodied Carbon in Trade : A Survey of the Empirical Literature, *Journal of Economic Surveys* 28.5, p. 831–861, DOI : doi : 10.1111/joes.12027.
- SAWYER, Malcolm et Marco VERONESE PASSARELLA 2015, The Monetary Circuit in the Age of Financialisation : A Stock–Flow Consistent Model with A Twofold Banking Sector, *Metroeconomica*, DOI : 10.1111/meca.12103.
- SCHANDL, Heinz *et al.* 2017, Global Material Flows and Resource Productivity : Forty Years of Evidence, *Journal of Industrial Ecology*, DOI : 10.1111/jiec.12626.
- SEPHTON, Peter et Janelle MANN 2013, Further evidence of an Environmental Kuznets Curve in Spain, *Energy Economics* 36, p. 177–181, DOI : 10.1016/j.eneco.2013.01.001.
- SERRENHO, André Cabrera *et al.* 2014, Decomposition of useful work intensity : The EU (European Union)-15 countries from 1960 to 2009, *Energy* 76, p. 704–715, DOI : 10.1016/j.energy.2014.08.068.
- SHAFIK, Nemat et Sushenjit BANDYOPADHYAY 1992, Economic growth and environmental quality : time series and cross-country evidence, *World Bank Policy Research Working Paper* WPS904.
- SHAHIDUZZAMAN, Md. et Allan LAYTON 2015, Changes in CO2 emissions over business cycle recessions and expansions in the United States : A decomposition analysis, *Applied Energy* 150, p. 25–35, DOI : 10.1016/j.apenergy.2015.04.007.
- SHEARD, Paul 2013, Repeat After Me : Banks Cannot and Do Not "Lend Out" Reserves, *Standard & Poor's RatingsDirect*.
- SHELDON, Tamara L. 2017, Asymmetric effects of the business cycle on carbon dioxide emissions, *Energy Economics* 61, p. 289–297, DOI : 10.1016/j.eneco.2016.11.025.

- SHIN, Yongcheol, Byungchul YU et Matthew GREENWOOD-NIMMO 2014, Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework, in : *Festschrift in Honor of Peter Schmidt*, sous la dir. de Robin C. SICKLES et William C. HORRACE, Springer.
- SILVER, Beverly J. 2003, *Forces of labor : workers' movements and globalization since 1870*, Cambridge studies in comparative politics, Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 238 p.
- SMITH, Richard 2010a, Beyond growth or beyond capitalism?, *Real-World Economics Review* 53, p. 28–42.
- 2010b, If Herman Daly has a better plan, let's hear it, *real-world economics review* 54, p. 119–123.
- SOLOW, Robert M. 1957, Technical Change and the Aggregate Production Function, *The Review of Economics and Statistics* 39.3, p. 312, DOI : 10.2307/1926047.
- SORRELL, Steven 2010, Energy, economic growth and environmental sustainability : Five propositions, *Sustainability* 2.6, p. 1784–1809, DOI : doi : 10.3390/su2061784.
- SPASH, Clive L. 2010, The brave new world of carbon trading, *New Political Economy* 15.2, p. 169–195.
- 2012, New foundations for ecological economics, *Ecological Economics* 77, p. 36–47, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2012.02.004.
- SPASH, Clive L. et Anthony RYAN 2012, Economic Schools of Thought on the Environment : Investigating Unity and Division, *Cambridge Journal of Economics* 36.5, p. 1091–1121, DOI : 10.1093/cje/bes023.
- STADLER, Konstantin *et al.* 2015, « The Environmental Footprints Explorer : a database for global sustainable accounting », in : 29th EnviroInfo and 3rd ICT4S Conference, Copenhagen, Denmark.
- STEFFEN, Will, Paul J. CRUTZEN et John R. McNEILL 2007, The Anthropocene : are humans now overwhelming the great forces of nature, *AMBIO : A Journal of the Human Environment* 36.8, p. 614–621.
- STEFFEN, Will, Jacques GRINEVALD *et al.* 2011, The Anthropocene : conceptual and historical perspectives, *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369.1938, p. 842–867, DOI : 10.1098/rsta.2010.0327.
- STEINBERG, Theodore L. 1986, An Ecological Perspective on the Origins of Industrialization, *Environmental Review : ER* 10.4, p. 261–276, DOI : 10.2307/3984350.
- STERN, David I. 2004, *Environmental Kuznets Curve*, in : *Encyclopedia of energy*, t. 2, Elsevier.
- STERN, Nicholas 2006, *Stern Review on the Economics of Climate Change*.
- STEVENSON, Christopher M. *et al.* 2015, Variation in Rapa Nui (Easter Island) land use indicates production and population peaks prior to European contact, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.4, p. 1025–1030, DOI : 10.1073/pnas.1420712112.
- STOCKHAMMER, Engelbert 2004, Financialisation and the slowdown of accumulation, *Cambridge Journal of Economics* 28.5, p. 719–741, DOI : 10.1093/cje/beh032.
- 2006, Shareholder value orientation and the investment-profit puzzle, *Journal of Post Keynesian Economics* 28.2, p. 193–215.
- 2010, Financialization and the global economy, *Political Economy Research Institute Working Paper* 242.
- 2012, Why have wage shares fallen, *ILO Conditions of work and employment Series* 35.
- STRUNZ, Sebastian 2014, The German energy transition as a regime shift, *Ecological Economics* 100, p. 150–158, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2014.01.019.
- SUMMERS, Lawrence H. 1991, The Scientific Illusion in Empirical Macroeconomics, *The Scandinavian Journal of Economics* 93.2, p. 129, DOI : 10.2307/3440321.
- TANURO, Daniel 2012, *L'impossible capitalisme vert*, La Découverte poche 365, Paris : Découverte, 223 p.
- TESTART, Alain, éd. 2001, *Aux origines de la monnaie*, Paris : Errance, 144 p.
- THOMPSON, E. P. 1967, Time, work-discipline and industrial Capitalism, *Past & Present* 38, p. 56–97.
- TODA, Hiro Y. et Taku YAMAMOTO 1995, Statistical inference in vector autoregressions with possibly integrated processes, *Journal of Econometrics* 66.1, p. 225–250, DOI : 10.1016/0304-4076(94)01616-8.
- TORDJMAN, Hélène et Valérie BOISVERT 2012, L'idéologie marchande au service de la biodiversité?, *Mouvements* 70.2, p. 31, DOI : 10.3917/mouv.070.0031.
- TRONTI, Mario 1977, Marx à Détroit, in : *Ouvriers et capital*, Paris : Christian Bourgeois.

- TULKENS, Henry 1997, Cooperation vs. Free Riding in international environmental affairs : two approaches, in : *Game theory and the Environment*, sous la dir. de Nick HANLEY et Henk FOLMER, London : Edward Elgar.
- 2015, Internal vs. core coalitional stability in the environmental externality game : A reconciliation, *CORE Discussion Paper* 2014.
- VAN ALSTINE, James et Eric NEUMAYER 2008, The environmental Kuznets curve, in : *Handbook on Trade and the Environment*, sous la dir. de Kevin P. GALLAGHER.
- Van den BERGH, Jeroen C.J.M., Ada FERRER-I-CARBONELL et Giuseppe MUNDA 2000, Alternative models of individual behaviour and implications for environmental policy, *Ecological Economics* 32.1, p. 43–61, DOI : 10.1016/S0921-8009(99)00088-9.
- Van den BERGH, Jeroen C.J.M. et Fabio GRAZI 2014, Ecological Footprint Policy? Land Use as an Environmental Indicator, *Journal of Industrial Ecology* 18.1, p. 10–19, DOI : 10.1111/jiec.12045.
- Van der ZWAN, N. 2014, Making sense of financialization, *Socio-Economic Review* 12.1, p. 99–129, DOI : 10.1093/ser/mwt020.
- VAN TILBURG, Jo Ann 1994, *Easter Island : Archeology, Ecology, and Culture*. Washington, DC : Smithsonian Institution Press.
- VAN Treeck, Till 2009, A synthetic, stock–flow consistent macroeconomic model of financialisation, *Cambridge Journal of Economics* 33.3, p. 467–493.
- VEBLEN, Thorstein 1979, *Théorie de la classe de loisir*, Paris : Gallimard (1899).
- VICTOR, Peter A. 2008, *Managing Without Growth : Slower by Design, Not Disaster*, Edward Elgar Publishing, 269 p.
- VICTOR, Peter A. et Gideon ROSENBLUTH 2007, Managing without growth, *Ecological Economics* 61.2, p. 492–504, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2006.03.022.
- VIDAL, Jean-François 2003, « Régimes de croissance post fordistes : comparaison des États-Unis, du Japon et de la France », in : *Forum de la Régulation*.
- VYAS, Seema et Lilani KUMARANAYAKE 2006, Constructing socio-economic status indices : how to use principal components analysis, *Health Policy and Planning* 21.6, p. 459–468, DOI : 10.1093/heapol/cz1029.
- WAGNER, Martin 2015, The Environmental Kuznets Curve, Cointegration and Nonlinearity, *Journal of Applied Econometrics* 30.6, p. 948–967, DOI : 10.1002/jae.2421.
- WALLERSTEIN, Immanuel 2011, *The Modern World-System I - Capitalist Agriculture and the Origins of the European World-Economy in the Sixteenth Century*, Berkeley, Calif. : University of California Press, 443 p.
- WARR, Benjamin S. et Robert U. AYRES 2010, Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth, *Energy* 35.4, p. 1688–1693, DOI : 10.1016/j.energy.2009.12.017.
- 2012, Useful work and information as drivers of economic growth, *Ecological Economics* 73, p. 93–102, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2011.09.006.
- WARR, Benjamin S., Robert U. AYRES *et al.* 2010, Energy use and economic development : A comparative analysis of useful work supply in Austria, Japan, the United Kingdom and the US during 100 years of economic growth, *Ecological Economics* 69.10, p. 1904–1917, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.03.021.
- WEISZ, Helga *et al.* 2001, Global Environmental Change and Historical Transitions, *Innovation : The European Journal of Social Sciences* 14.2, p. 117–142, DOI : 10.1080/13511610120062317.
- WIEDENHOFER, Dominik *et al.* 2013, Is there a 1970s Syndrome? Analyzing Structural Breaks in the Metabolism of Industrial Economies, *Energy Procedia* 40, p. 182–191, DOI : 10.1016/j.egypro.2013.08.022.
- WILSON, Charlie et Arnulf GRUBLER 2011, Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies, *Natural Resources Forum* 35.3, p. 165–184, DOI : 10.1111/j.1477-8947.2011.01386.x.

- WISMAN, Jon D. 2011, Inequality, Social Respectability, Political Power, and Environmental Devastation, *Journal of Economic Issues* 0.4, p. 877–900, DOI : 10.2753/JEI0021-3624450407.
- WRAY, L. Randall 2008, The Commodities Market Bubble : Money Manager Capitalism and the Financialization of Commodities, *Levy Economic Institute Economics Public Policy Brief Archive* 96.
- WRIGLEY, E. A. 1962, The Supply of Raw Materials in the Industrial Revolution, *The Economic History Review* 15.1, p. 1–16, DOI : 10.2307/2593286.
- 1988, *Continuity, Chance and Change : The Character of the Industrial Revolution in England*, Cambridge England ; New York : Cambridge University Press, 154 p.
- YORK, Richard 2012, Asymmetric effects of economic growth and decline on CO2 emissions, *Nature Climate Change* 2.11, p. 762–764, DOI : 10.1038/nclimate1699.
- ZELLNER, Arnold 1979, Causality and econometrics, *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 10.1, p. 9–54.
- ZUINDEAU, Bertrand 2006, Le développement durable est-il soluble dans le capitalisme ?, *Territoire en mouvement* 4, p. 46–53.
- 2007, Régulation School and environment : Theoretical proposals and avenues of research, *Ecological Economics* 62.2, p. 281–290, DOI : 10.1016/j.ecolecon.2006.12.018.

Annexe au chapitre 2 : équations intermédiaires

A.1 De l'équation 2.13 à l'équation 2.14a

$$Y = \frac{c_v k Y + c_v B - i B s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t)} \quad (\text{A.1a})$$

$$Y - \frac{c_v k Y}{\pi s_p (1 - t)} = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t)} \quad (\text{A.1b})$$

$$\frac{Y \pi s_p (1 - t) - c_v k Y}{\pi s_p (1 - t)} = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t)} \quad (\text{A.1c})$$

$$Y \left[\frac{\pi s_p (1 - t) - c_v k}{\pi s_p (1 - t)} \right] = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t)} \quad (\text{A.1d})$$

$$Y = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t)} \times \frac{\pi s_p (1 - t)}{\pi s_p (1 - t) - c_v k} \quad (\text{A.1e})$$

A.2 De l'équation 2.14b à l'équation 2.15

$$\frac{G}{t} + \frac{(1 - t) i B}{t} = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{D} \quad (\text{A.2a})$$

$$\frac{G}{t} = \frac{c_v B - i B s_p (1 - t)}{D} - \frac{(1 - t) i B}{t} \quad (\text{A.2b})$$

$$\frac{G}{t} = \frac{[c_v B - i B s_p (1 - t)] t - (1 - t) i B D}{D t} \quad (\text{A.2c})$$

$$\frac{G}{t} \times Dt = c_v Bt - iBs_p(1-t)t - (1-t)iBD \quad (\text{A.2d})$$

$$GD = c_v Bt - iBs_p(1-t)t - (1-t)iBD \quad (\text{A.2e})$$

$$GD = B[c_v t - is_p(1-t)t - (1-t)iD] \quad (\text{A.2f})$$

$$G = B \frac{c_v t - is_p(1-t)t - (1-t)iD}{D} \quad (\text{A.2g})$$

$$\frac{G}{B} = \frac{c_v t - is_p(1-t)t - (1-t)iD}{D} \quad (\text{A.2h})$$

A.3 De l'équation 2.15 à l'équation 2.16

$$Y = \frac{GD}{c_v t - is_p(1-t)t - (1-t)iD} \times \frac{c_v - is_p(1-t)}{D} \quad (\text{A.3})$$

A.4 De l'équation 2.16 à l'équation 2.18

Souvenons-nous que $D = \pi s_p(1-t) - c_v k$. On réarrange le dénominateur de (2.16) tel que :

$$\begin{aligned} [c_v - s_p i(1-t)]t - (1-t)i[\pi s_p(1-t) - c_v k] \\ &= [c_v - is_p(1-t)]t - s_p i(1-t)[\pi(1-t)] + c_v k(1-t)i \\ &= c_v t - is_p(1-t)t - s_p i(1-t)[\pi(1-t)] + c_v k(1-t)i \\ &= c_v [k(1-t)i + t] - s_p i(1-t)[t - \pi(1-t)] \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

La condition de seuil pour c_v afin que Y soit défini s'obtient simplement comme suit :

$$c_v [k(1-t)i + t] > s_p i(1-t)[t - \pi(1-t)] \quad (\text{A.5})$$

donc

$$c_v > \frac{s_p i(1-t)[t - \pi(1-t)]}{k(1-t)i + t} \quad (\text{A.6})$$

Enfin, la condition pour que $Y > G$ s'obtient comme suit :

$$c_v - s_p(1-t)i > c_v [k(1-t)i + t] - s_p i(1-t)[t - \pi(1-t)] \quad (\text{A.7})$$

$$c_v - c_v [k(1-t)i + t] > s_p(1-t)i - s_p i(1-t)[t - \pi(1-t)] \quad (\text{A.8})$$

$$c_v(1 - [k(1-t)i + t]) > s_p i(1-t)[1 - [t - \pi(1-t)]] \quad (\text{A.9})$$

$$c_v > \frac{s_p i(1-t)[1 - (t - \pi(1-t))]}{1 - [k(1-t)i + t]} \quad (\text{A.10})$$

Annexe au chapitre 3 : tests de rupture structurelle

On a procédé aux tests de rupture structurelle sur quatre mesures du ratio énergie / PIB : *travail utile* / PIB; exergie / PIB; et deux ratios d'énergie primaire sur PIB, avec la consommation d'énergie primaire mesurée par l'Agence Internationale de l'Énergie et par la *BP Review*¹. Nous avons procédé à trois types de tests, chacun pouvant être un test de Wald ou un test de maximum de vraisemblance : les tests supremum, les tests moyen et exponentiel. Les tests supremum utilisent le maximum des tests effectués sur chaque date possible de rupture structurelle et renvoient la date pour laquelle la probabilité de rupture structurelle est la plus élevée sur l'ensemble de la période; les tests moyen et exponentiel, plus puissants que les tests supremum, utilisent respectivement la moyenne et le logarithme naturel de la moyenne de l'exponentielle des tests effectués sur chaque date de rupture structurelle possible (ANDREWS et PLOBERGER, 1994). Ils permettent donc de tester la probabilité d'une rupture structurelle dans l'intervalle de temps qui nous intéresse. En effet, il est peu probable qu'un changement de régime intervienne brusquement à une date donnée, il est donc pertinent de tester une période de transition (HANSEN, 2001). Pour procéder aux tests, on a spécifié un modèle autorégressif simple afin de corriger de l'autocorrélation :

$$\frac{E_t}{PIB_t} = \alpha + \beta_1 \frac{E_{t-1}}{PIB_{t-1}} + \varepsilon_t \quad (\text{B.1})$$

pour l'Allemagne, la France, le Japon et le Royaume-Uni et

$$\frac{E_t}{PIB_t} = \alpha + \sum_{i=1}^3 \beta_i \frac{E_{t-i}}{PIB_{t-i}} + \varepsilon_t \quad (\text{B.2})$$

pour les États-Unis (jusqu'à $t-3$ pour le ratio *travail utile* / PIB et jusqu'à $t-2$ pour les trois autres ratios).

E_t/PIB_t est le ratio énergie / PIB à la date t et ε_t un terme d'erreur non autocorrélé. La statistique du test alternatif de Durbin est donnée dans le tableau B.4 page 191. Nous avons utilisé ce test plutôt que celui de Durbin-Watson car ce dernier est biaisé en faveur de l'acceptation de l'hypothèse nulle de non autocorrélation lorsque la variable expliquée retardée figure parmi les variables explicatives. Par ailleurs, le test alternatif de Durbin permet de tester l'autocorrélation d'ordre p , alors que celui de Durbin-Watson

1. Les données de l'IEA ne sont pas disponibles en libre-accès. On a reconstitué les séries d'énergie primaire en utilisant la variable *energy use per capita* des *World Development Indicators* de la Banque Mondiale construite à partir des données de l'IEA, multipliée par les estimations de population des WDI conformément à la note méthodologique accompagnant cette variable.

ne teste que l'autocorrélation d'ordre 1 (DURBIN, 1970). Les tests de rupture structurelle effectués ici sont robustes à une forme quelconque d'hétéroscédasticité.

Les tests confirment dans leur majorité la présence d'une rupture structurelle entre 1970 et 1980 pour tous les pays. Ces résultats confirment et prolongent ceux obtenus par WIEDENHOFER *et al.* (2013), ces derniers ne testant que pour une seule mesure de l'énergie, rapportée à la population. Ils seront également confirmés par les résultats du chapitre 4. Les résultats des tests de rupture structurelle sont présentés dans les tableaux B.1 page ci-contre et B.2 page 190. Le tableau B.3 page 191 les synthétise. Les propriétés des séries utilisées sont, quant à elles, reportées dans le tableau B.4 page 191.

Pays	Variable	Coef.	W_{suprem}	W_{moyen}	W_{exp}	L_{suprem}	L_{moyen}	L_{exp}
Allemagne	TU/PIB	α et β	1980	1970 - 1983**	1970 - 1983**	1980	1970 - 1983**	1970 - 1983**
		β	1971*	1970 - 1983**	1970 - 1983**	1971*	1970 - 1983**	1970 - 1983**
	Exer/PIB	α et β	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983***	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983***
		β	1971*	1970 - 1983**	1970 - 1983**	1971*	1970 - 1983**	1970 - 1983**
France	TU/PIB	α et β	1971***	1970 - 1983**	1970 - 1983***	1971***	1970 - 1983**	1970 - 1983***
		β	1971***	1970 - 1983**	1970 - 1983***	1971***	1970 - 1983**	1970 - 1983***
	Exer/PIB	α et β	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983***	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983***
		β	1974**	1970 - 1983**	1970 - 1983**	1974**	1970 - 1983**	1970 - 1983**
Japon	TU/PIB	α et β	1981***	1969-1982***	1969-1982***	1981***	1969-1982***	1969-1982***
		β	1981***	1969-1982***	1969-1982***	1981***	1969-1982***	1969-1982***
	Exer/PIB	α et β	1961	1969-1982	1969-1982	1961	1969-1982	1969-1982
		β	1970	1969-1982	1969-1982	1970	1969-1982	1969-1982
R-U.	TU/PIB (W.)	α et β	1980***	1969-1982***	1969-1982***	1980***	1969-1982***	1969-1982***
		β	1980***	1969-1982***	1969-1982***	1980***	1969-1982***	1969-1982***
	TU/PIB (S.)	α et β	1971	1970-1983*	1970-1983**	1971	1970-1983*	1970-1983**
		β	1980	1970-1983	1970-1983	1980	1970-1983	1970-1983
	Exer/PIB (W.)	α et β	1972**	1969-1982**	1969-1982**	1972**	1969-1982**	1969-1982**
		β	1972*	1969-1982**	1969-1982**	1972*	1969-1982**	1969-1982**
Exer/PIB (S.)	α et β	1971	1970-1983	1970-1983	1971	1970-1983	1970-1983	
	β	1997	1970-1983	1970-1983	1997	1970-1983	1970-1983	
É-U.	TU/PIB	α et β_i	1973***	1970-1983**	1970-1983***	1973**	1970-1983**	1970-1983***
		β_i	1973***	1970-1983***	1970-1983***	1973***	1970-1983***	1970-1983***
	Exer/PIB	α et β_i	1961**	1970-1983*	1970-1983**	1961**	1970-1983*	1970-1983**
		β_i	1976*	1970-1983*	1970-1983**	1976*	1970-1983*	1970-1983**

TABLEAU B.1 – Tests de Wald (W_i) et de maximum de vraisemblance (L_i) de rupture structurelle à date inconnue. Les tests supremum (i_{suprem}) renvoient la date où la probabilité de rupture structurelle est la plus élevée. Les tests moyen et exponentiel (i_{moyen} et i_{exp}) testent la probabilité d'une rupture structurelle sur un intervalle donné. TU/PIB : ratio du travail utile sur le PIB, Exer/PIB : ratio de l'exergie sur le PIB, Légende : * : significativité à un seuil de 10% ; ** significativité à un seuil de 5% ; *** : significativité à un seuil de 1%. Les dates et intervalles non significatifs sont dénués d'astérisque et sont en italique. Tous les tests ont pour hypothèse nulle l'absence de rupture structurelle. Sources des données : Warr et al. (2010) pour le Japon, le Royaume-Uni (W.) et les États-Unis et Serrenho et al. (2014) pour l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni (S.)

Pays	Variable	Coef.	W_{suprem}	W_{moyen}	W_{exp}	L_{suprem}	L_{moyen}	L_{exp}
Allemagne	E_{WDI}/PIB	α et β	1971*	1970 - 1983***	1970 - 1983**	1971	1970 - 1983***	1970 - 1983**
		β	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983**	1971**	1970 - 1983***	1970 - 1983**
	E_{BP}/PIB	α et β	1988	1970 - 1984	1970 - 1984	1988	1970 - 1984	1970 - 1984
		β	1988*	1970 - 1984*	1970 - 1984*	1988*	1970 - 1984*	1970 - 1984*
France	E_{WDI}/PIB	α et β	1997	1970 - 1983*	1970 - 1983*	1997	1970 - 1983*	1970 - 1983*
		β	1997*	1970 - 1983*	1970 - 1983*	1997*	1970 - 1983*	1970 - 1983*
	E_{BP}/PIB	α et β	1974	1970-1984*	1970-1984*	1974	1970-1984*	1970-1984*
		β	1974**	1970-1984*	1970-1984**	1974**	1970-1984*	1970-1984**
Japon	E_{WDI}/PIB	α et β	1975***	1970 - 1983***	1970 - 1983***	1975***	1970 - 1983***	1970 - 1983***
		β	1975***	1970 - 1983***	1970 - 1983***	1975***	1970 - 1983***	1970 - 1983***
	E_{BP}/PIB	α et β	1975***	1970-1984***	1970-1984***	1975***	1970-1984***	1970-1984***
		β	1975***	1970-1984***	1970-1984***	1975***	1970-1984***	1970-1984***
R-U.	E_{WDI}/PIB	α et β	1972**	1970 - 1983*	1970 - 1983***	1972**	1970 - 1983*	1970 - 1983***
		β	1972	1970 - 1983	1970 - 1983*	1972	1970 - 1983	1970 - 1983*
	E_{BP}/PIB	α et β	1971	1970-1984	1970-1984	1971	1970-1984	1970-1984
		β	1971	1970-1984	1970-1984	1971	1970-1984	1970-1984
É-U.	E_{WDI}/PIB	α et β_i	1977***	1970 - 1983***	1970 - 1983***	1977***	1970 - 1983***	1970 - 1983***
		β_i	1977**	1970 - 1983**	1970 - 1983***	1977**	1970 - 1983**	1970 - 1983***
	E_{BP}/PIB	α et β_i	1977***	1972-1985***	1972-1985***	1977***	1972-1985***	1972-1985***
		β_i	1973***	1972-1985***	1972-1985***	1973***	1972-1985***	1972-1985***

TABLEAU B.2 – Suite des tests de rupture structurelle à date inconnue. E_{BP}/PIB et E_{WDI}/PIB : ratio énergie primaire sur PIB. Sources des données : *World Development Indicators* (E_{WDI}) et *BP Review* 2015 (E_{BP})

Date	Fréquence	Décennie	Concentration des dates par décennie
1961	2	1960-1969	3,30%
1971	15	1970-1979	76,70%
1972	5	1980-1989	16,70%
1973	6	1990-2000	3,30%
1974	4		
1975	8	1970-1981	90,00%
1976	2		
1977	6		
1980	4		
1981	4		
1988	2		
1997	2		

TABLEAU B.3 – Synthèse des résultats des tests de rupture structurelle.

Pays	Ratio	Dates	Obs.	Durbin alternatif.	R^2
Allemagne	TU/PIB	1960-2009	49	0,67	0,94
	$Exer/PIB$	1960-2009	49	0,89	0,95
	E_{WDI}/PIB	1960-2013	53	0,66	0,93
	E_{BP}/PIB	1965-2014	49	0,55	0,99
France	TU/PIB	1960-2009	49	0,33	0,96
	$Exer/PIB$	1960-2009	49	0,89	0,96
	E_{WDI}/PIB	1960-2013	53	0,48	0,89
	E_{BP}/PIB	1965-2014	49	0,86	0,95
Japon	TU/PIB	1950-2000	50	0,78	0,91
	$Exer/PIB$	1950-2000	50	0,11	0,98
	E_{WDI}/PIB	1960-2013	53	0,8	0,94
	E_{BP}/PIB	1965-2014	49	0,28	0,97
R-U,	TU/PIB (W,)	1950-2000	50	0,78	0,9
	TU/PIB (S,)	1960-2009	49	0,11	0,98
	$Exer/PIB$ (W,)	1950-2000	50	0,34	0,98
	$Exer/PIB$ (S,)	1960-2009	49	0,12	0,98
	E_{WDI}/PIB	1960-2013	53	0,25	0,99
	E_{BP}/PIB	1965-2014	49	0,62	0,99
É-U,	TU/PIB	1950-2000	50	0,79	0,97
	$Exer/PIB$	1950-2000	50	0,14	0,99
	E_{WDI}/PIB	1960-2013	53	0,39	0,99
	E_{BP}/PIB	1965-2014	49	0,13	0,99

TABLEAU B.4 – Propriétés des séries du ratio énergie / PIB utilisée, test d'autocorrélation et coefficient de détermination de l'estimation. La p -value rapportée pour le test d'autocorrélation concerne l'autocorrélation d'ordre 1. L'hypothèse nulle du test est celle de non autocorrélation des erreurs.

Annexe au chapitre 4 : régressions complémentaires

Dans cette annexe, nous présentons des régressions complémentaires à celles figurant dans le chapitre 4 afin de vérifier la cohérence de nos résultats si l'on ajoute une variable de contrôle supplémentaire. Au vu de l'importance de l'énergie nucléaire en France, il nous a paru pertinent d'ajouter une variable de mix énergétique. Nous constatons sur la figure C.1 un découplage entre les émissions de CO₂ domestique et la consommation d'énergie, le point culminant correspondant à l'année 1979, soit dans la période de transition entre le régime d'accumulation fordiste et le régime d'accumulation néolibéral. Dans ces conditions, on ne peut exclure qu'une partie des effets capturés par les régressions du chapitre 4 soit due à l'évolution du mix énergétique français et notamment au déploiement de l'énergie nucléaire.

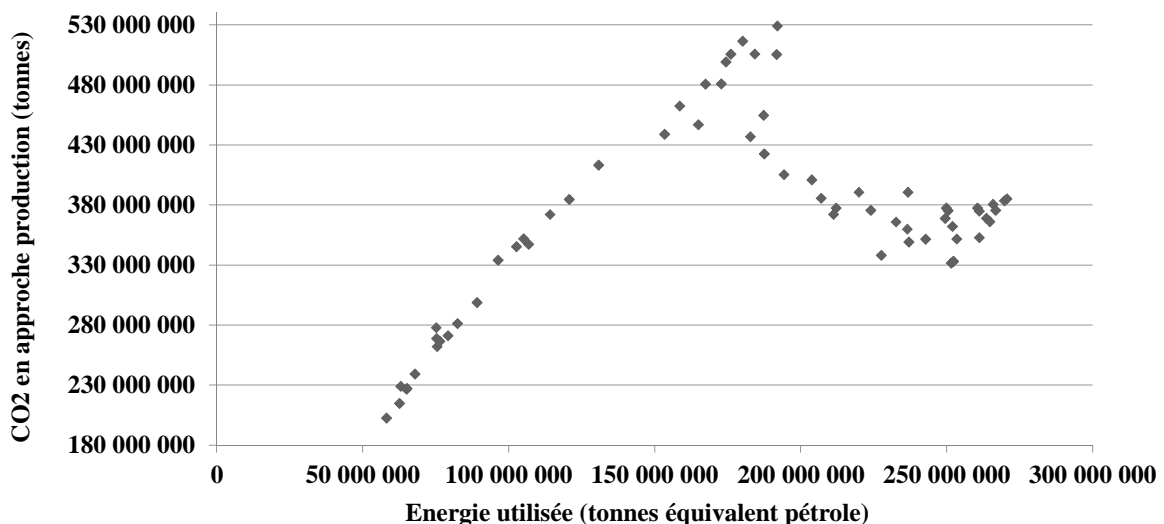


FIGURE C.1 – **Corrélation entre les émissions de CO₂ domestiques et l'énergie utilisée.** Le point culminant correspond à l'année 1979. Source des données : calculs de l'auteur, CDIAC, Banque Mondiale et Podobnik (2006)

Pour représenter le mix énergétique, nous avons construit une variable d'intensité carbone de l'énergie telle que $co2int = CO2/E$ avec $CO2$ les émissions de CO_2 domestiques et E l'énergie utilisée en France. Celle-ci n'est pas le moyen le plus direct de représenter l'importance relative des énergies non-carbonées : nous aurions pu prendre une variable représentant la part des énergies non-carbonées dans l'utilisation totale d'énergie. C'est que nous avons fait dans un premier temps : néanmoins, cette variable était intégrée d'ordre 2, ce qui la rend inutilisable dans un cadre ARDL. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 4, cet estimateur fonctionne pour des variables $I(0)$ et $I(1)$. Pour utiliser cette variable, il aurait donc fallu la faire entrer en différence parmi les variables en niveau afin de retrouver les propriétés de co-intégration. Cela n'était guère pertinent puisque, précisément, l'intérêt de l'estimateur ARDL est de pouvoir travailler sur des variables en niveau : toute différenciation d'une variable induit une perte d'information. En outre, beaucoup de problèmes statistiques se posaient, jetant le doute sur la fiabilité des régressions. La variable $co2int$ que nous avons construite ne présente pas ces difficultés, comme les résultats des tests qui suivent le montreront. Les émissions de CO_2 proviennent du CDIAC. L'énergie utilisée provient des données énergétiques de longue période de PODOBNIK (2006) et de la Banque mondiale. Pour les données de la Banque mondiale, nous avons multiplié la série *energy use per capita* par la série *population* pour retrouver l'énergie utilisée totale. Ces données couvrent la période 1960-2013. Afin de remonter jusqu'à 1950, nous avons calculé les taux de variations annuels de la consommation d'énergie pour la période 1950-1960 à partir des données de Podobnik et ainsi prolongé la série de la Banque mondiale en remontant le temps depuis 1960. L'examen graphique des données de Podobnik et de la Banque mondiale sur la période 1960-1997 (couverte par les deux séries) montrent que si celles de Podobnik sont plus élevées en niveau, la trajectoire des séries est similaire (figure C.2) : il était donc possible d'utiliser les taux de variations calculés à partir des données de Podobnik pour compléter la série de la Banque mondiale.

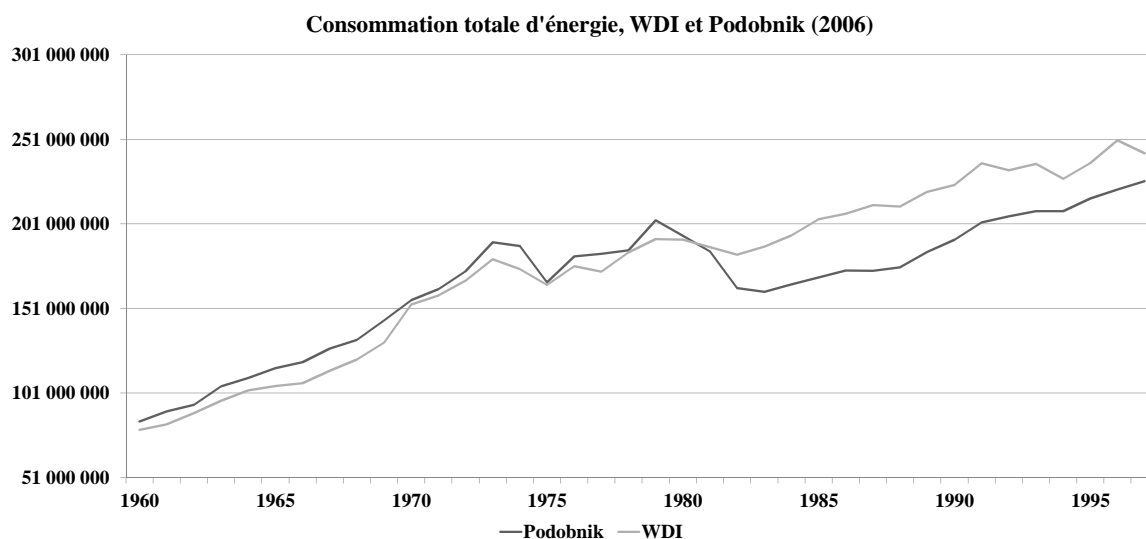


FIGURE C.2 – Comparaison des données d'énergie utilisée de la Banque mondiale et de PODOBNIK (ibid.). Unité : tonnes équivalent pétrole

La variable $co2int$ capture donc le mix énergétique en modélisant l'intensité en CO_2 de l'énergie : s'il y a découplage entre énergie et émissions de CO_2 , cela signifie que les énergies non-carbonées augmentent. Cette variable est, comme les autres, en logarithme : il est donc possible d'interpréter les coefficients obtenus par les régressions comme des variations en pourcentage.

Enfin, pour la régression avec le CO_2 en approche production, nous avons également pensé à ajouter

une variable permettant de modéliser l'émergence de la mondialisation et la délocalisation possible des émissions de CO₂ comme le taux d'ouverture commerciale de la France. Cela posait beaucoup de problèmes économétriques, notamment de l'autocorrélation qui est particulièrement problématique pour l'estimateur ARDL. Par ailleurs, cette variable n'était quasiment jamais significative, nous l'avons donc supprimée. La mondialisation et la délocalisation des émissions de CO₂ restent prises en compte par les régressions avec le CO₂ en approche consommation.

C.1 Tests de racine unitaire

Les tableaux C.1 et C.2 présentent les tests de racine unitaire pour les variables $co2int$ et $\Delta co2int$. Il apparaît une légère incertitude pour l'ordre d'intégration de $co2int$ sur la période néolibérale : ADF et P&P permettent de rejeter de justesse l'hypothèse d'une racine unitaire et pourrait donc être $I(0)$ en niveau pendant cette période. Toutefois, cela n'est pas gênant dans la mesure où ARDL permet de prendre indifféremment en compte des variables $I(1)$ et $I(0)$. De plus, la majeure partie des résultats indique que $co2int$ est bien $I(1)$ en niveau (non-rejet de H_0) et $I(0)$ en différence (rejet sans ambiguïté de H_0).

Test	1950-2013	Fordisme	Néolibéralisme
ADF	-1,353 (0,813)	-2,028 (0,586)	-3,146* (0,096)
P&P	-1,805 (0,701)	-2,940 (0,15)	-3,161* (0,093)
DF-GLS	-1,752 [-2,764]	-2,036 [-3,020]	-2,375 [-2,468]
Test de racine unitaire avec rupture structurelle			
Z&A 1	-4,699 [-4,58]		
Z&A 2	-2,610 [-4,11]		
Z&A 3	-3,803 [-4,82]		

TABLEAU C.1 – Tests de racine unitaire pour $co2int$. L'hypothèse nulle pour tous les tests est celle de la présence d'une racine unitaire donc de non stationnarité des variables. Les p -value sont données entre parenthèses et les valeurs critiques entre crochets. L'ensemble des valeurs critiques indiquées correspondent au seuil de 10%. L'hypothèse nulle est rejetée si la p -value est inférieure à 0,1 ou si la statistique de test obtenue est inférieure à la valeur critique. ADF : *Augmented Dickey-Fuller*; P&P : Phillips et Perron (statistique τ); DF-GLS : *Dickey-Fuller Generalized Least Square*, pour lequel est indiquée la statistique du retard le plus élevé et Z&A : Zivot et Andrews en (1) niveau, (2) tendance, (3) niveau et tendance.

Test	Période	$\Delta co2int$
ADF	1951-2013	-8,259*** (0)
	Fordisme	-4,516*** (0)
	Néolibéralisme	-5,910*** (0)
Z&A [1, 2, 3]	1951-2013	-10,052*** [-5,34]
		-9,769*** [-4,93]
		-10,563*** [-5,57]

TABLEAU C.2 – Tests de racine unitaire pour $\Delta co2int$. L'hypothèse nulle est celle de la présence d'une racine unitaire donc de non stationnarité des variables. Les p -values sont fournies entre parenthèses. Les valeurs critiques entre crochets correspondent au seuil de 1%. Rejet de H_0 à 10% : *, à 5% : **, à 1% : ***.

C.2 Tests de rupture structurelle

Les tests de rupture structurelle présentés dans le tableau C.3 confirment les résultats obtenus, même si les dates de rupture indiquée par les tests de type *supremum* sont 1970 et 1974. Cela ne remet pas en cause notre périodisation entre fordisme et néolibéralisme puisque ces dates entrent dans la période d'entrée en crise du premier et de transition vers le second. Pour des raisons statistiques de nombre d'observations dans chaque régime, nous avons néanmoins conservé 1980 comme date de découpage.

Coef.	W_{suprem}	W_{moyen}	W_{exp}	L_{suprem}	L_{moyen}	L_{exp}
β_i et α	1974***	[1971-1986]***	[1971-1986]***	1974***	[1971-1986]***	[1971-1986]***
β_i	1974***	[1971-1986]**	[1971-1986]***	1974***	[1971-1986]***	[1971-1986]***
α	1970***	[1971-1986]	[1971-1986]*	1970***	[1971-1986]	[1971-1986]*

TABLEAU C.3 – Tests de rupture structurelle à date inconnue pour la période 1951-2013 et la spécification avec le CO2 en approche production, l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole. On applique des tests de Wald (W_i) et du maximum de vraisemblance (L_i). Les tests *supremum* renvoient la date où la probabilité de rupture structurelle est la plus élevée. Les tests moyen et exponentiel testent la probabilité qu'il y ait une rupture structurelle sur un intervalle donné. L'hypothèse nulle est celle de l'absence de rupture structurelle. * : rejet de H_0 à 10% ; ** : rejet de H_0 à 5% ; *** : rejet de H_0 à 1%. Les tests portent sur le coefficient de la constante pour tester une rupture en niveau (α), sur les coefficients des variables de PIB, d'intensité en CO2 de l'énergie et du prix du pétrole pour tester une rupture structurelle en pente (β_i) et sur tous ces coefficients pour tester une rupture en niveau et en pente (β_i et α).

C.3 Tests de symétrie des coefficients

Le tableau C.4 indique le meilleur modèle en termes de symétrie et d'asymétrie. On note que pour le CO2 en approche consommation, le meilleur modèle est un modèle symétrique. Pour les trois autres, une asymétrie de court ou long termes est toujours présente.

Spécification	Période	W_{l-t}	W_{c-t}	Symétrie et asymétrie
$co2prod + co2int + oil$	1951-2013	29,29***	13,49***	Asymétries de long et de court termes
	Fordisme	0,24	10,48***	Symétrie de long terme mais asymétrie de court terme
	Néolibéralisme	4,09**	0,05	Asymétrie de long terme mais symétrie de court terme
$co2combi + co2int + oil$	Néolibéralisme	0,01	1,96	Symétries de long et de court termes

TABLEAU C.4 – Tests de Wald sur la symétrie des coefficients de long terme (W_{l-t}) et de court terme (W_{c-t}). Les *p-values* sont fournies entre parenthèses. H_0 : symétrie des coefficients. Rejet de H_0 à 10% : * , à 5% : ** , à 1% : ***.

C.4 Résultats des estimations et tests de diagnostic

Le tableau C.5 présente les résultats des régressions pour la spécification avec $co2int$ et oil en variables de contrôle. Par soucis de lisibilité et de simplicité, on ne reproduit pas ici les coefficients des variables en niveau — qui ne s'interprètent pas directement mais servent seulement au calcul des coefficients de long terme β_i — ni les *p-value*. La significativité est indiquée au moyen des étoiles.

Le tableau C.6 présente les résultats des tests de diagnostics. Les régressions ne présentent pas de problème particulier. Seul le test de *skewness-kurtosis* pour la période 1951-2013 indique un léger

Variables	1950-2013	Fordisme	Néolibéralisme	
$co2prod_{t-1}$	-0,488***	-0,69***	-0,667***	—
$co2combi_{t-1}$	—	—	—	-0,452***
β_{pib}^{sup}	1,020***	0,938***	—	—
β_{pib}^{inf}	0,144	-1,522***	—	—
β_{pib}	—	—	0,555***	0,823***
β_{co2int}	0,954***	0,202	1,037***	0,520
β_{oil}	-0,068***	-0,085***	-0,086***	-0,127**
Δpib^{sup}	0,499***	—	-0,51	—
Δpib^{inf}	0,071	—	0,121	—
Δpib	—	1,561***	—	0,373**
$\Delta co2int$	1,072***	0,592***	1,265***	0,235
Δoil	-0,034***	-0,029	-0,004	-0,057***
Const.	5,472***	8,550***	3,175**	0,792
$\overline{R^2}$	0,69	0,80	0,71	0,43

TABLEAU C.5 – Régressions pour les spécifications avec l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole. Le $\overline{R^2}$ ajusté permet de mesurer si l'ajout d'une variable explicative supplémentaire améliore vraiment le pouvoir de prédiction du modèle (c'est-à-dire davantage que ce qui serait dû au hasard) tandis que le R^2 augmente mécaniquement avec l'ajout d'une variable supplémentaire sans que cela dise quoi que ce soit du réel pouvoir de prédiction du modèle. Le $\overline{R^2}$ est toujours légèrement inférieur au R^2 . Significativité : 10% : *, 5% : **, 1% : ***.

problème de normalité des résidus au seuil de 10%, mais le test de Shapiro-Wilk indique qu'il n'y a pas de problème.

Test	Stat.	1951-2013	Fordisme	Néolibéralisme
χ_{acd}^2	Stat.	0,08	0,003	0,044
	P-value	0,77	0,95	0,82
χ_{acbg}^2	Stat.	0,09	0,004	0,063
	P-value	0,75	0,94	0,79
χ_{hetbp}^2	Stat.	0,05	1,05	0,00
	P-value	0,83	0,30	0,96
F_{rr}	Stat.	0,66	0,23	0,61
	P-value	0,57	0,86	0,62
W_{sw}	Stat.	0,96	0,97	0,97
	P-value	0,21	0,9	0,45
χ_{sk}^2	Stat.	5,67*	0,97	3,63
	P-value	0,06	0,6	0,15

TABLEAU C.6 – Tests de diagnostic pour les spécifications avec l'intensité en CO2 de l'énergie et le prix du pétrole. χ_{acd}^2 : test d'autocorrélation alternatif de Durbin, χ_{acbg}^2 : test d'autocorrélation de Breusch-Godfrey, χ_{hetbp}^2 : test d'hétéroscédasticité de Breusch-Godfrey, F_{rr} : test de variable omise de Ramsey's Reset, W_{sw} : test de normalité de Shapiro-Wilk et χ_{sk}^2 : test de normalité Skewness-Kurtosis. H0 : absence d'autocorrélation, absence d'hétéroscédasticité, pas de variable omise et normalité. Rejet de H0 à 10% : *, à 5% : **, à 1% : ***.

Annexe au chapitre 5 : données, analyse en composantes principales et classification

Sont présentés dans cette annexe les données brutes, les résultats détaillés de l'analyse en composantes principales et de la classification ainsi que les détails des calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de gaz à effet de serre des pays membres de l'Union européenne et des taux de référence d'après le scénario du GIEC afin d'établir une caractérisation des *volontarismes carbone*.

La *Contribution Intentionnelle Déterminée Nationalement* de l'Union européenne énonce un objectif commun de 40% de réduction des émissions de GES d'ici à 2030 relativement à 1990 qui comprend tous les secteurs de l'économie. Le 20 juillet 2016 la Commission européenne a publié des objectifs préliminaires de réduction d'émission pour les secteurs non couverts par le système européen de quotas d'émissions (SEQE-UE) : l'agriculture, la construction, la gestion des déchets, le transport, la capture du CO₂ et son stockage et l'UTCF. Ces secteurs devront réduire leurs émissions de 30% relativement à leur niveau d'émissions de 2005. Les secteurs couverts par le SEQE-UE sont, eux, sujets à un objectif de réduction de 43% d'ici à 2030 par rapport à 2005 (Commission européenne, 2016). Ces secteurs sont

« les installations intensives en énergie, soit les centrales énergétiques et autres usines de combustion ayant un intrant thermique supérieur ou égal à 20MW (à l'exception des installations municipales de gestion des déchets et des installations de gestion des déchets dangereux), les raffineries de pétrole, les fours à coke, à fer et à acier, les installations produisant du ciment clinker, du verre, de la chaux, des briques, de la céramique, de la pâte à papier, du papier et du carton, de l'aluminium, les installations pétrochimiques, produisant de l'ammoniaque, de l'acide nitrique, adipique et glyoxylique, capturant le CO₂, le transport en pipelines et le stockage géologique de CO₂. Le SEQE-UE inclut aussi les vols à l'intérieur de l'UE jusqu'en 2016 (...) » (COMMISSION EUROPÉENNE, p.d., p. 20)¹

Pour calculer la valeur de la variable COP21 pour chaque pays membre de l'Union européenne, nous avons d'abord calculé la part des secteurs SEQE-UE dans les émissions totales de 2005 et déduit, à partir de là, la part des secteurs non SEQE-UE (calculs effectués à partir des données d'émissions sectorielles et agrégées d'Eurostat et de la CNUCC). Nous avons ensuite utilisé les taux de réduction annoncés pour

1. La situation de l'aviation à partir de 2017 dépendra des décisions de l'Organisation internationale de l'aviation civile. De plus, on remarque que la capture et le stockage de CO₂ figurent à la fois dans les secteurs couverts et non couverts par le SEQE-UE : nous faisons l'hypothèse que certains types de capture et de stockage de CO₂ sont couverts par le SEQE-UE et que d'autres ne le sont pas

Pays	Classe	COP21	PrimAgri	PrimIndus	SecManuf	SecConst	Ter_Serv	Ter_FIRE
Brésil	1	112	5,1	7	13,9	6,3	53	15
Chili	1	222	3,5	13,8	11	7,8	43	5
Chine	1	255	9,7	6,9	30,1	6,9	33	13
Inde	1	442	17,6	4,1	14,9	8,1	38	17
Mexique	1	35	3,3	9,2	17,8	7,4	47	15
Pologne	1	-42	2,8	6,1	17,9	7,1	54	9
Slovaquie	1	-46	4,3	4,2	20,3	8,1	51	11
Turquie	1	389	8	4,2	17,8	5,1	50	14
Australie	2	-5	2,5	9,9	6,8	8,8	50	22
Canada	2	8	1,5	9,8	10,7	7,2	52	19
Norvège	2	-40	1,6	25,1	7,9	5,8	51	12
Russie	2	-11	4,2	13,7	15,6	6,5	42	18
Af. du Sud	2	20	2,5	12,1	13,3	4,1	47	21
Autriche	3	-23	1,4	3,1	18	6,2	56	15
Rép. tchèque	3	-50	2,6	5,6	25,5	5,4	47	13
Estonie	3	-75	3,4	5,7	15,5	6,4	55	14
Allemagne	3	-51	0,7	3	21,8	4,4	54	15
Grèce	3	-10	3,9	3,5	9,5	3	59	22
Hongrie	3	-38	4,3	3,2	22,5	4,2	53	11
Irlande	3	-15	1,6	3	19,7	2,9	56	16
Israël	3	106	1,3	2,5	14,1	5,4	56	21
Italie	3	-33	2,1	3,1	15,3	4,9	54	20
Japon	3	-15	1,2	2,1	18,7	6,1	56	16
Portugal	3	4	2,3	3,7	12,9	4,4	58	18
Slovénie	3	-42	2,1	4,2	22,4	5,5	53	11
Corée du Sud	3	81	2,3	3	30,3	4,9	46	14
Espagne	3	2	2,4	3,6	12,8	5,2	59	16
Royaume-Uni	3	-47	0,7	4	10,4	6	60	19
États-Unis	3	-30	1,3	4,4	12,3	4	59	19
Belgique	4	-38	0,7	2,7	13,5	5,6	63	15
Danemark	4	-45	1,5	4,6	13,2	4,5	59	17
Finlande	4	-59	2,8	3,5	16,5	6,2	55	16
France	4	-40	1,6	2,5	11	5,6	62	17
Pays-Bas	4	-40	1,8	4,5	11,8	4,4	64	13
N.-Zélande	4	-11	6,1	5,4	11,9	5,7	50	21
Suède	4	-38	1,3	3,4	15,4	5,7	59	13
Suisse	4	-50	0,8	1,9	19	5,3	62	11
Moyenne		21	3,16	5,74	16	5,71	53,14	15,51
Ecart-type		118	3,09	4,46	5,39	1,36	6,82	3,79

TABLEAU D.1 – Données brutes pour l'analyse en composantes principales et la classification par classe puis ordre alphabétique. Pour *EmbCO2*, un chiffre négatif signifie des exportations nettes de CO2.

obtenir les émissions en 2030 et finalement calculé les taux de réduction d'émission en termes de 1990. Les tableaux D.13, D.14 et D.15 détaillent les données et les calculs. Nos résultats sont cohérents avec les données fournies par la Commission européenne et la CIDN : une part de 60% des secteurs non-SEQE-UE dans les émissions totales, des réductions d'émissions de 43% et 32% respectivement pour les secteurs SEQE-UE et non SEQE-UE par rapport à 2005 et une réduction commune totale de 40% par rapport à 1990 d'ici à 2030.

Pays	Classe	COP21	GDP Cap	EmbCO2	IUCN	GreenP	FinIndex	WShare	ClassGHG
Brésil	1	112	14 635	12,31	0,1	0,02	21,09	50,29	14,42
Chili	1	222	23 794	1,74	0,17	0,04	25,28	44,83	8,5
Chine	1	255	13 705	-19,57	0,02	0,01	-9	56,72	9,65
Inde	1	442	5 494	-9,95	0,03	0	34,35	30,44	5,34
Mexique	1	35	17 931	3,95	0,16	0,02	46,85	38,6	10,1
Pologne	1	-42	25 717	6,3	0,24	0,12	32,9	53,97	4,4
Slovaquie	1	-46	28 472	42,38	0,18	0,12	31,48	49,42	3,43
Turquie	1	389	18 799	22,98	0,07	0,13	38,67	39	6,1
Australie	2	-5	49 636	10,17	1,28	0,21	14,98	58,8	5,49
Canada	2	8	46 228	4,95	0,62	0,25	15,98	63,36	6,81
Norvège	2	-40	67 273	31,25	0,58	0,62	20,7	56,18	3,17
Russie	2	-11	24 044	-25,66	0,05	0	8,61	63,96	5,04
Af. du Sud	2	20	14 460	-22,34	0,46	0,01	22,09	51,87	10,83
Autriche	3	-23	48 457	32,81	0,59	0,12	16,76	63,7	3,39
Rép. tchèque	3	-50	30 400	1,65	0,48	0,09	26,13	51,71	3,06
Estonie	3	-75	29 155	-14,69	1,52	0	13,04	61,04	4,1
Allemagne	3	-51	46 617	5,14	0,3	0,72	19,21	62,79	3,75
Grèce	3	-10	27 065	35,06	0,64	0,09	41,5	57,36	4,64
Hongrie	3	-38	25 538	18,45	0,71	0,12	18,93	55,78	3,43
Irlande	3	-15	47 882	22,43	0	0	33,81	45,25	3,7
Israël	3	106	35 151	14,89	0,49	1,22	20,41	52,97	8,35
Italie	3	-33	34 622	21,42	0,36	0,14	30,23	61,59	4,54
Japon	3	-15	37 669	16,52	0,16	0,01	18,7	64,73	4,69
Portugal	3	4	26 738	23,06	0,48	0	28,79	59,27	4,82
Slovénie	3	-42	31 386	11,35	0,48	0,12	17,34	70,43	2,85
Corée du Sud	3	81	37 374	0,92	0,65	0,01	16,78	67,3	6,46
Espagne	3	2	33 249	32,76	0,84	0,22	24,4	60,72	4,62
Royaume-Uni	3	-47	40 774	33,81	0,68	0,2	19,83	64,38	4,58
États-Unis	3	-30	55 310	13,65	0,29	0,08	22,98	61,65	9,08
Belgique	4	-38	46 749	-8,36	1,16	0,85	15,86	66,8	3,57
Danemark	4	-45	45 512	36,64	1,77	0,62	14,08	66,13	3,1
Finlande	4	-59	42 522	22,27	1,1	0,62	17,56	64,55	3,28
France	4	-40	39 152	32,34	0,91	0,25	12,24	66,97	3,94
Pays-Bas	4	-40	48 013	16,12	2,25	2,43	21,93	65,87	3,43
N.-Zélande	4	-11	37 173	10,21	2	1,11	21,6	54,8	5,9
Suède	4	-38	47 426	47,71	1,13	0,62	8,59	62,74	3,3
Suisse	4	-50	58 925	59,07	2,32	1,95	14,86	68,79	4,16
Moyenne		21	35 218	14,7	0,68	0,35	21,61	57,7	5,41
Ecart-type		118	13 681	19,3	0,62	0,54	10,12	9,1	2,61

TABLEAU D.2 – Données brutes pour l'analyse en composantes principales et la classification par classe puis ordre alphabétique (suite). Pour EmbCO2, un chiffre négatif signifie des exportations nettes de CO2.

Composante	Valeur propre	Pourcentage de la variance	Pourcentage cumulatif de la variance
comp 1	4,59	35,29	35,29
comp 2	1,75	13,44	48,73
comp 3	1,62	12,48	61,21
comp 4	1,29	9,95	71,16
comp 5	1,12	8,59	79,75
comp 6	0,76	5,84	85,59
comp 7	0,62	4,78	90,37
comp 8	0,42	3,25	93,62
comp 9	0,34	2,62	96,24
comp 10	0,21	1,63	97,87
comp 11	0,15	1,14	99,01
comp 12	0,09	0,72	99,73
comp 13	0,03	0,27	100
Total	13		
Moyenne		7,69	

TABLEAU D.3 – Valeurs propres, pourcentages de variance et pourcentages de variance cumulatifs des axes factoriels (composantes). Les axes correspondant au critère de sélection sont en gras. Pour choisir le nombre d'axes à conserver, nous avons suivi le critère de Keiser : nous avons gardé les axes avec une valeur propre supérieure à la moyenne. Comme nous avons procédé à une analyse en composante principale centrée-réduite, la somme des valeurs propres est égale au nombre des variables actives et, par conséquent, la valeur propre moyenne est de 1. Les axes 1 à 5 remplissent ce critère. Nous avons appliqué trois autres critères pour confirmer ce choix : le critère du coude, le *Scree-test* et le critère de variance moyenne. À l'exception du *Scree-test*, qui indiquait de garder quatre axes, les deux autres critères confirment le choix de cinq axes. Le critère du coude s'appuie sur une analyse graphique : il s'agit de garder tous les axes au-dessus et proches de 1 jusqu'à ce qu'intervienne une rupture précédant une baisse continue des valeurs propres. Le *Scree-test* s'appuie sur les différences même des valeurs propres : nous gardons alors tous les axes pour lesquels la différence même est positive. Finalement, selon critère de la variance moyenne, nous gardons tous les axes au-dessus de la moyenne (ici 7,69%).

Variables	Coordonnées sur les axes					Contributions aux axes				
	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
PrimAgri	-0,72	0,03	-0,07	0,19	0,52	11,45	0,06	0,31	2,94	23,92
PrimIndus	-0,3	-0,16	0,73	0,22	-0,4	2,02	1,53	32,42	3,63	14,13
SecManuf	-0,27	-0,49	-0,75	-0,08	-0,02	1,58	14,02	34,75	0,49	0,04
SecConst	-0,44	-0,33	0,37	0,42	0,07	4,24	6,2	8,33	13,66	0,42
Ter_Serv	0,87	0,34	-0,09	-0,02	-0,05	16,53	6,6	0,46	0,05	0,21
Ter_FIRE	0,1	0,45	0,33	-0,66	0,26	0,22	11,82	6,78	33,66	5,93
GDPCap	0,82	-0,11	0,21	0,1	-0,25	14,72	0,74	2,82	0,79	5,71
EmbCO2	0,63	0,33	-0,2	0,38	-0,12	8,77	6,29	2,43	11,04	1,31
IUCN	0,72	-0,16	0,21	0,16	0,51	11,39	1,46	2,6	1,87	23,05
GreenP	0,64	-0,1	0,15	0,27	0,5	9	0,61	1,42	5,77	22,48
ClassGHG	-0,55	0,11	0,31	-0,34	0,09	6,64	0,71	5,83	8,85	0,68
FinIndex	-0,23	0,82	-0,17	0,31	-0,1	1,15	38,86	1,86	7,49	0,96
WShare	0,75	-0,44	0,01	-0,36	-0,11	12,3	11,11	0	9,79	1,17

TABLEAU D.4 – Coordonnées et contributions des variables aux axes. Plus la coordonnée d'une variable sur un axe est élevée, plus sa contribution à l'axe l'est également.

Variables	Cosinus carrés					Sommes des cosinus carrés			
	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Plan 1 : 2	Plan 1 : 3	Plan 1 : 4	Plan 1 : 5
PrimAgri	0,53	0	0,01	0,04	0,27	0,53	0,53	0,56	0,79
PrimIndus	0,09	0,03	0,53	0,05	0,16	0,12	0,62	0,14	0,25
SecManuf	0,07	0,24	0,56	0,01	0	0,32	0,64	0,08	0,07
SecConst	0,19	0,11	0,14	0,18	0	0,3	0,33	0,37	0,2
Ter_Serv	0,76	0,12	0,01	0	0	0,87	0,77	0,76	0,76
Ter_FIRE	0,01	0,21	0,11	0,44	0,07	0,22	0,12	0,45	0,08
GDPcap	0,68	0,01	0,05	0,01	0,06	0,69	0,72	0,69	0,74
EmbCO2	0,4	0,11	0,04	0,14	0,01	0,51	0,44	0,55	0,42
IUCN	0,52	0,03	0,04	0,02	0,26	0,55	0,56	0,55	0,78
GreenP	0,41	0,01	0,02	0,07	0,25	0,42	0,44	0,49	0,66
ClassGHG	0,3	0,01	0,09	0,11	0,01	0,32	0,4	0,42	0,31
FinIndex	0,05	0,68	0,03	0,1	0,01	0,73	0,08	0,15	0,06
WShare	0,56	0,19	0	0,13	0,01	0,76	0,56	0,69	0,58

TABLEAU D.5 – Cosinus carrés et sommes des cosinus carrés des variables.

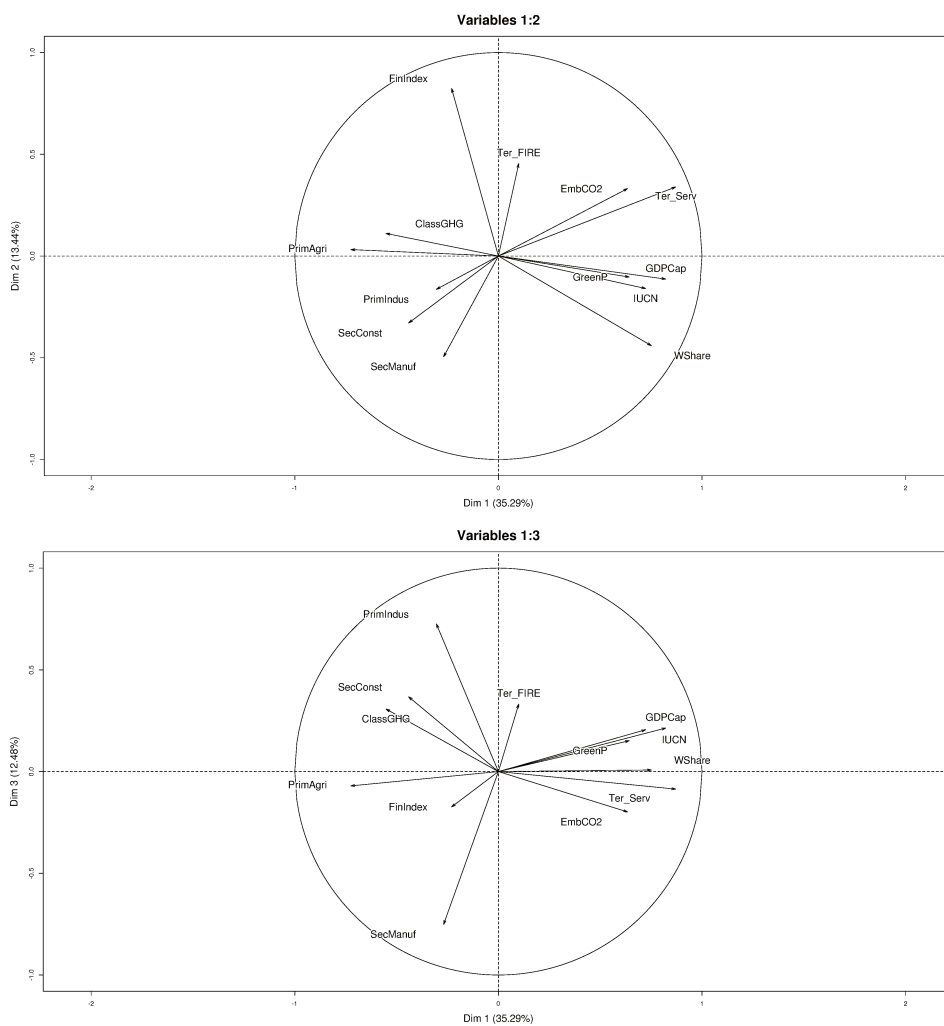


FIGURE D.1 – Plans 1 : 2 et 1 : 3 pour les variables. Plus une variable est proche du cercle unitaire, plus sa projection sur le plan est de qualité. Plus une variable est proche d'un axe, plus est elle est corrélée à cet axe : les pays qui ont une valeur absolue élevée pour cet axe auront donc une valeur absolue élevée pour cette variable.

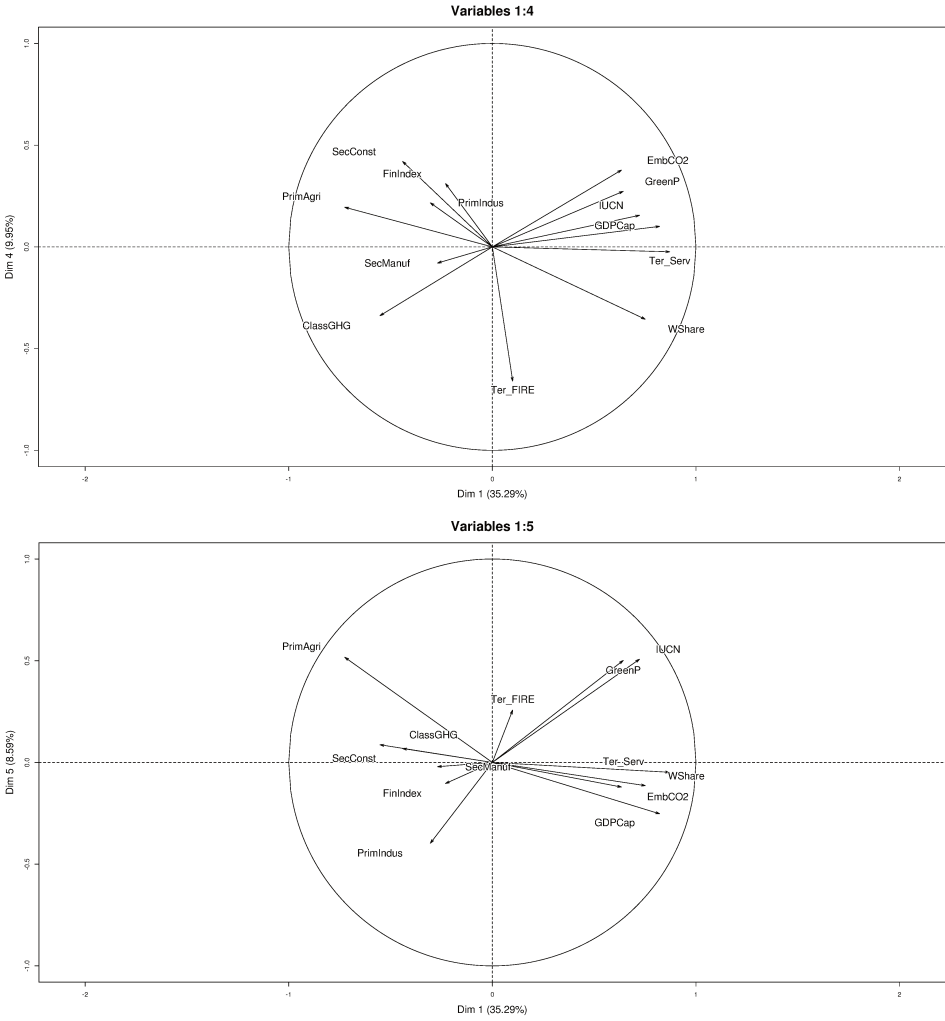


FIGURE D.2 – Plans 1 :4 et 1 :5 pour les variables.

Pays	Coordonnées					Contributions				
	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Australie	0,26	-0,27	3,12	-0,02	0,34	0,04	0,12	16,25	0	0,27
Autriche	1,27	-0,48	-0,66	0,13	-0,8	0,95	0,36	0,73	0,04	1,55
Belgique	2,12	-0,69	0,25	-0,47	0,4	2,65	0,74	0,1	0,46	0,38
Brésil	-2,6	0,75	0,83	-0,81	0,21	3,99	0,87	1,14	1,38	0,11
Canada	0,14	-0,44	2,08	-0,63	-0,52	0,01	0,3	7,21	0,84	0,66
Chili	-3,04	-0,74	1,38	2,29	-1,3	5,45	0,85	3,18	10,92	4,07
Chine	-4,31	-4,02	-0,66	-1,31	1,12	10,96	24,96	0,73	3,56	3,03
Rép. tchèque	-1,14	-0,7	-1,57	0,34	-0,52	0,77	0,75	4,11	0,24	0,66
Danemark	2,84	-0,08	0,16	-0,1	0,5	4,74	0,01	0,04	0,02	0,62
Estonie	-0,04	-1,31	0,37	-0,28	0,59	0	2,65	0,23	0,17	0,85
Finlande	1,34	-0,59	-0,15	0,21	0,45	1,06	0,54	0,04	0,09	0,48
France	2	0,12	0,09	-0,52	-0,08	2,36	0,02	0,01	0,56	0,01
Allemagne	1,01	-0,68	-1,18	-0,68	-0,49	0,6	0,72	2,31	0,97	0,59
Grèce	0,75	3,4	-0,45	-0,91	0,12	0,33	17,86	0,34	1,72	0,04
Hongrie	-0,21	-0,54	-2,03	0,27	-0,04	0,03	0,45	6,84	0,15	0
Inde	-5,69	1,18	-0,2	1,6	2,79	19,08	2,17	0,07	5,34	18,83
Irlande	0,24	1,83	-1,81	-0,25	-1,28	0,03	5,16	5,45	0,13	3,96
Israël	0,55	0,98	0,53	-1,01	1,07	0,18	1,48	0,46	2,12	2,75
Italie	0,38	1,24	-0,5	-0,93	-0,32	0,09	2,38	0,42	1,81	0,25
Japon	0,38	-0,31	-0,86	-0,73	-0,82	0,09	0,15	1,23	1,1	1,64
Mexique	-3,38	1,72	0,38	0,94	-0,38	6,74	4,56	0,24	1,84	0,36
Pays-Bas	3,99	-0,28	0,59	1,25	2,24	9,39	0,12	0,58	3,25	12,15
N.-Zélande	0,62	0,38	1,37	-0,03	2,61	0,23	0,22	3,15	0	16,45
Norvège	0,97	-0,48	3,29	2,28	-2,61	0,55	0,36	17,98	10,84	16,43
Pologne	-1,19	-0,09	-0,78	1,48	-0,88	0,84	0,01	1	4,57	1,89
Portugal	0,38	1,53	-0,51	-0,75	-0,36	0,08	3,62	0,44	1,18	0,32
Russie	-2,17	-1,85	1,58	-1,31	-0,56	2,77	5,32	4,18	3,61	0,75
Slovaquie	-1,13	0,2	-1,28	2,28	-0,57	0,75	0,06	2,72	10,9	0,79
Slovénie	0,36	-1,55	-1,52	-0,08	-0,83	0,08	3,69	3,84	0,01	1,65
Af. du Sud	-2,34	0,73	1,61	-2,36	0,03	3,22	0,83	4,34	11,61	0
Corée du Sud	-0,52	-1,93	-1,88	-1,28	-0,36	0,16	5,76	5,87	3,45	0,32
Espagne	1,06	0,91	-0,31	0,02	-0,12	0,66	1,28	0,16	0	0,04
Suède	2,39	-0,74	-0,39	0,75	-0,13	3,37	0,84	0,26	1,19	0,04
Suisse	4,58	-1,11	-0,56	1,78	1,46	12,38	1,89	0,53	6,6	5,13
Turquie	-2,4	1,93	-1,34	1,08	0,43	3,39	5,78	2,98	2,46	0,45
Royaume-Uni	1,59	0,8	0,5	-0,5	-0,46	1,48	0,98	0,42	0,52	0,52
États-Unis	0,94	1,17	0,5	-1,74	-0,9	0,52	2,13	0,42	6,32	1,96

TABLEAU D.6 – Coordonnées et contributions des pays aux axes. Plus la coordonnée est élevée sur un axe, plus la contribution du pays à l'axe est importante.

Pays	Cosinus carrés					Somme des cosinus carrés			
	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	Plan 1 : 2	Plan 1 : 3	Plan 1 : 4	Plan 1 : 5
Australie	0	0,01	0,66	0	0,01	0,01	0,66	0	0,01
Autriche	0,36	0,05	0,1	0	0,14	0,42	0,46	0,37	0,51
Belgique	0,51	0,06	0,01	0,03	0,02	0,57	0,52	0,54	0,53
Brésil	0,4	0,03	0,04	0,04	0	0,43	0,44	0,44	0,4
Canada	0	0,03	0,71	0,07	0,04	0,03	0,71	0,07	0,05
Chili	0,42	0,02	0,09	0,24	0,08	0,44	0,5	0,65	0,49
Chine	0,46	0,4	0,01	0,04	0,03	0,86	0,47	0,5	0,49
Rép. tchèque	0,19	0,07	0,37	0,02	0,04	0,27	0,56	0,21	0,23
Danemark	0,83	0	0	0	0,03	0,83	0,83	0,83	0,85
Estonie	0	0,27	0,02	0,01	0,05	0,27	0,02	0,01	0,06
Finlande	0,6	0,12	0,01	0,02	0,07	0,72	0,61	0,62	0,67
France	0,59	0	0	0,04	0	0,59	0,59	0,63	0,59
Allemagne	0,18	0,08	0,25	0,08	0,04	0,26	0,43	0,26	0,22
Grèce	0,04	0,77	0,01	0,05	0	0,8	0,05	0,09	0,04
Hongrie	0,01	0,05	0,68	0,01	0	0,06	0,69	0,02	0,01
Inde	0,66	0,03	0	0,05	0,16	0,69	0,67	0,72	0,82
Irlande	0	0,28	0,27	0,01	0,14	0,28	0,28	0,01	0,14
Israël	0,04	0,13	0,04	0,14	0,15	0,17	0,08	0,18	0,19
Italie	0,04	0,4	0,07	0,23	0,03	0,44	0,1	0,26	0,06
Japon	0,04	0,03	0,21	0,15	0,19	0,07	0,25	0,19	0,24
Mexique	0,57	0,15	0,01	0,04	0,01	0,72	0,58	0,62	0,58
Pays-Bas	0,57	0	0,01	0,06	0,18	0,57	0,58	0,62	0,75
N.-Zélande	0,04	0,01	0,18	0	0,65	0,05	0,22	0,04	0,69
Norvège	0,03	0,01	0,37	0,18	0,23	0,04	0,4	0,21	0,26
Pologne	0,2	0	0,08	0,31	0,11	0,2	0,28	0,51	0,31
Portugal	0,03	0,56	0,06	0,14	0,03	0,6	0,1	0,17	0,07
Russie	0,3	0,22	0,16	0,11	0,02	0,53	0,47	0,42	0,32
Slovaquie	0,12	0	0,15	0,47	0,03	0,12	0,26	0,59	0,14
Slovénie	0,02	0,36	0,35	0	0,1	0,38	0,37	0,02	0,12
Af. du Sud	0,31	0,03	0,15	0,31	0	0,34	0,45	0,62	0,31
Corée du Sud	0,02	0,32	0,31	0,14	0,01	0,35	0,33	0,17	0,03
Espagne	0,39	0,29	0,03	0	0,01	0,68	0,42	0,39	0,4
Suède	0,64	0,06	0,02	0,06	0	0,7	0,66	0,7	0,64
Suisse	0,68	0,04	0,01	0,1	0,07	0,72	0,69	0,78	0,75
Turquie	0,44	0,28	0,14	0,09	0,01	0,72	0,57	0,53	0,45
Royaume-Uni	0,44	0,11	0,04	0,04	0,04	0,55	0,49	0,49	0,48
États-Unis	0,1	0,15	0,03	0,33	0,09	0,25	0,12	0,43	0,19

TABLEAU D.7 – Cosinus carrés et sommes des cosinus carrés des pays.

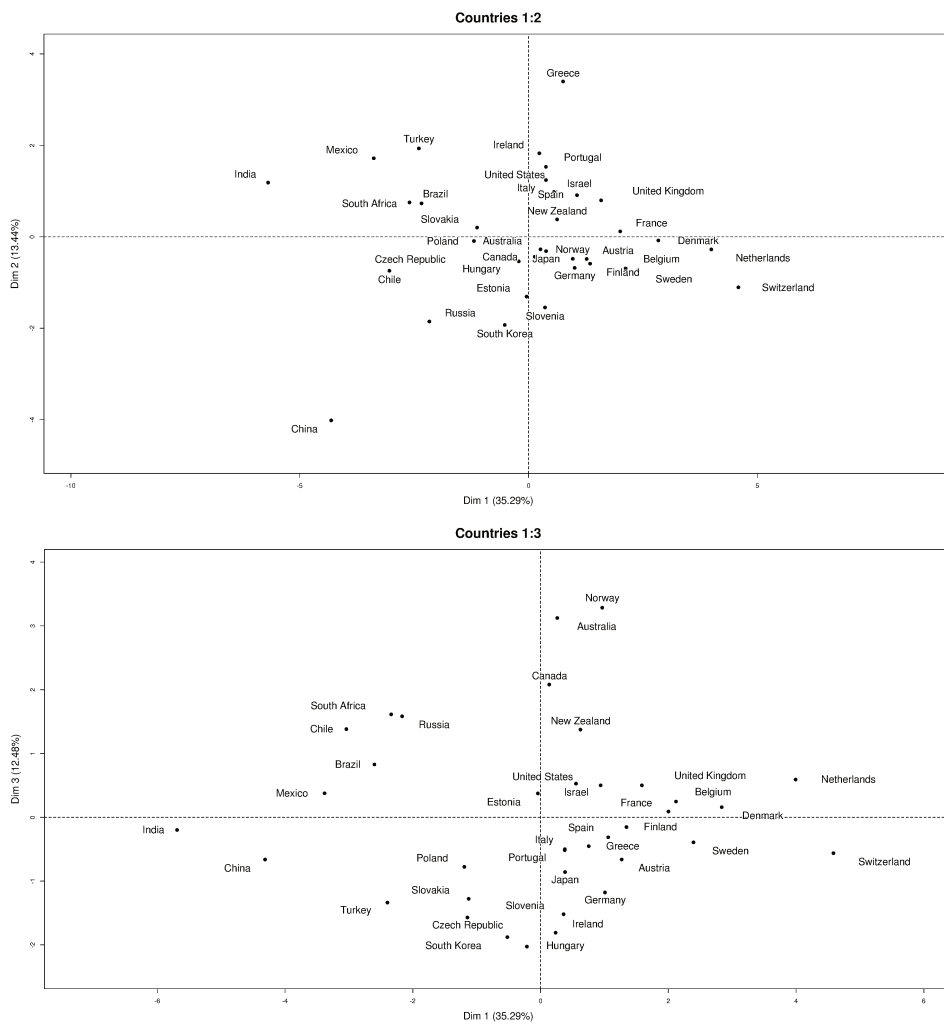


FIGURE D.3 – Plans 1 : 2 et 1 : 3 pour les pays. Les pays avec une valeur absolue élevée pour un axe auront une valeur absolue élevée pour les variables corrélées à cet axe.

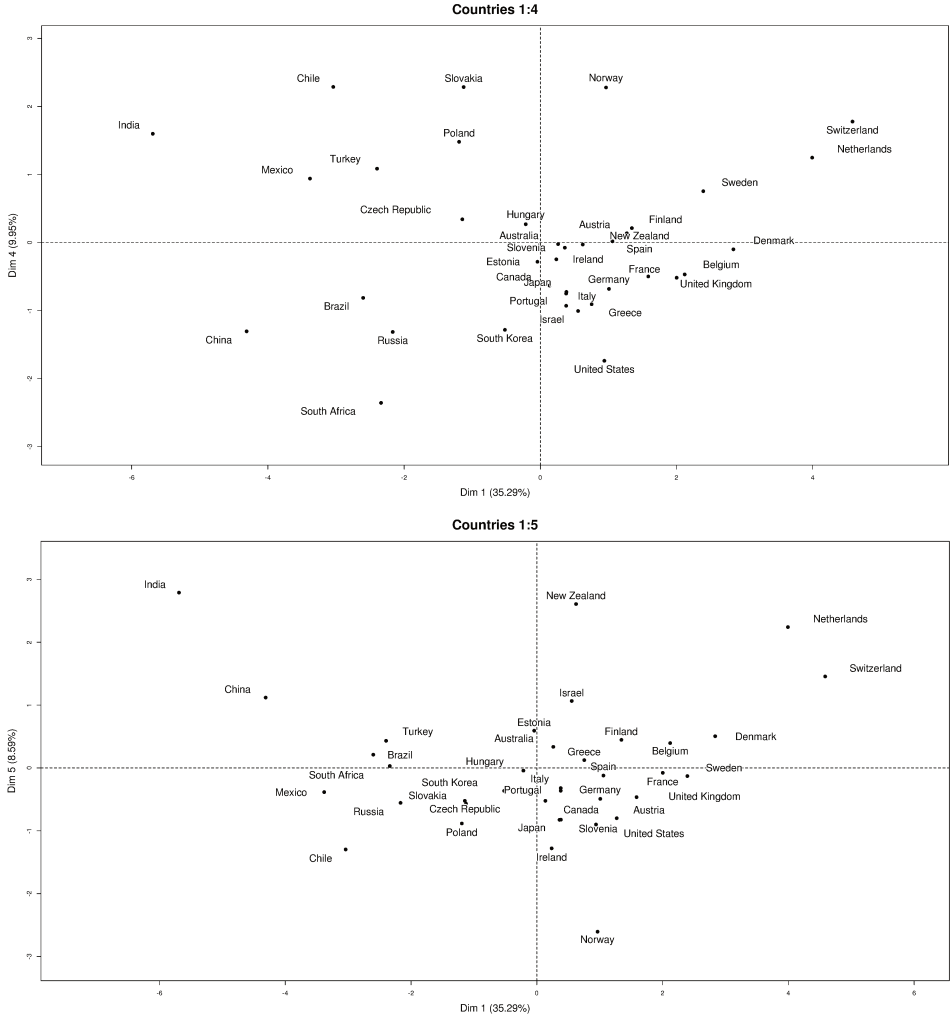


FIGURE D.4 – Plan 1 : 4 et 1 : 5 pour les pays.

Variables	PrimAgri	PrimIndus	SecManuf	SecConst	Ter_Serv	Ter_FIRE
PrimAgri	1	0,029	0,159	0,35**	-0,670***	-0,021
PrimIndus	0,029	1	-0,336**	0,309*	-0,43***	-0,124
SecManuf	0,159	-0,336**	1	-0,073	-0,392**	-0,423***
SecConst	0,354**	0,309*	-0,073	1	-0,475***	-0,228
Ter_Serv	-0,670***	-0,43***	-0,392**	-0,475***	1	0,135
Ter_FIRE	-0,021	-0,124	-0,42***	-0,228	0,135	1
GDPcap	-0,672***	0,04	-0,261	-0,233	0,601***	0,046
EmbCO2	-0,363**	-0,295*	-0,2	-0,23	0,641***	-0,072
GreenP	-0,246	-0,133	-0,183	-0,182	0,460***	-0,048
IUCN	-0,288*	-0,172	-0,273	-0,138	0,516***	0,066
FinIndex	0,142	-0,05	-0,181	-0,124	0,071	0,054
WShare	-0,660***	-0,208	-0,004	-0,264	0,538***	0,089
ClassGHG	0,232	0,234	-0,038	0,161	-0,398***	0,166

TABLEAU D.8 – Matrice des corrélations de Pearson. Significativités à 1% :***, à 5% :**, à 10% :*.

Variables	GDPcap	EmbCO2	GreenP	IUCN	FinIndex	WShare	ClassGHG
PrimAgri	-0,672***	-0,363**	-0,246	-0,288	0,142	-0,660***	0,232
PrimIndus	0,04	-0,295*	-0,133	-0,172	-0,05	-0,208	0,234
SecManuf	-0,261	-0,207	-0,183	-0,273	-0,181	-0,004	-0,038
SecConst	-0,233	-0,23	-0,182	-0,138	-0,124	-0,264	0,161
Ter_Serv	0,601***	0,641***	0,460***	0,516***	0,071	0,538***	-0,398***
Ter_FIRE	0,046	-0,072	-0,048	0,066	0,054	0,08	0,166
GDPcap	1	0,510***	0,500***	0,501***	-0,257	0,594***	-0,468***
EmbCO2	0,510***	1	0,314*	0,327**	0,164	0,228	-0,401***
GreenP	0,500***	0,314*	1	0,750***	-0,165	0,321**	-0,232
IUCN	0,501***	0,327**	0,750***	1	-0,290*	0,499***	-0,357**
FinIndex	-0,257	0,164	-0,165	-0,290*	1	-0,614***	0,042
WShare	0,594***	0,228	0,321**	0,499***	-0,614***	1	-0,39**
ClassGHG	-0,468***	-0,401***	-0,232	-0,357**	0,042	-0,39**	1

TABLEAU D.9 – Matrice des corrélations de Pearson (suite). Significativités à 1% :***, à 5% :**, à 10% :*.

Classe	Composante	COP21 (%)	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
1	Moyenne	171	-2,97			0,94	
	Écart-type	175	1,43			1,25	
2	Moyenne	-6			2,34		
	Écart-type	20			0,73		
3	Moyenne	-15			-0,71	-0,52	
	Écart-type	46			0,86	0,57	
4	Moyenne	-40	2,49				0,93
	Écart-type	13	1,22				0,98

TABLEAU D.10 – Caractérisation des classes en termes des axes factoriels obtenus par l'analyse en composantes principales.

Classe	Variables	PrimAgri	PrimIndus	SecManuf	SecConst	Ter_Serv	Ter_FIRE
1		3,7	—	—	3,2	-3,2	-2,6
2	Valeur-test	—	4,5	-2,3	—	—	—
3		—	-2,5	—	-3	—	—
4		—	—	—	—	2,8	—

TABLEAU D.11 – Valeurs-test de la classification. La valeur-test indique la significativité de la variable pour caractériser une classe : si la valeur absolue de la valeur-test est supérieure à 1,96 alors les valeurs de la variable i pour la classe j ne sont pas dues au hasard et la variable est statistiquement significative. Plus importante est la valeur-test absolue, plus significative est la variable i pour la classe j . Une valeur -test négative indique que la valeur de la variable est inférieure à la moyenne de l'échantillon tandis qu'une valeur-test positive indique que la variable est supérieure à la moyenne de l'échantillon

Classe	Variables	GDPCap	EmbCO2	IUCN	GreenP	FinIndex	WShare	ClassGHG
1		-3,8	—	-2,9	—	—	-4,3	2,8
2	Valeur-test	—	—	—	—	—	—	—
3		—	—	—	—	—	—	—
4		2,4	2	4,6	4,1	—	2,4	—

TABLEAU D.12 – Valeurs-test de la classification (suite).

Colonne	Contenu	Colonne	Contenu
(1)	Part des secteurs SEQE-UE dans les émissions totales de 2005 (%)	(8)	Réduction absolue des secteurs SEQE-UE d'ici à 2030
(2)	Part des secteurs non-SEQE-UE dans les émissions totales de 2005 (%)	(9)	Réduction absolue des secteurs non-SEQE-UE d'ici à 2030
(3)	Émissions totales de 2005	(10)	Réduction absolue totale d'ici à 2030
(4)	Émissions des secteurs SEQE-UE en 2005	(11)	Émissions totales en 2030
(5)	Émissions des secteurs non-SEQE-UE en 2005	(12)	Réduction totale d'ici à 2030 en % de 2005
(6)	Objectifs pour 2030 des secteurs SEQE-UE en % de 2005	(13)	Émissions totales de 1990
(7)	Objectifs pour 2030 des secteurs non SEQE-UE en % de 2005	(14)	Réduction totale d'ici à 2030 en % de 1990

TABLEAU D.13 – Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (1/3). Sources : calculs de l'auteur à partir des données d'émission d'Eurostat, de la CNUCC et des objectifs de réduction proposés par la Commission européenne

Pays	(1)	(2) [1 – (1)]	(3)	(4) [(1) × (3)]	(5) [(2) × (3)]	(6)	(7)
Autriche	29,9	70,1	84 956	25 381	59 574	43	36
Belgique	30,5	69,5	140 889	43 035	97 854	43	35
Rép. Tchèque	56,5	43,5	139 543	78 774	60 769	43	14
Danemark	35,6	64,4	70 065	24 924	45 141	43	39
Estonie	96,1	3,9	13 432	12 907	525	43	13
Finlande	79,6	20,4	40 059	31 890	8 169	43	39
France	25,6	74,4	522 761	133 936	388 825	43	37
Allemagne	43,5	56,5	1 003 577	436 307	567 270	43	38
Grèce	51,3	48,7	132 641	68 073	64 568	43	16
Hongrie	32,1	67,9	73 367	23 536	49 830	43	7
Irlande	25,5	74,5	67 442	17 219	50 223	43	30
Italie	40	60	544 715	217 690	327 026	43	33
Pays-Bas	39,8	60,2	211 729	84 206	127 522	43	36
Pologne	57,4	42,6	353 943	203 066	150 877	43	7
Portugal	37,2	62,8	86 071	31 988	54 083	43	17
Slovaquie	39,6	60,4	45 847	18 172	27 675	43	12
Slovénie	70,9	29,1	15 035	10 662	4 373	43	15
Espagne	43,4	56,6	399 209	173 397	225 812	43	26
Suède	57,5	42,5	36 011	20 722	15 288	43	40
Royaume-Uni	37,1	62,9	682 587	253 297	429 290	43	37
Part dans les émissions de 2005				40,9	59,1		

TABLEAU D.14 – Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (2/3).

Pays	(8) [(4) × (6)]	(9) [(5) × (7)]	(10) [(8) + (9)]	(11) [(3) – (10)]	(12) [((11) – (3))/(3)]	(13)	(14) [((11) – (13))/(13)]
Autriche	10 914	21 447	32 361	52 595	-38,1	68 209	-22,9
Belgique	18 505	34 249	52 754	88 135	-37,4	142 118	-38
Rép. Tchèque	33 873	8 508	42 380	97 162	-30,4	192 708	-49,6
Danemark	10 717	17 605	28 322	41 743	-40,4	75 303	-44,6
Estonie	5 550	68	5 618	7 814	-41,8	31 806	-75,4
Finlande	13 713	3 186	16 899	23 160	-42,2	56 654	-59,1
France	57 592	143 865	201 458	321 304	-38,5	531 764	-39,6
Allemagne	187 612	215 562	403 175	600 402	-40,2	1 223 531	-50,9
Grèce	29 272	10 331	39 602	93 039	-29,9	102 821	-9,5
Hongrie	10 121	3 488	13 609	59 758	-18,5	95 636	-37,5
Irlande	7 404	15 067	22 471	44 971	-33,3	52 934	-15
Italie	93 607	107 919	201 525	343 190	-37	515 446	-33,4
Pays-Bas	36 209	45 908	82 117	129 612	-38,8	214 863	-39,7
Pologne	87 318	10 561	97 880	256 063	-27,7	440 865	-41,9
Portugal	13 755	9 194	22 949	63 122	-26,7	60 920	3,6
Slovaquie	7 814	3 321	11 135	34 712	-24,3	64 595	-46,3
Slovénie	4 585	656	5 241	9 794	-34,9	16 960	-42,3
Espagne	74 561	58 711	133 272	265 937	-33,4	260 444	2,1
Suède	8 911	6 115	15 026	20 985	-41,7	34 027	-38,3
Royaume- Uni	108 917	158 837	267 755	414 832	-39,2	785 291	-47,2
Réduction en % de l'année de base	43	32			-36,4		-40,2

TABLEAU D.15 – Calculs des objectifs individuels de réduction d'émission de GES des pays membres de l'Union européenne pour les secteurs SEQE-UE et non-SEQE-UE (3/3).

Le scénario RCP2.6 du *Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat* (GIEC) est le seul à afficher une probabilité comprise entre 66% et 100% (*probable* selon la terminologie du GIEC) de contenir le changement climatique dans une limite de 2 degrés. D'après le GIEC, cela requiert une diminution globale des émissions de GES de 41% à 72% d'ici à 2050 relativement à 2010. Dans la mesure où les rapports du GIEC sont des travaux scientifiques dont les résultats publiés sont négociés avec les représentants des États pour aboutir à un consensus politiquement acceptable, il apparaît raisonnable d'un point de vue climatique de considérer la limite haute de cet interval de réduction d'émission. Pour atteindre une réduction collective d'environ 70% d'ici à 2050 par rapport à 2010, nous avons fait l'hypothèse que que les pays à haut revenu devraient réduire leurs émissions de 80% et les pays en développement et en transition de 55%. Nous avons suivi la classification de la Banque Mondiale en termes de pays à haut revenu et à revenu intermédiaire². Nous avons ensuite calculé les taux annuel moyens de réduction d'émission entre 2010 et 2050 pour obtenir les taux de réduction de référence, et, de là, le niveau des émissions en 2030 si ces taux de référence sont suivis. Enfin, nous avons calculé le taux de réduction d'émission en termes de 1990 pour comparer avec les CIDN soumis pour la COP21. Les *volontarismes carbone* ont été classés de *très faibles* à *hauts* selon les règles suivantes : *très faible* signifie une augmentation des émissions de GES d'ici à 2030, *faible* signifie une réduction de moins de la moitié du taux de référence, *moyen* signifie une réduction comprise entre la moitié et les deux tiers du taux de référence et *haut* signifie une réduction d'au moins les deux tiers du taux de référence.

2. <http://data.worldbank.org/about/country-and-lending-groups>, dernier accès le 2 juillet 2017.

Classe	Pays	Émissions de 2010	Réduction GIEC	Émissions GIEC en 2050	TCAM de réduction 2010-2050	Émissions en 2030 au TCAM de réduction 2010-2050	Réduction 2010-2030 en % de 2010
1	Brésil	2 902 243	55	1 306 009	-2	1 946 883	2
	Chili	114 285	80	22 857	-3,9	51 109	4,1
	Chine	11 183 811	55	5 032 715	-2	7 502 327	2
	Inde	2 771 457	55	1 247 156	-2	1 859 149	2
	Mexique	643 375	55	289 519	-2	431 588	2
	Pologne	426 486	80	85 297	-3,9	190 729	4,1
	Slovaquie	49 973	80	9 995	-3,9	22 348	4,1
	Turquie	422 722	55	190 225	-2	283 569	2
2	Australie	782 103	80	156 421	-3,9	349 766	4,1
	Canada	764 138	80	152 828	-3,9	341 732	4,1
	Norvège	65 710	80	13 142	-3,9	29 385	4,1
	Russie	2 603 290	80	520 658	-3,9	1 164 226	4,1
	Af. du Sud	456 538	55	205 442	-2	306 254	2
3	Autriche	94 172	80	18 834	-3,9	42 114	4,1
	Rép. tchèque	145 707	80	29 141	-3,9	65 161	4,1
	Estonie	22 767	80	4 553	-3,9	10 181	4,1
	Allemagne	948 007	80	189 601	-3,9	423 961	4,1
	Grèce	107 506	80	21 501	-3,9	48 077	4,1
	Hongrie	66 251	80	13 250	-3,9	29 627	4,1
	Irlande	65 591	80	13 118	-3,9	29 332	4,1
	Israël	79 072	80	15 814	-3,9	35 361	4,1
	Italie	489 460	80	97 892	-3,9	218 892	4,1
	Japon	1 350 428	80	270 086	-3,9	603 929	4,1
	Portugal	71 681	80	14 336	-3,9	32 056	4,1
	Slovénie	21 894	80	4 379	-3,9	9 790	4,1
	Corée du Sud	628 839	80	125 768	-3,9	281 224	4,1
	Espagne	354 618	80	70 924	-3,9	158 589	4,1
	Royaume-Uni	609 587	80	121 917	-3,9	272 614	4,1
	États-Unis	6 713 349	80	1 342 670	-3,9	3 002 300	4,1
4	Belgique	138 029	80	27 606	-3,9	61 728	4,1
	Danemark	63 679	80	12 736	-3,9	28 477	4,1
	Finlande	84 372	80	16 874	-3,9	37 731	4,1
	France	532 133	80	106 427	-3,9	237 976	4,1
	Pays-Bas	212 418	80	42 484	-3,9	94 995	4,1
	N.-Zélande	76 142	80	15 228	-3,9	34 051	4,1
	Suède	71 435	80	14 287	-3,9	31 946	4,1
	Suisse	57 154	80	11 431	-3,9	25 559	4,1

TABLEAU D.16 – Calcul du taux de référence d'après le scénario RCP2.6 du GIEC et comparaison avec les *volontarismes carbone* (1/2).

Classe	Pays	Émissions de 1990	Réduction GIEC 1990-2030 en % de 1990	Moyenne GIEC (%)	Moyenne COP21 (%)	Volontarisme carbone
1	Brésil	1 606 209	21	3	171	<i>Très faible</i>
	Chili	54 730	-7			
	Chine	3 892 675	93			
	Inde	1 387 372	34			
	Mexique	494 151	-13			
	Pologne	474 016	-60			
	Slovaquie	72 262	-69			
	Turquie	224 459	26			
2	Australie	482 298	-27	-42	-6	<i>Faible</i>
	Canada	608 685	-44			
	Norvège	67 466	-56			
	Russie	3 593 582	-68			
	Af. du Sud	349 202	-12			
3	Autriche	79 837	-47	-51	-15	<i>Faible</i>
	Rép. tchèque	196 207	-67			
	Estonie	55 787	-82			
	Allemagne	1 256 074	-66			
	Grèce	96 659	-50			
	Hongrie	97 552	-70			
	Irlande	65 583	-55			
	Israël	39 609	-11			
	Italie	508 765	-57			
	Japon	1 304 676	-54			
	Portugal	58 227	-45			
	Slovénie	19 978	-51			
	Corée du Sud	300 501	-6			
	Espagne	293 343	-46			
	Royaume-Uni	777 244	-65			
États-Unis	6 136 094	-51				
4	Belgique	137 873	-55	-55	-40	<i>Haut</i>
	Danemark	72 484	-61			
	Finlande	75 555	-50			
	France	554 685	-57			
	Pays-Bas	224 468	-58			
	N.-Zélande	65 690	-48			
	Suède	77 171	-59			
	Suisse	56 394	-55			

TABLEAU D.17 – Calcul du taux de référence d'après le scénario RCP2.6 du GIEC et comparaison avec les *volontarismes carbone* (2/2).

Macroéconomie écologique à l'ère du capitalisme financiarisé : une proposition de modélisation ¹

Une dimension manquante, jusqu'à présent, de la macroéconomie écologique autant qu'une piste de recherche est la financiarisation (NAQVI, 2015). Celle-ci est une caractéristique fondamentale du régime d'accumulation néolibéral mais n'est pas — encore — prise en compte dans les travaux de modélisation mêlant Économie écologique et Économie post-keynésienne (voir par exemple BERG *et al.* (2015), DAFERMOS *et al.* (2017), DUNZ et NAQVI (2016), T. JACKSON, DRAKE *et al.* (2014) et NAQVI (2015)). Ces travaux utilisent la méthode des modèles stock-flux cohérents post-keynésiens. Ce type de modélisation est directement inspirée de la comptabilité nationale (voir par exemple CAVERZASI et GODIN (2015), GODLEY et LAVOIE (2012), LE HÉRON et MAROUANE (2015) et NIKIFOROS et ZEZZA (2017) pour des états de l'art et un historique de ces modèles). Il autorise une intégration des sphères réelles et monétaires tout en permettant une cohérence comptable qui assure que le modèle n'a pas de fuite : tous les stocks sont reliés entre eux et tous les flux ont un point de départ et un point d'arrivée. Cette modélisation a notamment été utilisée pour étudier les effets de la financiarisation (voir par exemple DOS SANTOS et MACEDO E SILVA (2009), LAVOIE (2008), SAWYER et VERONESE PASSARELLA (2015) et VAN (2009)) et offre donc un cadre méthodologique adéquat pour l'intégrer à la macroéconomie écologique. Cela pourrait, en outre, constituer un point de rencontre entre plusieurs cadres théoriques inspirant cette thèse, la financiarisation étant un thème d'étude privilégié des post-keynésiens comme des régulationnistes et des marxistes. Ne reste qu'à la relier à l'étude des dynamiques environnementales d'un point de vue macroéconomique.

La proposition de modèle qui suit se veut donc une piste pour intégrer la financiarisation à l'étude des relations économie - environnement dans un cadre macroéconomique. Il s'agit d'un modèle se fondant largement sur celui de MELMIÈS et DALLERY (2014) — qui modélise la pression actionnariale dans un cadre stock-flux cohérent. Il s'inspire également de NAQVI (2015). Son objectif est d'étudier les effets de la financiarisation — appréhendée au prisme de la maximisation de la valeur actionnariale — sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effets de serre. L'hypothèse centrale est qu'à travers son effet d'éviction sur l'investissement productif et l'innovation, la maximisation de la valeur actionnariale est susceptible de ralentir la transition écologique en freinant le renouvellement des appareils productifs.

1. Ce modèle n'a pu être achevé à temps pour faire l'objet d'un chapitre à part entière. Il figure ainsi en annexe à la conclusion comme proposition de travail future pour laquelle remarques et commentaires sont les bienvenus.

Cette hypothèse a notamment été évoquée au chapitre 5. Néanmoins, une ambiguïté demeure car la maximisation de la valeur actionnariale, à travers ses effets récessifs, peut également avoir un effet ralentisseur sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. À la suite nous utiliserons la notation suivante : $\forall j = c, nre, re, i$ avec c le secteur des biens de consommation, nre le secteur de l'énergie non-renouvelable, re le secteur de l'énergie renouvelable et i le secteur des biens d'investissement.

Les ménages

Les ménages se divisent en deux catégories, les travailleurs (T) et les capitalistes (R). Les deux classes sont dotées d'une fonction de consommation keynésienne classique. Les travailleurs consomment à partir du salaire W_j et de leurs encaisses monétaires (leur épargne thésaurisée) m_d^T et les capitalistes consomment à partir des dividendes distribués Π^D et de leur richesse V^R qui se compose de l'épargne thésaurisée m_d^R et de la valeur des actions $z_j p z_j$ (avec z_j les actions et $p z_j$ leur prix). $\alpha_{w,R}$ désigne les propensions à consommer respectives.

$$C^T = p_c q_c^T = \alpha_1 (W_c + W_i + W_{nre} + W_{re}) + \alpha_2 m_d^T \quad (E.1)$$

$$C^R = p_c q_c^R = \alpha_3 (\Pi_c^D + \Pi_i^D + \Pi_{nre}^D + \Pi_{re}^D) + \alpha_2 V^R \quad (E.2)$$

L'épargne thésaurisée des travailleurs varie en fonction du flux d'épargne donné par la différence entre les salaires et la consommation :

$$m_d^T = m_{d,t-1}^T + \Delta m_d^T \quad (E.3)$$

$$\Delta m_d^T = W_c + W_i + W_{nre} + W_{re} - C^T \quad (E.4)$$

La richesse des capitalistes varie en fonction du flux d'encaisses monétaires et des achats d'actions nouvelles. Pour épargner, les capitalistes peuvent ainsi thésauriser ou placer leur argent :

$$V^R = V_{t-1}^R + \Delta m_d^R + \sum \Delta z_j p z_j \quad (E.5)$$

$$\Delta m_d^R = \sum \Pi_j^D - C^R - \sum \Delta z_j p z_j \quad (E.6)$$

$$V^R = V_{t-1}^R + \sum \Pi_j^D - C^R \quad (E.7)$$

Les entreprises

Notre modèle comporte quatre secteurs : le secteurs des biens de consommation (c), le secteur des biens de production (i), le secteur de l'énergie non renouvelable (nre) et le secteur de l'énergie renouvelable (re). Ces deux derniers secteurs peuvent également être vus comme les secteurs des biens intermédiaires dans la mesure où l'énergie est transformée au cours du procès de production.

Les entreprises ont un niveau d'investissement désiré I_j^d qui dépend du taux d'accumulation désiré g_j^d du capital K :

$$I_j^d = g_j^d K_{j,t-1} \quad (E.8)$$

$$g_j^d = \gamma_{0j} + \gamma_{1j} r_{j,t-1}^{cf} + \gamma_{2j} u_{j,t-1} + \gamma_{4j} env_j^d E_{j,t-1} - \gamma_{3j} BR_{j,t-1} \quad (E.9)$$

g_j^d est une fonction de γ_{0j} un niveau d'investissement autonome et constant capturant notamment

la dépréciation du capital, $r_{j,t-1}^{cf}$ est le taux de profit non distribué, $u_{j,t-1}$ est le taux d'utilisation des capacités de production, env_j^d est l'efficacité environnementale désirée de la production, qui reflète le degré de conscience écologique des entreprises et $BR_{j,t-1}$ représente le risque emprunteur, autrement dit un indice de condition financière (LE HÉRON et MOUAKIL, 2008).

L'efficacité environnementale désirée de la production est une fonction de la variation du prix relatif des énergies renouvelable et non-renouvelable et de TE_t le niveau d'épuisement de la ressource naturelle non renouvelable mais ne peut jamais descendre sous γ_4 le niveau de réglementation environnementale. Ce dernier terme implique que la dégradation de l'environnement influence positivement le niveau de conscience écologique des firmes :

$$env_j^d = \max(\gamma_4, \gamma_{5j} \left[\left(\frac{p_{nre,t}}{p_{re,t}} \right) - \left(\frac{p_{nre,t-1}}{p_{re,t-1}} \right) \right] + \gamma_{6j} TE_t) \quad (E.10)$$

Le risque emprunteur est déterminé par le taux d'intérêt i appliqué au secteur et par son taux d'endettement :

$$BR_j = i_j lev_j \quad (E.11)$$

Le taux de profit non distribué correspond au profit non distribué Π_j^U rapporté au stock de capital $K_{j,t-1}$ évalué à son coût de renouvellement p_i tel que :

$$r_j^{cf} = \frac{\Pi_j^U}{p_i K_{j,t-1}} \quad (E.12)$$

Le stock de capital est donné par :

$$K_j = (1 - \gamma_0) K_{j,t-1} + I_j \quad (E.13)$$

où γ_0 est le taux de dépréciation du capital et I_j est le taux d'investissement effectif (donné par E.66).

Le taux d'endettement des firmes correspond à l'encours des prêts qu'elles ont contractés rapporté à leur stock de capital valorisé au prix de renouvellement (c'est-à-dire au prix de marché).

$$lev_j = \frac{L_j}{p_i K_j} \quad (E.14)$$

Les firmes ont un niveau d'emprunt désiré φ_j^d déterminé par leur investissement désiré diminué des profits non distribués et du financement direct obtenu par levée de capitaux. Ce taux d'emprunt désiré permet de faire le lien entre investissement désiré et investissement effectif via le niveau d'emprunt consenti (équation E.63). Le taux d'emprunt désiré ne peut jamais être négatif :

$$\varphi_j^d = \max(p_i I_j^d - \Pi_j^u - \Delta z_j p z_j, 0) \quad (E.15)$$

Les émissions d'actions nouvelles se font selon une proportion donnée x_j du profit distribué à la période précédente :

$$\Delta z_j p z_j = x_j \Pi_{j,t-1}^D \quad (\text{E.16})$$

$$z_j = z_{j,t-1} + \Delta z_j \quad (\text{E.17})$$

Les profits non distribués sont donnés par la différence entre les profits totaux et les profits distribués :

$$\Pi_j^U = \Pi_j - \Pi_j^D \quad (\text{E.18})$$

Les profits distribués sont une proportion $1 - sf_j$ des profits totaux (avec sf_j le taux de rétention des profits). Cette formulation remonte à KALDOR (1966) et est commune dans les modèles SFC depuis LAVOIE et GODLEY (2001). À noter qu'ici le profit distribué s'identifie aux dividendes, car les intérêts versés par les firmes sont déduits du chiffre d'affaire pour déterminer le profit total, comme on le voit juste après.

$$\Pi_j^D = (1 - sf_j) \Pi_j \quad (\text{E.19})$$

Avec le profit total des secteurs des biens de consommation et de production $\Pi_{c,i}$ tel que :

$$\Pi_{c,i} = p_{c,i} q_{c,i} - (w_{c,i} N_{c,i} + p_{nre} E_{c,i}^{nre} + p_{re} E_{c,i}^{re} + i_{c,i} L_{c,i}) \quad (\text{E.20})$$

Les profits des firmes énergétiques $\Pi_{nre, re}$ sont donnés par la différence entre leur chiffre d'affaire et le coût total de production de l'énergie. Ce dernier est la somme du coût d'extraction ou de captation de la ressource $p_{X^{nr,r}} X^{nr,r}$, de leur masse salariale et des intérêts sur les prêts contractés par ces firmes.

$$\Pi_{nre} = p_{nre} E_{nre} - (p_{X^{nr}} X^{nr} + w_{nre} N_{nre} + i_{nre} L_{nre}) \quad (\text{E.21})$$

$$\Pi_{re} = p_{re} E_{re} - (p_{X^r} X^r + w_{re} N_{re} + i_{re} L_{re}) \quad (\text{E.22})$$

Le taux de profit est le rapport des profits totaux au stock de capital de la période précédente :

$$r_j = \frac{\Pi_j}{p_i K_{j,t-1}} \quad (\text{E.23})$$

Le taux d'utilisation des capacités u_j est le rapport entre la production observée q_j et la production de pleine capacité q_j^{FC} :

$$u_j = \frac{q_j}{q_j^{FC}} \quad (\text{E.24})$$

La production de pleine capacité dépend du stock de capital et du coefficient technique du secteur :

$$q_j^{FC} = \frac{K_j}{\sigma_j} \quad (\text{E.25})$$

Le niveau d'emploi N est donné par la production observée rapportée à la productivité du travail. Cela donne le taux de variation du niveau d'emploi \hat{N} .

$$N_j = \frac{q_j}{\mu_j^L} \quad (\text{E.26})$$

$$\hat{N} = \frac{\sum_j N_j - \sum_j N_{j,t-1}}{\sum_j N_{j,t-1}} \quad (\text{E.27})$$

La productivité du travail dépend de la productivité à la période précédente et du taux d'utilisation en t conformément à la modélisation de MELMIÈS et DALLERY (2014) :

$$\mu_j^L = \mu_{j,t-1}^L + \phi(u_j - u_{j,t-1}) \quad (\text{E.28})$$

L'équation E.28 signifie que les firmes répondent aux variations de l'offre et de la demande en jouant d'abord sur l'intensité de l'utilisation des capacités avant d'employer ou de licencier des travailleurs.

L'efficacité environnementale atteinte dépend de son niveau passé, de l'évolution du taux d'accumulation et du niveau de réglementation environnementale qui impose un niveau minimal au-dessous duquel l'efficacité environnementale ne peut jamais descendre. Dès lors on s'attend à ce que la pression actionnariale ait un effet ambigu : si elle cause une baisse de la production cela diminuera la consommation d'énergie mais la baisse du taux d'accumulation effectif entrainera le ralentissement des gains d'efficacité environnementale voire leur baisse. Cela n'est pas irréaliste dans la mesure où des travaux récents montrent que non seulement depuis les années 2000 l'efficacité énergétique des secteurs productifs de 14 pays européens n'a pas augmenté et que, de plus, l'efficacité dans l'usage des matières a, elle, eu tendance à baisser (KOVACIC *et al.*, 2017 ; SCHANDL *et al.*, 2017) :

$$env_j^a = \max(\gamma_4, env_{j,t-1}^a + \gamma_0(g_t^a - g_{t-1}^a)) \quad (\text{E.29})$$

La production du secteur des biens de consommation est déterminée par la demande des travailleurs et des capitalistes telle que :

$$q_c^T = \frac{C^T}{p_c} \quad (\text{E.30})$$

$$q_c^R = \frac{C^R}{p_c} \quad (\text{E.31})$$

$$q_c = q_c^T + q_c^R \quad (\text{E.32})$$

La production du secteur des biens de production est déterminée par la somme des dépenses d'investissement des quatre secteurs :

$$p_i q_i = p_i (I_c + I_i + I_{nre} + I_{re}) \quad (\text{E.33})$$

$$q_i = I_c + I_i + I_{nre} + I_{re} \quad (\text{E.34})$$

Le niveau des prix du secteur des biens de consommation est considéré exogène :

$$p_c = \bar{p}_c \quad (\text{E.35})$$

Les firmes du secteur des biens de production fixent un prix cible en appliquant un taux de marge θ_i sur le coût unitaire de fabrication CU_i d'un bien d'investissement :

$$CU_i = \frac{w_i N_i + p_{nre} E_{nre}^i + p_{re} E_{re}^i + i_i L_i}{q_i} \quad (\text{E.36})$$

$$\tilde{p}_i^i = (1 + \theta_i) CU_i \quad (\text{E.37})$$

Le prix effectif des biens de production fait l'objet d'une négociation entre les firmes du secteur des biens de consommation et les firmes du secteur des biens de production. Ce prix s'applique ensuite à tous les secteurs :

$$p_i = \Psi \tilde{p}_i^c + (1 - \Psi) \tilde{p}_i^i \quad (\text{E.38})$$

Le prix des biens de production dépend donc du pouvoir de négociation du secteur des biens de consommation Ψ , de \tilde{p}_i^c le prix ciblé par ce secteur pour les biens de production, et de \tilde{p}_i^i le prix ciblé par le secteur des biens de production pour sa production. Le prix ciblé par le secteur des biens de consommation dépend du taux d'autofinancement cible $T\tilde{A}F_c$ et du taux d'autofinancement observé à la période précédente $TAF_{c,t-1}$. Si le second est inférieur au premier, cela va pousser les firmes du secteur des biens de consommation à diminuer leur prix cible pour l'achat de biens de production.

$$\Delta \tilde{p}_i^c = \beta_c (T\tilde{A}F_c - TAF_{c,t-1}) \quad (\text{E.39})$$

$$\tilde{p}_i^c = \tilde{p}_{i,t-1}^c - \beta_c (T\tilde{A}F_c - TAF_{c,t-1}) \quad (\text{E.40})$$

Les salaires font également l'objet d'un procès de négociation, entre les firmes et les salariés. Ils dépendent du pouvoir de négociation des firmes face aux salariés λ_j , du salaire ciblé par les firmes \tilde{w}_j^f et du salaire ciblé par les salariés \tilde{w}_j^T . La masse salariale W_j est donnée par le produit du salaire individuel et du niveau d'emploi.

$$w_j = \lambda_j \tilde{w}_j^f + (1 - \lambda_j) \tilde{w}_j^T \quad (\text{E.41})$$

$$\Delta \tilde{w}_j^f = \beta_j (T\tilde{A}F_j - TAF_{j(-1)}) \quad (\text{E.42})$$

$$\Delta \tilde{w}_j^T = \beta_j (T\tilde{A}F_j - TAF_{j(-1)}) \quad (\text{E.43})$$

$$\tilde{w}_j^f = \tilde{w}_{j(-1)}^f - \beta_j (T\tilde{A}F_j - TAF_{j(-1)}) \quad (\text{E.44})$$

$$\tilde{w}_j^T = \tilde{w}_{j(-1)}^T - \beta_j (T\tilde{A}F_j - TAF_{j(-1)}) \quad (\text{E.45})$$

$$W_j = w_j N_j \quad (\text{E.46})$$

Enfin, la quantité totale d'énergie consommée par chaque secteur est déterminée par la production

du secteur rapportée à l'efficacité environnementale atteinte env_j^a :

$$E_j = \frac{q_j}{env_j^a} \quad (\text{E.47})$$

où $j = c, i$. Cette quantité totale d'énergie E_j se divise entre énergies non renouvelable et renouvelable pour donner le mix énergétique de chaque secteur. L'importance relative de chaque type d'énergie dépend du niveau d'efficacité environnementale désirée qui détermine la demande pour l'énergie renouvelable :

$$E_j^{nre} = (1 - env_j^d)E_j \quad (\text{E.48})$$

$$E_j^{re} = env_j^d E_j \quad (\text{E.49})$$

Le prix de l'énergie non renouvelable est p_{nre} et est fixé selon un taux de marge donné appliqué au coût unitaire de production divisé par l'efficacité environnementale atteinte du secteur :

$$p_{nre} = (1 + \theta)CU_{nre} \quad (\text{E.50})$$

où CU_{nre} est donné par

$$CU_{nre} = \frac{(p_{X^{nr}}X^{nr} + w_{nre}N_{nre} + i_{nre}L_{nre})}{E_{nre}} \quad (\text{E.51})$$

Le coût d'extraction $p_{X^{nr}}$ d'une unité de X^{nr} est une proportion ν du taux d'épuisement de X^{nr} tel que :

$$p_{X^{nr}} = \nu TE_t \quad (\text{E.52})$$

De manière identique, le prix de vente de l'énergie renouvelable est :

$$p_{re} = (1 + \theta)CU_{re} \quad (\text{E.53})$$

avec CU_{re} donné par

$$CU_{re} = \frac{(p_{X^r}X^r + w_{re}N_{re} + i_{re}L_{re})}{E_{re}} \quad (\text{E.54})$$

et p_{X^r} le coût de captation de la ressource renouvelable déterminé tel que :

$$p_{X^r} = \frac{\nu}{env_{re}^a} \quad (\text{E.55})$$

Par coût de captation de la ressource renouvelable on entend par exemple le coût d'installation et de maintenance des éoliennes et des panneaux solaires ou la location des terrains où ils sont installés. Le coût de captation de la ressource renouvelable diminue au fur et à mesure que l'efficacité environnementale

atteinte du secteur de l'énergie renouvelable augmente, c'est-à-dire que des progrès techniques y sont réalisés.

L'environnement

Le secteur de l'énergie est divisé entre les firmes produisant de l'énergie non renouvelable et celles produisant de l'énergie renouvelable. L'énergie non renouvelable est produite à partir d'une ressource naturelle non renouvelable X^{nr} dont il existe un stock fini \bar{X}^{nr} . De façon similaire à Naqvi (2015), le taux d'épuisement TE_t de la ressource non renouvelable est tel que :

$$TE_t = \frac{\bar{X}^{nr} - \sum_{n=0}^{t-1} X_n^{nr}}{\bar{X}^{nr}} \quad (\text{E.56})$$

avec $\sum_{n=0}^{t-1} X_n^{nr}$ la quantité de ressource non renouvelable déjà extraite au cours des périodes précédentes. À chaque période, la quantité de ressource extraite est donnée par :

$$X_t^{nr} = \frac{E_{nre}}{env_{nre}^a} \quad (\text{E.57})$$

La quantité de ressource renouvelable utilisée pour produire l'énergie renouvelable à chaque période est donnée de façon similaire par

$$X_t^r = \frac{E_{re}}{env_{re}^a} \quad (\text{E.58})$$

La production totale de chaque secteur énergétique est déterminée par la consommation des secteurs des biens de consommation et des biens de production :

$$E_t^{nre} = E_c^{nre} + E_i^{nre} \quad (\text{E.59})$$

$$E_t^{re} = E_c^{re} + E_i^{re} \quad (\text{E.60})$$

On fait l'hypothèse que les firmes de l'énergie ne consomment pas l'énergie qu'elles produisent. Cependant, comme elles utilisent des ressources renouvelables et non renouvelables pour produire cette énergie, cela peut être vu comme leur propre consommation d'énergie. Ainsi les ressources renouvelables et non renouvelables constituent l'énergie primaire et l'énergie produite par ces secteurs est identifiée à l'énergie secondaire ou finale.

Enfin, le stock de gaz à effet de serre dépend du flux d'émissions annuel et de la capacité τ d'élimination des gaz à effet de serre par l'atmosphère, soit

$$GHG_t = (1 - \tau)GHG_{t-1} + ghg_t \quad (\text{E.61})$$

où ghg_t est le flux de gaz à effet de serre émis en t tel que

$$ghg_t = \zeta E_{nre} \quad (\text{E.62})$$

avec ζ l'intensité en gaz à effet de serre de l'énergie non renouvelable, constante et exogène.

Le secteur bancaire

Les banques accordent un financement φ_j^a correspondant au taux de financement bancaire désiré des firmes moins le risque prêteur LR_j :

$$\varphi_j^a = (1 - LR_j)\varphi_j^d \quad (\text{E.63})$$

Ce risque prêteur dépend d'un niveau de risque autonome LR_{0j} ainsi que des taux d'endettement et d'autofinancement du secteur. Il est toujours positif :

$$LR_j = \max(LR_{0j} + \varepsilon_{1j}lev_{j(-1)} - \varepsilon_{2j}TAF_{j(-1)}, 0) \quad (\text{E.64})$$

Le taux d'autofinancement est égal au profit non distribué rapporté aux dépenses d'investissement :

$$TAF_j = \frac{\Pi_j^U}{p_i I_j} \quad (\text{E.65})$$

L'investissement effectif I_j est donné par :

$$I_j = \frac{\Pi_j^U + \Delta z_j p z_j + \varphi_j^a}{p_i} \quad (\text{E.66})$$

On voit donc que l'investissement désiré influence l'investissement effectif via le niveau de financement bancaire désiré qui entre dans la détermination du financement bancaire accordé, lui-même entrant dans la fonction de l'investissement effectif. On obtient dès lors un taux d'accumulation accordé g_j^a

$$g_j^a = \frac{I_j}{K_{j,t-1}} \quad (\text{E.67})$$

Le taux d'intérêt pratiqué par les banques dépend d'un taux de base exogène tel que le taux directeur de la Banque centrale et du risque prêteur du secteur.

$$i_j = i_0(1 + LR_j) \quad (\text{E.68})$$

Les profits des banques correspondent aux intérêts touchés sur les prêts accordés à chacun des secteurs :

$$\Pi_b = i_c L_c + i_i L_i + i_{nre} L_{nre} + i_{re} L_{re} \quad (\text{E.69})$$

Conformément au chapitre 2, nous faisons l'hypothèse que les banques distribuent l'ensemble de leur profit. Si tel n'était pas le cas, dans la mesure où les banques n'investissent pas, elles accumuleraient de la richesse à l'infini, ce qui créerait un endettement insoutenable pour les autres secteurs et l'impossibilité pour le modèle de converger vers un état stationnaire² :

2. Toutefois, on note que la fonction d'investissement dépend, entre autres, de l'efficacité environnementale désirée dont la formulation rend la convergence vers un état stationnaire incertaine en l'état.

$$\Pi_B^D = \Pi_B \quad (\text{E.70})$$

Enfin, l'offre de monnaie dépend du flux des crédits à chaque période, c'est-à-dire du financement bancaire accordé à chaque secteur :

$$\Delta m^S = \Delta L_c + \Delta L_i + \Delta L_{nre} + \Delta L_{re} = \varphi_c^a + \varphi_i^a + \varphi_{nre}^a + \varphi_{re}^a \quad (\text{E.71})$$

Les paramètres de financement pour chacun des secteurs sont tels que :

- $LR_{0re} > LR_{0nre} > LR_{0i} > LR_{0c}$
- $\varepsilon_{1re} > \varepsilon_{1nre} > \varepsilon_{1i} > \varepsilon_{1c}$
- $\varepsilon_{2re} > \varepsilon_{2nre} > \varepsilon_{2i} > \varepsilon_{2c}$

Ce modèle permettra de modéliser les effets de différents niveaux de pression actionnariale sur la performance environnementale des firmes. Il pourra également, par exemple, permettre de simuler différents scénarios de financement de la transition énergétique à travers les taux d'intérêts différenciés. À la suite sont produites les matrices des flux et des stocks (tableaux E.1 et E.2 page ci-contre). Pour des raisons de mise en page, les prix ont été omis de la présentation et le secteur de l'énergie est consolidé. Le tableau E.1 représente tous les actifs des secteurs institutionnels et le tableau E.2 représente tous les flux liant ces stocks entre eux. Ces derniers se compensent et la somme nette des flux est donc nulle. Cette règle assure la cohérence comptable du modèle. Cette règle représente, en outre, la contrainte budgétaire de chaque secteur. Les sources de fonds sont indiquées par un signe + et les usages par un signe -. Hormis les ménages, les autres secteurs ont deux colonnes : *courant* et *capital*. La première représente le compte courant du secteur qui enregistre les flux de revenus et de dépenses courantes ; la seconde enregistre les dépenses de capital et les revenus permettant de financer ces dépenses (GODLEY et LAVOIE, 2012).

	Travailleurs	Capitalistes	Consommation	Énergie	Production	Banques	Σ
Capital			$+K_c$	$+K_e$	$+K_i$		$K_c + K_i + K_e$
Prêts			$-L_c$	$-L_e$	$-L_i$	$L_c + L_i + L_e$	0
Actions		$\sum z_j$	$-z_c$	$-z_e$	$-z_i$		0
Monnaie	$+m_d^T$	$+m_d^R$				$-m^S$	0
Σ nette	$+m_d^T$	$\sum z_j + m_d^R$	$K_c - L_c - z_c$	$K_e - L_e - z_e$	$K_i - L_i - z_i$	$L_c + L_i + L_e - m^S$	$K_c + K_i + K_e$

TABLEAU E.1 – Matrice des stocks

	Travailleurs	Capitalistes	Consommation		Énergie		Production		Banques		Σ
			Courant	Capital	Courant	Capital	Courant	Capital	Courant	Capital	
Conso.	$-q_c^T$	$-q_c^R$	$+q_c$								0
Invest.				$-I_c$		$-I_e$	$+\sum I_j$	$-I_i$			0
Énergie			$-E_c$		$+E$		$-E_i$				0
Salaires	$+\sum W_j$		$-W_c$		$-W_e$		$-W_i$				0
Profits		$+\sum \Pi_j^D$	$-\Pi_c$	$+\Pi_c^U$	$-\Pi_e$	$+\Pi_e^U$	$-\Pi_i$	$+\Pi_i^U$	$-\Pi_B$		0
Intérêts			$-i_c L_c$		$-i_e * L_e$		$-i_i * L_i$		$+\sum i_j * L_j$		0
Δ prêts				$+\Delta L_c$		$+\Delta L_e$		$+\Delta L_i$		$-\sum \Delta L_j$	0
Δ Actions		$-\sum \Delta z_j$		$+\Delta z_c$		$+\Delta z_e$		$+\Delta z_i$			0
Δ monnaie	$-\Delta m_d^T$	$-\Delta m_d^R$								$+\Delta m^S$	0
Σ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU E.2 – Matrice des flux

Table des matières

Résumé	xv
Remerciements	xvii
Sommaire	xxi
Liste des tableaux	xxiii
Table des figures	xxvii
À l'ère du monde fini	1
Problématique générale de la thèse : interconnexions et interdépendances entre accumulation du capital et dynamiques environnementales	5
Méthodologie et méthodes de la thèse	6
Positionnement méthodologique	6
Le choix des méthodes	8
Positionnement théorique de la thèse	8
L'Économie écologique	9
L'Économie post-keynésienne	10
L'École de la régulation	11
L'Éco-marxisme	12
La construction de mon identité d'économiste	13
Structure et plan d'une thèse hétérogène : un compromis entre les trois articles et la monographie	15
I Capital, monnaie, soutenabilité : une discussion critique de l'Économie écologique	19
Introduction à la première partie	21
1 Le capitalisme et la soutenabilité : une critique éco-marxiste de l'Économie écologique	23
1.1 Introduction	23
1.2 De l'île de Pâques au changement climatique : naturalisation des crises écologiques et capitalisme	25
1.2.1 Anthropocène et écocide	25
L'île de Pâques : une fiction mythologique?	27
De l'île de Pâques à la Révolution industrielle : la rationalité capitaliste universalisée	28
1.2.2 Aux origines capitalistes du changement climatique	31

Les insuffisances des explications traditionnelles de la transition vers l'énergie carbonée	33
De l'eau au charbon : les rapports de production capitalistes à l'origine de <i>l'économie fossile</i>	34
Du charbon au pétrole : l'approfondissement de <i>l'économie fossile</i>	36
1.3 Les économistes de l'état stationnaire ou la négation du capitalisme	37
1.3.1 Le point de départ de la controverse entre économistes écologiques et éco-marxistes	37
1.3.2 Un problème de définition du capitalisme et du capital	38
1.3.3 Un relativisme institutionnaliste excessif	39
1.3.4 Réconcilier contrainte physique et contrainte marchande?	41
1.3.5 Quelques incohérences et un paradoxe de certains économistes écologiques	43
1.4 Théoriser la dialectique entre économie et nature dans le capitalisme	45
1.4.1 La discordance des temps ou la rupture métabolique entre société et nature	45
Critique de l'approche de la rupture métabolique et indication empirique	46
1.4.2 La seconde contradiction du capitalisme ou l'approche marxiste de la critique thermodynamique de l'économie	47
Quelques critiques de la théorie de la seconde contradiction	48
Indications empiriques d'effets de type seconde contradiction	49
1.5 Conclusion	51
2 La monnaie et la croissance : une critique post-keynésienne de l'Économie écologique	53
2.1 Introduction	53
2.2 Ce que disent certains économistes écologiques : la création monétaire par la dette portant intérêt oblige à la croissance	54
2.3 De l'endogénéité de la monnaie : le sens de causalité va de la croissance économique vers l'offre de monnaie et non l'inverse	56
2.4 Monnaie-dette et intérêts dans une économie stationnaire : une modèle simple cambridgien-kaleckien ancré dans l'approche stock-flux cohérente	58
2.5 Discussion	62
2.5.1 Convergence de résultats et condition de stabilité	63
Une convergence de résultats qui démentent l'existence d'un impératif monétaire de croissance	63
Quelles conditions de stabilité et de signification économique de notre modèle?	63
2.5.2 Un commentaire sur la controverse du capitalisme sans croissance	64
2.6 Conclusion	65
Conclusion de la première partie	67
Qui pense quoi?	67
Suggestion pour l'Économie écologique	68
 II Dynamiques du capital, de l'énergie et du carbone entre régimes d'accumulation et capitalismes contemporains	 71
Introduction à la deuxième partie	73
3 Le rapport social à l'énergie du fordisme au capitalisme néolibéral : une étude empirique et macroéconomique comparée dans les pays riches (1950-2010)	75
3.1 Introduction	75
3.2 La relation sociale à l'énergie dans une perspective régulationniste	76

3.2.1	L'interaction entre l'humanité et l'environnement en tant que rapport social	77
3.2.2	La dimension politico-économique de l'usage de l'énergie	79
3.3	Mesurer la relation énergie-économie	82
3.3.1	L'énergie est-elle la cause de la croissance?	83
3.3.2	Approches en production et en consommation du CO2	86
3.4	Faits stylisés	87
3.4.1	D'une utilisation extensive d'énergie à un usage intensif	88
3.4.2	Une délocalisation accrue de l'utilisation de l'énergie	89
3.5	Travail, capital et énergie dans le régime fordiste et le régime néolibéral	92
3.5.1	Le dynamisme de la productivité du travail dépend de la quantité d'énergie utilisée	93
3.5.2	La dimension énergétique de la restauration de la part du capital	93
3.6	Conclusion	96
4	Carbone et régimes d'accumulation : rupture et asymétries dans la relation PIB-CO2 entre fordisme et néolibéralisme	99
4.1	Introduction	99
4.2	Méthodologie : co-intégration, parcimonie, rupture structurelle et asymétries	102
4.2.1	Relation de co-intégration et modèle à correction d'erreur	102
4.2.2	Une approche parcimonieuse	104
4.2.3	Courbe de Kuznets environnementale et rupture structurelle	105
4.2.4	Une modélisation asymétrique	106
4.3	Données	109
4.4	Résultats	110
4.4.1	Tests de racine unitaire, de rupture structurelle et de symétrie des coefficients	111
	Tests de racine unitaire	111
	Tests de rupture structurelle	113
	Tests de symétrie des coefficients	113
4.4.2	Résultats des estimations	115
	CO2 en approche production	116
	CO2 en approche production avec le prix du pétrole en variable de contrôle	117
	CO2 en approche consommation	120
	CO2 en approche consommation avec le prix du pétrole en variable de contrôle	122
	Tests de normalité des résidus	122
4.4.3	Illustration graphique de l'ajustement : trajectoires des multiplicateurs dynamiques	124
4.5	Discussion : mise en perspective et robustesse	127
4.5.1	Absence de découplage et intérêt de la périodisation entre fordisme et néolibéralisme	127
4.5.2	Robustesse des résultats	134
4.6	Conclusion	136
5	Volontarismes carbone et capitalismes contemporains	139
5.1	Introduction	139
5.2	Facteurs économiques et socio-politiques	140
5.2.1	Les intérêts économiques nationaux : la structure productive de l'économie et la position relative dans les chaînes globales de GES	141
	La structure productive et le procès de tertiarisation	141
	Position relative dans les chaînes globales de GES et délocalisation des émissions : la compossibilité en jeu	141
5.2.2	Les préférences écologiques nationales : développement capitaliste, revenu et structure de classe des émissions	143

Revenu, développement capitaliste et récit en terme de courbe de Kuznets environne- mentale	143
La demande politique d'environnement comme base sociale des politiques environ- nementales	145
5.2.3 Les dynamiques de classe : la financiarisation et la structure de classe des émissions	146
La financiarisation de l'accumulation : l'éviction de l'investissement productif et de l'innovation	146
Baisse de la part salariale et structure de classe des émissions	147
5.3 Méthodologie empirique	148
5.3.1 Échantillon et données	148
Mesurer le <i>volontarisme carbone</i>	149
La structure productive de l'économie	151
La demande politique d'environnement	152
La structure de classe des émissions	152
La financiarisation	152
5.3.2 Analyse en composantes principales	153
5.3.3 Classification	153
5.4 Résultats	154
5.5 Discussion	155
5.6 Conclusion	158
Conclusion de la deuxième partie	159
Embrasser le monde fini	161
Rappel des résultats	161
Retour sur la problématique	162
Apports de la thèse	163
Perspectives de recherche	164
Considérations de politique publique	166
Bibliographie	169
A Annexe au chapitre 2 : équations intermédiaires	185
A.1 De l'équation 2.13 à l'équation 2.14a	185
A.2 De l'équation 2.14b à l'équation 2.15	185
A.3 De l'équation 2.15 à l'équation 2.16	186
A.4 De l'équation 2.16 à l'équation 2.18	186
B Annexe au chapitre 3 : tests de rupture structurelle	187
C Annexe au chapitre 4 : régressions complémentaires	193
C.1 Tests de racine unitaire	195
C.2 Tests de rupture structurelle	196
C.3 Tests de symétrie des coefficients	196
C.4 Résultats des estimations et tests de diagnostic	196
D Annexe au chapitre 5 : données, analyse en composantes principales et classification	199

E Macroéconomie écologique à l'ère du capitalisme financiarisé : une proposition de modélisation	217
Les ménages	218
Les entreprises	218
L'environnement	224
Le secteur bancaire	225
Table des matières	229

LA SOUTENABILITÉ DE L'ACCUMULATION DU CAPITAL ET DE SES RÉGIMES
Une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte

Résumé

Le sujet de la présente thèse est *La soutenabilité de l'accumulation du capital et de ses régimes : une approche macroéconomique en termes de soutenabilité forte*. Elle s'articule en deux parties. Deux chapitres composent la première : le chapitre 1 s'inscrit dans le débat sur la possibilité d'un capitalisme stationnaire. Il analyse l'absence des rapports sociaux spécifiques du capitalisme dans les travaux de certains économistes écologiques au moyen d'exemples historiques de crise écologique et des théories éco-marxistes. Le chapitre 2 discute les analyses monétaires de certains économistes écologiques selon lesquelles un état stationnaire est incompatible avec un système dans lequel la monnaie est créée comme une dette portant intérêt en adoptant un point de vue post-keynésien. La deuxième partie est plus empirique et se compose de trois chapitres. Le chapitre 3 examine la relation sociale à l'énergie au sein du régime d'accumulation fordiste et du capitalisme financiarisé et mondialisé. L'approche en termes d'exergie est intégrée à un cadre théorique régulationniste informé par l'approche en termes de démocratie carbone. L'objectif est d'identifier des ruptures dans les modalités d'usage de l'énergie qui accompagnent les transformations observées dans d'autres domaines. Le chapitre 4 prolonge le précédent au moyen d'une analyse économétrique de la relation PIB-CO2 pour la France de 1950 à 2013 en tenant compte de la rupture dans les régularités de l'accumulation du capital entre le régime d'accumulation fordiste et le régime d'accumulation néolibéral ainsi que des possibles asymétries. Le chapitre 5 analyse les ambitions nationales en matière de réduction de gaz à effet de serre, dénommées *volontarisme carbone*, replacées dans le contexte du capitalisme globalisé et financiarisé contemporain.

Mots clés : économie écologique, économie post-keynésienne, éco-marxisme, école de la régulation, macroéconomie écologique, carbone, capitalisme, régime d'accumulation, fordisme, néolibéralisme, soutenabilité forte, énergie

THE SUSTAINABILITY OF CAPITAL ACCUMULATION AND ITS REGIMES
A strong sustainability macroeconomic approach

Abstract

The subject of my PhD is *The sustainability of capital accumulation and its regimes: a strong sustainability macroeconomic approach*. It is composed of two parts. The first one is composed of two chapters that review the literature on two aspects: The first chapter tackles the debate on stationary capitalism. It reviews the way capitalism is taken into account by ecological economists and analyzes it in light of historical examples of ecological crises and of insights from eco-marxist theories. Chapter 2 tackles the debate about the so-called monetary growth imperative analysed from a post-Keynesian point of view. The second part is a more empirical one and is composed of three chapters. Chapter 3 attempts at framing the exergy-useful work approach into a régulationnist theoretical framework informed with insights from the Carbon democracy approach. It investigates the social relationship to energy in the Fordist and Neoliberal accumulation regimes. The fourth chapter attempts at furthering the third chapter by investigating the CO2 - GDP relationship through econometric means taking into account structural breaks between accumulation regimes and possible asymmetries. Chapter 5 investigates the commitment of countries to reduce their greenhouse gas emissions within the context of globalized finance-led capitalism.

Keywords: ecological economics, post-keynesian economics, eco-marxism, régulation school, ecological macroeconomics, carbon, capitalism, accumulation regime, fordism, neoliberalism, strong sustainability, energy
