



HAL
open science

Les effets macroéconomiques des politiques de transition énergétique sur le long terme en France (horizon 2035)

Darius Corbier

► **To cite this version:**

Darius Corbier. Les effets macroéconomiques des politiques de transition énergétique sur le long terme en France (horizon 2035). Economies et finances. Université Paris sciences et lettres, 2021. Français. NNT : 2021UPSLD010 . tel-03547192

HAL Id: tel-03547192

<https://theses.hal.science/tel-03547192>

Submitted on 28 Jan 2022

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

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



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à l'Université Paris-Dauphine

**Les effets macroéconomiques des politiques de
transition énergétique sur le long terme en France
(horizon 2035)**

Soutenue par

Darius CORBIER

Le 18 juin 2021

Ecole doctorale n° ED 543

Ecole doctorale SDOSE

Spécialité

Économie

Composition du jury :

Patrice GEOFFRON

Professeur des Universités, Université Paris Dauphine-PSL *Président*

Katheline SCHUBERT

Professeur des Universités, Université Panthéon-Sorbonne *Rapportrice*

Cécile COUHARDE

Professeur des Universités, Université Paris-Nanterre *Rapportrice*

Pierre-André JOUVET

Professeur des Universités, Université Paris-Nanterre *Examineur*

Frédéric GONAND

Professeur, Université Paris Dauphine-PSL *Directeur de thèse*

À toi maman.

Remerciements

Je souhaiterais adresser mes premiers remerciements à mon Directeur de thèse, Frédéric Gonand, pour m'avoir pris sous ses ailes dès mes années de Master, pour le partage de son expérience et de ses intuitions, pour son aide, sa bienveillance, ses conseils et sa disponibilité sans faille tout au long de ces années de thèse. J'espère avoir été digne de sa confiance et suis très honoré d'avoir pu évoluer sous sa direction.

Je tiens également à remercier l'ensemble des Professeur(e)s qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie du jury de thèse : Katheline Schubert, Cécile Couharde, Patrice Geoffron et Pierre-André Jovet.

Ayant eu l'opportunité de réaliser la thèse CIFRE au sein du Pôle études économiques de la Direction économie du système électrique (DiESE) de RTE, j'aimerais remercier tout particulièrement mon chef de pôle, Vincent Rioux, et mon encadrante, Simona de Lauretis, pour leurs conseils, leur aide et leur savoir sur les problématiques spécifiques au système électrique. Toutes nos discussions m'ont permis d'enrichir mes recherches, de résoudre divers problèmes que m'a posé la thèse et d'apprendre énormément sur le fonctionnement du système électrique.

Je souhaite également remercier les Professeur(e)s Anna Creti, Marie Bessec et Patrice Geoffron pour leurs regards et conseils avisés sur mes travaux de recherche.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de Dynare, que je ne connais que virtuellement via le forum, qui m'a permis d'avancer dans la modélisation et de résoudre de nombreux soucis dans la simulation de mes résultats.

La réalisation de cette thèse s'est également faite grâce au soutien de mon père, de mes grands-parents et de ma famille. J'aimerais aussi remercier mes amies qui m'ont sorti la tête de l'eau durant mes périodes de doute. Merci à Rihab et Roxana pour nos diners, nos raclettes, nos commérages et notre dose hebdomadaire de spleen. Merci à Kadidia, Jessica, Yannelle et Inès pour votre écoute, nos rires, nos rendez-vous culinaires et nos escapades. Enfin, merci à Inès pour nos échanges sur le dancefloor les samedis soir qui m'ont permis de m'évader et de relâcher la pression.

Résumé

La thèse modélise différents canaux macroéconomiques de transmission de la transition énergétique dans deux scénarios officiels sur le système énergétique français, selon différentes évolutions du prix des énergies et structures d'information des agents privés. Un modèle hybride associe un modèle en équilibre général dynamique et un modèle d'optimisation du système de production d'électricité. Il modélise notamment des ménages sous contraintes de liquidité, les services énergétiques produits par les biens durables des ménages, différents scénarios du prix des énergies, les effets d'une taxe carbone, et deux structures d'information selon que les agents anticipent ou non parfaitement le futur. Les résultats suggèrent l'importance de l'effet prix sur la consommation d'énergie par les agents (plutôt que l'augmentation des investissements de décarbonation du mix électrique), le rôle joué par les investissements dans les biens durables et en capital, les différences de comportement entre ménages ricardiens et non ricardiens. Les effets de la fiscalité carbone varient selon l'évolution du prix de l'énergie non-électrique ; si ses recettes sont redistribuées, elle ne lèse pas forcément le bien-être des ménages dans le modèle. Si les agents anticipent le futur, la décarbonation est favorisée sans peser significativement sur la croissance. Pour atteindre la neutralité carbone, davantage d'efforts d'efficacité énergétique et en matière de transferts d'usage semblent nécessaires.

Mots-clés : Transition énergétique, Macroéconomie, Modèles hybrides, Croissance, Électricité.

Abstract

I model different macroeconomic transmission channels of the energy transition in two official scenarios on the French energy system, according to different evolutions of energy prices and information structures of private agents. A hybrid model combines a dynamic GE model and an optimization model of the electricity production system. It simulates households under liquidity constraints, the energy services produced by households' durable goods, different energy price scenarios, the effects of a carbon tax, and two information structures depending on whether or not the agents anticipate the future. The results suggest the importance of the price effect on energy consumption (rather than a rise in investments to decarbonize the electricity mix), the role played by investments in durable goods, and the differences in behavior between Ricardian and non-Ricardian households. The effects of the carbon tax vary according to the price of non-electric energy; if redistributed, it does not harm household welfare in the model. If agents anticipate the future, decarbonization is favored without weighing significantly on growth. To achieve carbon neutrality, more efforts in energy efficiency and in transfers of use seem necessary.

Keywords: Energy transition policies, Macroeconomics, Hybrid modelling, Growth, Electricity.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	16
PARTIE I. LES MODELES MACROECONOMIQUES A L'EPREUVE DES POLITIQUES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES : UN ETAT DE LA LITTERATURE.....	27
CHAPITRE 1. CONTEXTE THÉORIQUE: ORIGINES DE LA RÉFLEXION CONTEMPORAINE EN MACROÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	29
1. <i>Élément de définition : la transition énergétique</i>	29
2. <i>Les outils de la « nouvelle économie classique »</i>	31
3. <i>La nouvelle économie keynésienne et ses implications pour l'énergie</i>	37
CHAPITRE 2. LES DIFFÉRENTES CLASSES DE MODÈLES EN ÉQUILIBRE GÉNÉRAL APPLICABLES A L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	41
1. <i>Avantages et limites principaux des modèles en équilibre général</i>	42
2. <i>L'équilibre général calculable (CGE – computable general equilibrium)</i>	43
3. <i>Synergie néoclassique et keynésienne : l'Équilibre Général Dynamique et Stochastique</i>	45
4. <i>Les modèles à Générations Imbriquées (Overlapping Generation Models - OLG)</i>	52
CHAPITRE 3. L'IMBRICATION DES MODÈLES SCIENTIFIQUES DANS LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL.....	55
1. <i>Les modèles hybrides</i>	55
2. <i>Les modèles à évaluation intégrée (LAM)</i>	60
CONCLUSION.....	64
ANNEXES DE LA PARTIE I.....	67
PARTIE II. HYGEM, UN MODELE HYBRIDE DE CROISSANCE DYNAMIQUE COUPLE AUX TRAJECTOIRES DE TRANSFORMATION DU PAYSAGE ELECTRIQUE FRANÇAIS	76
CHAPITRE 1. PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS AMPÈRE ET VOLT DU BILAN PRÉVISIONNEL 2017 DE RTE.....	77
1. <i>Le scénario Volt</i>	77
2. <i>Le scénario Ampère</i>	79
CHAPITRE 2. LE SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS ET SON INTERFAÇAGE AVEC LE MODÈLE MACROÉCONOMIQUE	82
1. <i>Présentation du modèle d'optimisation du secteur de production d'électricité</i>	82
2. <i>Interfaçage avec le modèle macroéconomique</i>	85
CHAPITRE 3. LE MODÈLE DE CROISSANCE DYNAMIQUE	88
1. <i>Vue d'ensemble du bouclage macroéconomique</i>	88
2. <i>L'environnement déterministe</i>	89
3. <i>Le secteur résidentiel : un sous-modèle à agents hétérogènes</i>	91
4. <i>Les secteurs d'activité</i>	97
5. <i>L'autorité publique</i>	101
6. <i>L'évolution de la demande d'énergie dans le modèle : entre effet substitution, effet croissance et effet technologique</i>	105

7.	<i>Fermeture du modèle</i>	107
CHAPITRE 4. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE		109
1.	<i>Calibration des paramètres hors élasticités de substitution</i>	109
2.	<i>Estimation des élasticités de substitution intratemporelle</i>	112
2.1.	Méthodologie d'estimation.....	112
2.2.	L'estimation des paramètres de substitution de la technologie de production	113
2.2.1.	Estimation de l'élasticité de substitution entre les composites travail-capital et énergie efficace	113
2.2.2.	Estimation de l'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail	114
2.2.3.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les secteurs d'activité.....	117
2.3.	L'estimation des paramètres de substitution de la fonction de consommation.....	120
2.3.1.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'énergie efficace et les biens durables	120
2.3.2.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les ménages.....	122
ANNEXES DE LA PARTIE II		125
PARTIE III. LES EFFETS AGREGES DE LONG TERME D'UNE TRANSITION ELECTRIQUE SOUS DIVERS SCENARIOS D'EVOLUTION DU PRIX DES ENERGIES.		152
CHAPITRE 1. LES SCÉNARIOS ÉTUDIÉS		153
1.	<i>Hypothèses d'évolution des variables exogènes du système électrique</i>	153
2.	<i>Hypothèses d'évolution du prix hors taxes des énergies et prix du CO₂ sur le marché des quotas</i>	154
3.	<i>Hypothèses d'évolution de la fiscalité énergétique</i>	156
CHAPITRE 2. LES RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC INFORMATION PARFAITE		158
1.	<i>Les effets de bouclage macroéconomique sur la consommation d'énergie sont importants</i>	158
2.	<i>Effets agrégés sur les conditions de production de l'entreprise</i>	166
3.	<i>Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages</i>	169
4.	<i>Effets agrégés sur les finances publiques</i>	181
5.	<i>Dans le modèle, l'effet de long terme sur le PIB par tête de l'évolution des investissements dans le système électrique et du prix des énergies est légèrement négatif</i>	184
6.	<i>Dans le modèle, une maîtrise de la demande d'énergie et des transferts d'usage relativement moins poussés, et un mix de production plus nucléarisé permettent une décarbonation plus intense de l'économie mais au prix d'une sensibilité plus forte de l'économie aux variations du prix du baril et de la fiscalité carbone</i>	186
CHAPITRE 3. TESTS DE ROBUSTESSE SUR LE MODÈLE À INFORMATION PARFAITE ..		189
1.	<i>La reparamétrisation du modèle</i>	189
2.	<i>Les résultats des tests de robustesses</i>	190
2.1.	Test sur les élasticités de substitution inter-énergies	190
2.2.	Tests sur l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace.....	191
2.3.	Tests sur l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique d'une part, et le facteur capital et le facteur travail d'autre part	192
2.4.	Tests de robustesse, croissance et décarbonation de l'économie	192

CHAPITRE 4. DISCUSSION	197
1. <i>Sous certaines conditions, la transition électrique n'affecte pas sensiblement la croissance sur le long terme et permet de décarboner l'économie</i>	197
2. <i>Pour atteindre l'objectif du facteur 6 à l'horizon 2050, les réévaluations de la fiscalité carbone doivent prendre en compte l'évolution du prix des hydrocarbures sur le long terme et l'électrification de l'économie doit être plus forte....</i>	202
3. <i>L'importance des biens durables dans l'explication de l'effet des chocs de prix des énergies sur le long terme .</i>	204
4. <i>Fiscalité carbone et efficacité économique : quelles sont les conditions ?</i>	205
5. <i>La prise en compte de l'électricité dans l'étude des chocs énergétiques est importante</i>	210
6. <i>La temporalité des chocs énergétiques</i>	210
ANNEXES DE LA PARTIE III	212
PARTIE IV. EFFETS DE LA STRUCTURE D'INFORMATION SUR LE COMPORTEMENT DES AGENTS SOUS DIVERS SCENARIOS D'EVOLUTION DU PRIX DES ENERGIES ..	215
CHAPITRE 1. LES EFFETS AGRÉGÉS DE LONG TERME D'UNE TRANSITION ÉLECTRIQUE SOUS DIVERS SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU PRIX DES ÉNERGIES DANS UN ENVIRONNEMENT À INFORMATION IMPARFAITE	215
1. <i>Structure de l'information et prise de décision des agents</i>	215
2. <i>Les résultats de simulation du modèle en structure d'information imparfaite</i>	217
2.1. <i>La dynamique de la consommation d'énergie est relativement peu sensible à la structure d'information</i>	218
2.2. <i>Effets sur le processus de production de l'entreprise</i>	221
2.3. <i>Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages</i>	223
2.4. <i>Effets agrégés sur les finances publiques</i>	231
2.5. <i>Les effets sur la croissance sont plus favorables quand les agents n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques</i>	232
2.6. <i>Dans la structure d'information imparfaite, la décarbonation de l'économie et l'effet sur la croissance sont meilleurs pour le scénario Volt</i>	234
CHAPITRE 2. DISCUSSION	237
1. <i>Les décisions de consommation d'énergie sont relativement peu altérées par les effets d'annonce</i>	237
2. <i>Les effets d'annonce sur l'évolution du prix de détail des énergies ont une influence sensible sur les dynamiques agrégées de l'économie hors consommation d'énergie</i>	238
3. <i>Les effets d'annonce de la politique de recyclage de la taxe environnementale sont sensibles sur les dynamiques de l'économie hors consommation d'énergie</i>	239
4. <i>Le ménage contraint par ses liquidités est relativement plus sensible sur le long terme aux effets d'annonce</i> ..	241
5. <i>L'évolution non-anticipée de la fiscalité carbone et du recyclage limite le caractère régressif de la fiscalité environnementale par rapport à la structure d'information parfaite</i>	241
6. <i>Les effets d'annonce sont plus bénéfiques à la décarbonation de l'économie mais au détriment de la croissance économique</i>	242
ANNEXES DE LA PARTIE IV	244
4.A. BIBLIOGRAPHIE	244
CONCLUSION GÉNÉRALE	245
TABLE DES MATIERES	249

Liste des tableaux

Tableau 1 Effet des mécanismes de demande sur la consommation d'électricité en 2035 par rapport à 2016 (en TWh) – Source : Rte.....	79
Tableau 2 Recettes fiscales 2018 (% des recettes totales) – Source : Ministère de l'Action et des Comptes Publics, 2019	102
Tableau 3 Recettes fiscales environnementales 2018 (% des recettes totales) – Source : Conseil d'Orientation des Retraites (COR), 2019.....	103
Tableau 4 Valeurs des instruments fiscaux exogènes en 2018 – Calculs de l'auteur à partir de données de la DGEC, de l'OCDE et des divers documents de la Cours des comptes.....	103
Tableau 5 Valeurs des principaux ratios à reproduire – Calculs de l'auteur.....	110
Tableau 6 Valeur des paramètres du modèle	111
Tableau 7 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution entre les deux facteurs de production agrégés de l'entreprise	114
Tableau 8 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution entre le facteur travail et le facteur capital.....	117
Tableau 9 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution inter-énergie de l'entreprise	119
Tableau 10 Résultat des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution inter-énergie du ménage	123
Tableau 11 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution des services énergétiques	124
Tableau 12 Montant des soutiens du compte d'affectation spécial « Transition énergétique » en 2018 – Source : Article 23 du Projet Loi Finance 2018	125
Tableau 13 Taux de croissance annuel de l'efficacité électrique. Calculs à partir des données de Rte	126
Tableau 14 Durée de vie par équipement ménager -Source : Rte/Ademe et Organisme Technique Central.....	132
Tableau 15 Hypothèses d'évolution du prix du baril, du prix du gaz et du prix du quota de CO2 à l'horizon 2035 - Source: AIE et Saudi Aramco	154
Tableau 16 Évolution de la taxe intérieure sur la consommation de produits énergétiques, y.c. composante carbone – Calculs de l'auteur à partir de données publiques	156
Tableau 17 Évolution de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère.....	159
Tableau 18 Évolution de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	163
Tableau 19 Évolution du prix TTC des énergies par rapport à 2018 – Ampère.....	164
Tableau 20 Écart annuel moyen de la consommation d'énergie par rapport à la baseline – Ampère.....	165
Tableau 21 Taux de croissance annuel moyen des variables sélectionnées - Ampère.....	167
Tableau 22 Gains de bien-être des ménages en 2035 par rapport à 2018 – Ampère	181
Tableau 23 Évolution des recettes fiscales par unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère	182
Tableau 24 Taux de croissance annuel moyen des variables en unité de travail efficace - Ampère.....	185
Tableau 25 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage	186
Tableau 26 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage	187
Tableau 27 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage	188
Tableau 28 Gains de bien-être en 2035 par rapport à 2018	188
Tableau 29 Reparamétrisation des élasticités de substitution pour l'exercice de robustesse.....	190

Tableau 30 Différences de consommation par type d'énergie par rapport à la structure à information parfaite, y.c. effet croissance.....	219
Tableau 31 Écart en p.p. entre les deux structures d'information de la réponse dynamique de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère.....	220
Tableau 32 Taux de croissance annuel moyen des variables sélectionnées - Ampère.....	222
Tableau 33 Gains de bien-être des ménages en 2035 par rapport à 2018 selon la structure d'information – Ampère	231
Tableau 34 Évolution des recettes fiscales par unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère	232
Tableau 35 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de la structure d'information imparfaite et le taux de croissance annuel moyen de la structure d'information parfaite - Ampère	233
Tableau 36 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage	235
Tableau 37 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage	235
Tableau 38 Gains de bien-être en 2035 par rapport à 2018	236

Liste des figures

Figure 1 Frise chronologique du renouvellement de la macroéconomie en lien avec l'énergie et l'environnement.....	29
Figure 2 Schématisation des interactions entre les modules top-down et bottom-up d'un modèle hybride en macroéconomie de l'énergie	58
Figure 3 Représentation simplifiée d'un IAM d'optimisation.....	62
Figure 4 Bilan énergétique prévisionnel - Scénario Volt. Source : Rte	78
Figure 5 Bilan énergétique - scénario Ampère. Source : Rte	79
Figure 6 Trajectoires de consommation annuelle d'électricité (France continentale, à températures de référence, hors enrichissement de l'uranium) sans bouclage macroéconomique. Source : Rte.....	81
Figure 7 Représentation simplifiée du modèle d'optimisation du système électrique.....	82
Figure 8 Interfaçage entre le modèle bottom-up et le modèle top-down	87
Figure 9 Le poids de la fiscalité énergétique dans la valeur ajoutée des secteurs d'activité – Source : Conseil des Prélèvements Obligatoires (2019).....	125
Figure 10 Charges de service public établies par la CRE (2019).....	131
Figure 11 Schématisation de l'échange d'information entre les deux modèles	153
Figure 12 Evolution de la consommation totale d'électricité en TWh	158
Figure 13 Évolution relative du prix de l'énergie et de la consommation d'énergie pour les ménages en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	160
Figure 14 Évolution relative du prix de l'énergie et de la consommation d'énergie pour l'entreprise en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	163
Figure 15 Évolution de la consommation totale d'énergie – Ampère	166
Figure 16 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	167
Figure 17 Évolution des coûts de production de l'entreprise en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère	168
Figure 19 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	172
Figure 20 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	174
Figure 21 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	175
Figure 22 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère	176
Figure 23 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	177
Figure 24 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	179
Figure 25 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	180
Figure 26 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	181
Figure 27 Réponses dynamiques des variables sélectionnées en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère	183
Figure 28 Réponse dynamique de l'offre agrégée en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	185
Figure 29 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	185
Figure 30 Réponses dynamiques des variables en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère baseline....	194
Figure 31 Réponses dynamiques des variables en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère baseline....	195
Figure 32 Réponses dynamiques des variables par rapport à 2018 – Ampère baseline	196
Figure 33 Chocs anticipés et chocs non-anticipés : schématisation des simulations Dynare sur la base de Villemot (2018).....	216
Figure 34 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	219
Figure 35 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....	222

Figure 36 Réponse dynamique en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....223

Figure 37 Réponse dynamique en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....225

Figure 38 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....226

Figure 39 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....227

Figure 40 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....229

Figure 41 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.....230

Figure 42 Réponse dynamique de l'offre agrégée par rapport à 2018 – Ampère.....233

Figure 43 Évolution de la consommation de gaz et de pétrole de l'économie, y.c. effet croissance, dans la structure d'information imparfaite – Ampère234

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Sous l'impulsion des pouvoirs publics et répondant à une forte aspiration sociétale, le système énergétique français est engagé dans une transition ambitieuse. La transition énergétique française se traduit, dans la loi Transition Énergétique pour une Croissance Verte (TECV), par des objectifs en matière d'évolution du bouquet de production d'électricité, de maîtrise de la consommation d'énergie et des transferts d'usage vers l'électricité décarbonée. Le souhait de la neutralité carbone d'ici à 2050, de la réduction du parc nucléaire, de l'arrêt des centrales thermiques à charbon et de l'arrêt de la construction des centrales à gaz oriente les choix en matière de mix de production d'électricité sur le long terme. Le développement du parc de véhicules électriques, les efforts d'efficacité énergétique et les transferts d'usages vers les équipements électriques orientent les choix en matière de consommation d'électricité sur le long terme.

L'évolution future du système électrique peut affecter le système économique à travers plusieurs canaux. Les choix en matière de bouquet de production d'électricité affectent les coûts que supporte le système électrique et les prix de gros de l'électricité sur le long terme. Les coûts dans le système électrique influencent l'investissement en capital physique total de l'économie (l'épargne des ménages) qui modifie à son tour la consommation de l'économie et la demande agrégée. Le prix de gros de l'électricité influence les décisions de consommation des ménages, aussi leur épargne, et les décisions de production des entreprises sur le long terme. Par ailleurs, la tendance d'évolution de l'électrification des usages et de l'efficacité énergétique affecte la manière dont les agents substituent de l'électricité à l'énergie non-électrique sur le long terme.

En retour, le système économique peut influencer le système électrique à travers plusieurs canaux de transmission. Les dynamiques de l'économie proviennent des arbitrages temporels en matière de production et de consommation qui affectent directement la demande d'électricité adressée au système de production d'électricité. Du côté des ménages, il existe deux types d'arbitrage : l'arbitrage intertemporel en matière de consommation et d'épargne, et l'arbitrage intratemporel qui reflète la possibilité de substituer entre différents types de biens de consommation pour le ménage. Du côté des entreprises, les arbitrages sont intratemporels. Les entreprises prennent des décisions sur la base des effets substitutions entre facteurs de production et des effets d'échelle de production.

La thèse cherche à distinguer et évaluer différents canaux macroéconomiques de transmission de la transition énergétique dans deux scénarios officiels des pouvoirs publics sur l'économie française et son système énergétique (« Ampère » et « Volt »), selon différentes évolutions du prix des énergies et selon différentes structures d'information des agents privés. Pour distinguer et évaluer les canaux de transmission de la transition énergétique, un modèle hybride analyse les interactions entre le système électrique et le reste de l'économie. Les choix du système de production d'électricité affectent directement le reste de l'économie, et la réponse de l'économie à ces choix affecte en retour le système de production d'électricité. Les résultats du modèle montrent que la prise en compte du reste de l'économie a des effets quantitatifs notables sur les trajectoires de consommation des scénarios Ampère et Volt.

L'occasion empirique de cette recherche a été fournie par le besoin de bouclage macroéconomique des scénarios officiels à long terme sur l'économie française et son système électrique. En conformité avec le Code de l'énergie, Rte, gestionnaire du réseau de transport d'électricité en France, publie tous les deux ans cinq trajectoires de moyen-long terme de consommation et d'évolution du mix de production d'électricité à 15 ans du système électrique (consommation, production, interconnexions), et en simule de façon détaillée le fonctionnement (utilisation des différents moyens de production, des interconnexions, etc.). Dans l'élaboration de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, les pouvoirs publics prennent comme référence les trajectoires de consommation et de production d'électricité Volt et Ampère de Rte. Dans l'élaboration de ses trajectoires de consommation, Rte ne prend pas en compte le reste de l'économie, ce qui peut biaiser les trajectoires simulées. La prise en compte du reste de l'économie est essentiellement qualitative et les analyses s'attachent surtout à mettre l'accent sur la cohérence nécessaire des hypothèses (par exemple, les scénarios prévoyant une électrification poussée du système énergétique ou un accroissement important de l'efficacité énergétique ne sont pas compatibles avec une croissance atone), mais sans quantification. C'est dans ce contexte que la thèse cherche aussi à évaluer l'effet de la prise en compte du reste de l'économie sur les trajectoires de Rte à partir d'un modèle hybride.

Pendant longtemps, comme le soulignent Hall et al. (2001) et Stern et Cleveland (2004), l'énergie a fait l'objet d'un traitement relativement mineur dans la plupart des modèles macroéconomiques. Nombreux étaient les économistes qui ont supposé implicitement que l'énergie était un facteur abondant dont le coût représente une part faible des coûts totaux de l'économie. Le renouvellement de la macroéconomie est historiquement lié à des événements énergétiques et environnementaux.

Trois phases historiques façonnent la macroéconomie contemporaine : les chocs pétroliers et la récession des années 1970, les inquiétudes environnementales et le protocole de Kyoto, et l'élaboration des premières politiques technologiques dans le domaine énergétique.

En ce qui concerne les chocs énergétiques (principalement de prix) dans l'explication des fluctuations de l'économie dans années 1970 et 1980, les auteurs (*e.g.*, Mork et Hall [1980], Hamilton [1983], Pindyck et Rotemberg [1983], Kim et Loungani [1992], Rotemberg et Woodford [1996], Finn [2000], Ireland [2000], Leduc et Sill [2004], Carlstrom et Fuerst [2006], Blanchard et Galí [2007], et Killian [2008 et 2009]) concluent que les chocs pétroliers ont contribué à la récession des deux décennies car le choc de prix du pétrole agit comme un choc technologique négatif sur l'économie.

Les inquiétudes environnementales du tournant du siècle ont poussé les économistes à intégrer de plus en plus ces aspects en étudiant l'influence des politiques environnementales sur l'économie. *De nombreux travaux montrent le rôle joué par la crédibilité des politiques énergétiques et environnementales.* Pindyck (1991), Helm, Hepburn et Mash (2003), Bosetti et Victor (2011), Faehn et Isaksen (2016) et Rogge et Dutschke (2018) soulèvent l'importance de la crédibilité des politiques macroéconomiques pour soutenir l'investissement dans l'industrie énergétique et dans les projets bas-carbones. Bretschger et Schaefer (2017) montrent que les effets d'anticipation et la crédibilité des signaux des politiques sont importants dans l'étude de la transition énergétique car ils diminuent les coûts des politiques. *D'autres travaux soulignent que les impulsions technologiques constituent un élément important d'une transition énergétique :* les améliorations d'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables (*cf.* Saunders [1992], Heutel [201]), Fischer et Springborn [2012], et Henriët, Maggiar et Schubert [2014]). Par exemple, Henriët, Maggiar et Schubert (2014) montrent qu'il faut augmenter les efforts d'efficacité énergétique pour atteindre le facteur 4 à l'horizon 2050 en France. *Par ailleurs, de plus en plus d'économistes se penchent sur les effets de long terme des politiques énergétiques et environnementales.* Aghion et Howitt (1998) analysent l'effet de la pollution environnementale et de l'épuisement des ressources non-renouvelables sur la croissance durable. Atkeson et Kehoe (1999) étudient la réponse de l'économie à une augmentation de la fiscalité carbone sur le long terme. Tahvonen et Salo (2001) étudient la transition entre ressources énergétiques renouvelables et non-renouvelables. Acemoglu et al. (2012) analysent l'effet sur les investissements en innovation et la croissance d'une politique environnementale hybride visant à utiliser une taxe carbone et de subventions à la recherche en considérant des facteurs de production carbonés et décarbonés. Hassler, Krussell et Olovsson (2012) étudient comment le progrès technique dans l'efficacité énergétique répond aux incitations économiques et comment il affecte la croissance. Gonand, Hasanov et Hunt (2019) étudient l'effet de sur le bien-être intergénérationnel d'une augmentation du prix des énergies en Arabie Saoudite

Beaucoup d'économistes discutent les effets redistributifs des taxes environnementales. Goulder (1995 et 1998) montrent que le coût de la taxe environnementale est plus faible quand on redistribue en diminuant

d'autres taxes de nature distortive plutôt que des transferts budgétaires. D'autres auteurs préconisent une diminution des taxes de nature distortives en réponse à l'augmentation de la taxation carbone (*cf.* Jorgenson et Wilcoxon [1993], Bovenberg et de Mooij [1994], Schneider [1997], Bohringer et Rutherford [2008], Bento et Jacobsen [2007], Labandeira, Labeaga et Rodriguez [2009], Chiroleu-Assouline et Fodha [2014], Jacobs et de Mooij [2015], Karydas et Zhang [2019], et Aubert et Chiroleu-Assouline [2019]). D'autres préconisent une redistribution hybride de la fiscalité carbone, entre autres Kosonen (2012), Gonand et Jouvét (2015), Combet et Méjean (2017), Goulder et al. (2019) et Antosiewicz et al. (2020).

Plusieurs équipes d'économistes ont développé de larges modèles hybrides nationaux ou multirégionaux, parfois à destination de grands organismes institutionnels, pour étudier l'interaction entre les systèmes techniques énergétiques et l'économie, mais aussi l'effet des politiques énergétiques et environnementales sur l'économie (entre autres, Imaclim, Witch, Three-ME, E3MG, Némésis, CIMS, DICE/RICE, MERGE, MIND). Nordhaus (1994) fut le premier à développer ce type de modèles avec le modèle DICE/RICE où il établit un lien entre la croissance économique et environnement. Les économistes se dotent de plusieurs types de modélisations macroéconomiques qu'il s'agisse de modèles en équilibre général, de modèles macroéconométriques, de modèles hybrides ou de modèles d'évaluation intégrée (IAM). La thèse présentera les avantages et les inconvénients de chacun en fonction de la question posée, et expliquera pourquoi elle fait le choix d'un modèle hybride pour simuler différentes options d'évolutions du système électrique et quantifier les évolutions en résultant pour différents indicateurs macroéconomiques.

*Le modèle hybride de la thèse (nommé HyGEM – Hybrid General Equilibrium Model) associe deux modèles : (i) un modèle en équilibre général dynamique et (ii) un modèle d'optimisation du système de production d'électricité (développé en interne chez RTE). Le modèle d'optimisation en équilibre partiel du système électrique réalise des simulations sur le fonctionnement du système électrique « au pas horaire » sous contraintes politiques, physiques et de demande. L'évolution des variables du système électrique¹ sont indirectement liées au modèle en équilibre général dynamique via un *two-way soft-link*. C'est-à-dire que les deux modèles itèrent séparément, et échangent des informations de prix et de quantités dans les deux sens.*

Le modèle en équilibre général dynamique distingue, en plus d'une entreprise représentative et de l'autorité publique, deux types de ménages : (i) un ménage contraint par ses liquidités, dit ménage non-ricardien, et (ii) un ménage non-contraint par ses liquidités qui peut optimiser de façon intertemporelle, dit ménage

¹ Le prix de gros de l'électricité, les coûts annualisés du système électrique, les subventions publiques aux filières électriques subventionnées et les revenus de marché du système électrique.

ricardien. Les ménages sont ainsi diversement concernés par les chocs de prix des énergies et de la fiscalité environnementale. Les résultats montrent que le ménage non-ricardien est plus sensible aux chocs de prix des énergies et que la mise en place d'un mécanisme de redistribution peut atténuer des effets régressifs de la fiscalité environnementale.

Le modèle tient compte des services énergétiques produits par les biens durables des ménages, ce qui permet d'ajouter les biens durables comme vecteur des chocs de prix des énergies dans l'économie. La littérature microéconomique (*cf.* Halvorsen et Larsen [2001]) en ce domaine s'est inspirée des travaux de la théorie de production des services par les ménages de Becker (1965), Muth (1966) et Lancaster (1966). Elle utilise ce traitement de l'énergie « résidentielle » pour étudier les canaux de transmission des chocs énergétiques sur les ménages (par exemple, Ogaki et Reinhart [1998], Marsiliani et Renstrom [2000], Barsky, House et Kimball [2007], Dhawan et Jeske [2008], Fernandez-Villaverde et Krueger [2011], et Henriët, Maggiar et Schubert [2014]).

Le modèle différencie la consommation d'énergie non-électrique (pétrole et gaz) de la consommation d'électricité, en s'appuyant sur une modélisation spécialement fine du secteur électrique grâce au modèle d'optimisation du secteur électrique de RTE. La littérature macroéconomique n'étudie pas très souvent l'électricité à part des autres types d'énergie. Historiquement, le pétrole est l'énergie la plus étudiée dans la littérature macroéconomique. Le modèle hybride développé dans la thèse est l'un des rares à s'appuyer sur un modèle de type ingénieur détaillé du fonctionnement du système de production d'électricité français au pas horaire. Les modèles hybrides Witch (Bosetti et al., 2006), Imaclim (Sassi et al., 2009) et Némésis (Boitier et al., 2015) modélisent le système électrique mais d'une façon pas aussi détaillée que le modèle de RTE qui est utilisé dans la thèse. Plusieurs contraintes techniques ne sont pas prises en compte (les contraintes au niveau des interconnexions, le maximum de délestage, les contraintes d'effacement...), et l'équilibre du système électrique n'est assuré qu'au pas hebdomadaire et non au pas horaire (sauf pour Imaclim). Le modèle d'optimisation du système électrique dans la thèse permet notamment de connaître l'évolution des investissements dans les capacités de production selon les contraintes imposées par le gouvernement en matière de neutralité carbone et les contraintes techniques, l'évolution requise des subventions aux filières électriques subventionnées et l'évolution du prix de gros de l'électricité dans le temps.

Le modèle étudie les effets de différents scénarios d'évolution du prix relatif des énergies et des effets de substitution qui y sont associés. Depuis les chocs pétroliers des années 1970, une partie de la littérature macroéconomique porte sur les canaux de transmission de l'évolution du prix du baril vers l'économie ; entre autres, Pindyck et Rotemberg (1984), Hamilton (1983), Kim et Loungani (1992), Rotemberg et Woodford (1998), Finn (2000), Ireland (2000), Lee et Ni (2002), Leduc et Sill (2004), Dhawan et Jeske (2008), Kilian (2008) et Henriët, Schubert et Maggiar (2014). Néanmoins, la

littérature étudie moins l'interaction entre l'électricité et l'énergie non-électrique via l'évolution de leur prix respectif. Les agents de l'économie effectuent leurs choix de consommation selon des arbitrages intertemporel et intratemporel. Ces arbitrages sont, en partie, faits sur la base des possibilités de substitution entre les différents biens de consommation pour les ménages, et les différents facteurs de production pour les entreprises. Surtout, les possibilités de substitution concernent l'interaction entre le prix relatif des énergies et le progrès technique dans l'efficacité énergétique².

Pour le débat public, l'étude de l'évolution du prix de l'électricité, en plus du prix du baril et du gaz, est aussi importante dans le contexte où l'économie française dépendra relativement plus de l'électricité et relativement moins de l'énergie non-électrique sur le long terme. En effet, une des conséquences de la transition énergétique est l'électrification de l'économie via le développement du parc de véhicules électriques, l'électrification des équipements de logement et l'électrification des équipements des secteurs d'activité.

La thèse accorde une analyse spécialement soignée aux possibilités de substitution et en particulier aux élasticités de substitution entre facteur de production. Le point est particulièrement important pour expliquer les changements dans la distribution du revenu entre les facteurs et la croissance de long terme (cf. Atkeson et Kehoe [1999], et Papageorgiou, Saam et Schulte [2017]). Le niveau des élasticités de substitution entre les différents biens de consommation est aussi important. Il affecte directement les décisions de consommation d'énergie des ménages sur le long terme. C'est pourquoi la thèse estime économétriquement les élasticités de substitution entre l'énergie non-électrique et l'électricité du côté des ménages et du côté de l'entreprise, avec des données agrégées. Les résultats d'estimation montrent que l'électricité et l'énergie non-électrique sont imparfaitement substituables sur le long terme pour les ménages et sont imparfaitement complémentaires sur le long terme pour les secteurs d'activité au niveau agrégé. L'estimation de l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie, et le capital et le travail est cohérente avec les valeurs estimées dans la littérature. Un large test de robustesse montre que les dynamiques du modèle ne sont pas sensibles à la magnitude des élasticités de substitution (contrairement à la conclusion de Papageorgiou, Saam et Schulte [2017]).

La thèse étudie trois versions d'évolution (exogène) du prix des hydrocarbures pour étudier les différents effets de substitution possible entre les énergies sur le long terme. La version médiane (ou baseline) du modèle correspond au scénario « Sustainable Development » de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA)

² Dans le cadre de la thèse, le progrès technique dans l'efficacité énergétique englobe l'effort d'électrification des usages dans le temps et la tendance d'évolution de l'efficacité énergétiques dans les équipements de transport, de logement et industriels.

qui fait l'hypothèse, à l'horizon 2035, d'un prix du baril de 61 \$2018, et un prix du gaz naturel 7.5 \$2018/Mbtu. La version haute correspond au scénario « Stated Policies » de l'IEA qui fait l'hypothèse, à l'horizon 2035, d'un prix du baril de 96 \$2018, et un prix du gaz naturel 8.4 \$2018/Mbtu. La version basse reprend la valeur pour le prix du gaz naturel de la baseline, et prend le scénario bas du prix du baril de Saudi Aramco avec un prix de 12 \$2018 le baril à l'horizon 2050³, soit un prix de 41 \$2018 le baril à l'horizon 2035.

Le modèle étudie les effets de la fiscalité carbone dans les différentes versions d'évolution du prix de l'énergie non-électrique. La fiscalité énergétique environnementale est employée par les pouvoirs publics pour infléchir les comportements des consommateurs et des producteurs en intégrant au mieux les externalités négatives dans les prix. Elle peut aussi être utilisée à des fins de rendement budgétaire. Elle a un effet direct sur la demande d'électricité adressée au système électrique et sur la décarbonation de l'économie. Selon la version d'évolution du prix de l'énergie non-électrique sur le long terme, la fiscalité carbone n'a pas le même effet sur la consommation de l'énergie non-électrique. Les résultats de la thèse montrent par exemple que l'évolution de la fiscalité carbone telle que prévue par le Projet Loi Finance 2018 n'est pas assez dissuasive pour découpler les émissions de la croissance économique si le prix de gros des hydrocarbures diminue dans futur selon le scénario d'évolution de Saudi Aramco. Comme conclut Roach (2021), la taxation carbone doit évoluer de manière dynamique, c'est-à-dire que les réévaluations doivent être fréquentes. La taxation carbone doit évoluer positivement avec le volume d'énergie consommé et négativement avec le prix des hydrocarbures dans le temps. En effet, si le prix de gros des énergies augmente suffisamment, la consommation des énergies diminue mécaniquement sans besoin d'avoir recours à une augmentation de la fiscalité carbone. La taxe carbone peut aussi soulever des questions de redistribution, en particulier au bénéfice des ménages contraints par leurs liquidités. Enfin, l'interaction entre la fiscalité carbone et le prix de l'énergie non-électrique affecte les recettes fiscales de l'État. Les résultats de la thèse suggèrent que, malgré une érosion de la base taxable des produits énergétiques, le passage au tout électrique ne devrait pas engendrer, toutes choses égales par ailleurs, un manque à gagner pour les administrations, grâce en partie aux possibilités de substitution. À long terme, le surplus primaire du gouvernement pourrait même augmenter.

Les résultats de la thèse montrent que l'effet prix sur les décisions des agents en matière de consommation d'énergie est sensible. Dans le modèle, les entreprises basent leurs décisions de consommation d'énergie relativement plus sur le prix relatif des énergies plutôt que sur les gains d'efficacité énergétique. Et les ménages basent leurs décisions de consommation d'énergie relativement plus sur le prix relatif

³ Il n'existe pas de scénario bas dans les scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie. Le prix du quota de CO₂ est déjà élevé dans la baseline, c'est pourquoi la version basse est calquée sur la baseline. Le prix du gaz naturel est aussi bas dans la baseline, c'est pourquoi la version basse est calquée sur la baseline.

des énergies lorsque le prix des énergies est relativement plus élevé et relativement plus sur l'efficacité énergétique lorsque le prix des énergies est relativement plus faible. C'est pourquoi, la réévaluation de la fiscalité carbone de manière dynamique, en plus des efforts plus intenses en efficacité énergétique du côté des ménages, est importante pour accélérer la transition vers une économie moins carbonée.

L'évolution future des variables énergétiques (exogènes) précédentes ; comme le prix du baril, le prix de vente réglementé de l'électricité, l'évolution du mix de production d'électricité guidé par les choix de politiques ou encore l'encadrement réglementaire et légal de l'efficacité énergétique comme la rénovation thermique ; est soumise à de l'incertitude. *Pour intégrer une forme d'incertitude, le modèle de la thèse est simulé selon deux structures d'information : (i) une structure d'information parfaite, correspondant à un environnement déterministe où les agents de l'économie anticipent parfaitement l'évolution des variables énergétiques exogènes dans le temps, et (ii) une structure d'information imparfaite, correspondant à un environnement déterministe où les agents de l'économie n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques exogènes dans le temps.* La première structure d'information est souvent utilisée dans la littérature macroéconomique lorsque le modèle théorique ne permet pas d'intégrer de la stochasticité pour des raisons calculatoires. Cette structure d'information est discutable sur le plan empirique. Dans la réalité, les agents de l'économie ont une vision plus ou moins limitée de l'évolution des variables exogènes dans le temps. La seconde structure d'information est surtout utilisée pour étudier l'effet de la temporalité des chocs de revenu et des politiques fiscales sur le comportement des agents ; entre autres, Hall (1971), Wilcox (1989), Zeldes (1989a et 1989b), Parker (1999), Souleles (1999), Blundell, Pistaferri et Preston (2008), Wohltmann et Winkler (2008), Jappelli et Pistaferri (2010), Mertens et Ravn (2012), et Agarwal et Qian (2014). Concernant l'évolution de la fiscalité carbone et du prix des énergies, il existe quelques références, entre autres Pindyck et Rotemberg (1984), Marion et Svensson (1984), et Chan (2020), mais aucune n'intègre les politiques en faveur de la transition électrique sous divers scénarios d'évolution du prix des énergies avec un modèle hybride électricité-économie.

Les effets de la transition bas-carbone sur le PIB en unité de travail efficace et sur le bien-être des ménages dans le modèle sont différents sur le long terme lorsqu'on considère une structure d'information plutôt qu'une autre. Quand les agents anticipent l'évolution du prix des énergies, des investissements dans le système électrique et de l'efficacité énergétique, la demande agrégée adressée aux entreprises diminue sur le long terme et le coût de production unitaire de l'entreprise augmente sur le long terme. Par conséquent, les entreprises ajustent leur utilisation de facteurs de production à travers l'effet substitution et leur production à travers l'effet d'échelle. Malgré une évolution similaire de leur coût de production unitaire sur le long terme, lorsque les agents de l'économie n'anticipent pas l'évolution des variables

énergétiques exogènes, l'effet dépressif sur la production des entreprises est sensiblement amorti grâce à une demande agrégée relativement plus élevée. Les agents de l'économie réagissent différemment selon que l'évolution des variables énergétiques est annoncée à l'avance ou pas. L'évolution du prix des énergies et de l'efficacité énergétique est identique dans les deux structures d'information, mais les dynamiques de consommation et d'investissement de l'économie sont différentes dans les deux structures d'information. Notamment, les ménages vont pouvoir se prémunir (à l'avance) contre l'évolution future du prix des énergies dans le cas où l'évolution est annoncée à l'avance. Le rôle joué par les arbitrages entre l'investissement en capital physique et l'investissement en biens durables dans ce résultat est central.

Par ailleurs, dans les deux structures d'information, l'effet sur la demande agrégée et le bien-être est amorti par le mécanisme de redistribution de la fiscalité environnementale mise en place par le gouvernement. En particulier, grâce au mécanisme de redistribution, le caractère régressif de la politique fiscale environnementale est relativement plus atténué quand les ménages n'anticipent pas l'évolution de la taxe carbone sur le long terme. Les écarts de gain de bien-être entre les deux types de ménages sur le long terme se resserrent. Alors que lorsque le gouvernement annonce à l'avance la politique fiscale, le recyclage de la taxe environnementale bénéficie relativement plus au ménage ricardien. La redistribution du surplus primaire du gouvernement vers les ménages y est relativement plus élevée grâce à une consommation totale des ménages relativement plus élevée et une consommation d'énergie des entreprises relativement plus élevée. Néanmoins, les différences de gain de consommation, suite à la mise en place des transferts budgétaires, entre le ménage ricardien et le ménage non-ricardien sont moins élevées dans le cas où la politique fiscale n'est pas anticipée par les ménages. Ce résultat est intuitif car le ménage ricardien peut amortir à l'avance l'effet d'une augmentation du prix des énergies sur le long terme dans cas où il anticipe parfaitement l'évolution du prix des énergies. Alors que s'il n'anticipe pas l'évolution du prix des énergies sur le long terme, il ne peut pas se prémunir contre des chocs adverses futurs, comme c'est le cas pour le ménage non-ricardien dans les deux structures d'information.

Le rôle de l'investissement dans les biens durables et en capital physique est central dans l'explication des différences de PIB et de bien-être entre les deux structures d'information. Pindyck et Rotemberg (1984), Lee et Ni (2002), Dhawan et Jeske (2008), et Killian (2008) soulignent déjà l'importance des biens durables dans l'explication des fluctuations de l'économie suite à des chocs de prix des énergies. Par ailleurs, les chocs anticipés ont des effets sur les comportements passés, présents et futurs des agents (*cf.* Hall [1971], Mertens et Ravn [2012], et Chan [2020]) grâce aux comportements intertemporels des agents, alors que les chocs non-anticipés ne modifient que les comportements présents et futurs des agents. C'est pourquoi les dynamiques d'investissement en capital physique et d'investissement

en biens durables sont différentes entre les deux structures d'information. Les résultats montrent que l'investissement en capital physique et l'investissement en biens durables influencent sensiblement les dynamiques de la demande agrégée et de bien-être. Les dynamiques de l'investissement affectent directement la dynamique de la demande agrégée. Pour le bien-être, les écarts de gain de bien-être sont relativement plus faibles dans le cas où les ménages n'anticipent pas les chocs. *Si les ménages anticipent l'évolution du prix des énergies dans le temps, le ménage ricardien se prémunit à l'avance en réarrangeant son portefeuille d'actifs en biens de capital et en bien durables.* C'est pourquoi le ménage ricardien gagne relativement plus en bien-être lorsqu'il anticipe l'évolution du prix des énergies sur le long terme par rapport au ménage non-ricardien qui ne peut pas se prémunir contre une hausse future du prix des énergies.

Les résultats précédents ont une influence sur la « croissance verte » telle que définie à l'article L. 100-1 du code de l'énergie (« *mode de développement économique respectueux de l'environnement, à la fois sobre et efficace en énergie et en consommation de ressources et de carbone, socialement inclusif, soutenant le potentiel d'innovation et garant de la compétitivité des entreprises* »). Dans le modèle, la décarbonation de l'économie est relativement plus faible si les chocs ne sont pas anticipés par les agents économiques, mais les entreprises sont moins lésées. En revanche, si les chocs futurs sont parfaitement anticipés par les agents de l'économie, la décarbonation est relativement plus poussée, mais l'économie est relativement moins résiliente face aux chocs à cause d'une demande agrégée relativement plus faible et un coût de production unitaire pour l'entreprise relativement plus élevé.

Enfin, le principal canal de transmission macroéconomique de la transition bas carbone dans le modèle est la demande d'énergie via le prix relatif des énergies et l'efficacité relative des énergies, plutôt que via l'augmentation des investissements en faveur de la décarbonation du mix électrique. Les coûts d'investissement et de maintenance dans le système de production d'électricité ne représentent que 1,3% du PIB en 2018. Il est donc normal que l'évolution de ces investissements sur le long terme n'affecte que marginalement l'économie. Néanmoins, les investissements dans le système de production affectent indirectement la demande agrégée de l'économie à travers le prix de gros de l'électricité. En effet, l'exposé des résultats précédents montre que dans le scénario *Ampère*, où les investissements dans les énergies renouvelables sont relativement plus élevés, le prix de gros l'électricité est relativement plus faible grâce à des coûts marginaux variables relativement plus faibles. Les différences de prix de gros de l'électricité entre les deux trajectoires d'évolution du mix de production d'électricité (*Ampère* et *Volt*) affectent la demande agrégée de l'économie. Dans la structure d'information imparfaite, un prix de gros de l'électricité relativement plus faible augmente relativement moins la demande agrégée sur le long terme. Avec la structure d'information parfaite, un prix de gros de l'électricité relativement plus faible soutient la demande agrégée sur le long terme.

La thèse comporte quatre parties. La première partie établit un état de la littérature sur les modélisations macroéconomiques existantes appliquées à la transition énergétique. Elle justifie le choix d'un modèle hybride couplant un modèle de croissance à équilibre général de type dynamique à un modèle d'optimisation du système électrique développé par RTE. La partie est organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre évoque brièvement les origines de l'application de la macroéconomie contemporaine à la thématique de l'énergie et de l'environnement. Le deuxième chapitre présente les modèles en équilibre général à disposition pour étudier les politiques énergétiques et environnementales. Le troisième chapitre présente trois autres types de modélisation : les modèles macroéconométriques, les modèles hybrides et les modèles d'évaluation intégrée (IAM). Enfin, le dernier chapitre pèse les avantages et inconvénients énoncés dans les chapitres précédents pour révéler le modèle le plus adéquat à la question étudiée par la thèse.

La deuxième partie correspond à la construction du modèle hybride et à sa calibration. Le premier chapitre présente les scénarios Ampère et Volt du Bilan Prévisionnel (ci-après, BP) de RTE. Le deuxième chapitre présente le modèle de type ingénieur utilisé par RTE pour simuler, par définition en équilibre partiel, le mix électrique et les investissements sur le long terme. Le troisième chapitre justifie le choix de l'environnement de simulation (déterministe), présente le modèle de croissance exogène et son interfaçage avec le modèle ingénieur. Le quatrième chapitre calibre le modèle. Notamment, un effort d'estimation économétrique est fait sur les différentes élasticités de substitution qui font partie des principaux moteurs de la dynamique du modèle.

La troisième partie discute des résultats de simulation de transition bas-carbone dans le secteur de l'électricité, selon trois versions d'évolution du prix du gaz et du pétrole (haut, médian et bas), sur la base du modèle en information parfaite. La partie vient alimenter une littérature déjà existante sur l'analyse des politiques environnementales dans un contexte macroéconomique, et présentée dans la Partie I. Le premier chapitre détaille les différentes versions d'évolution du prix des énergies envisagées. Le deuxième chapitre discute des résultats de simulation des scénarios Ampère et Volt si les agents ont une information parfaite de l'économie. Le troisième chapitre effectue quelques tests de robustesse sur les paramètres sensibles du modèle. Et, le quatrième chapitre clôt la partie sur une discussion.

La quatrième partie étudie le comportement des agents si la structure d'information était imparfaite. Le premier chapitre présente les résultats. Le deuxième chapitre clôt la partie sur une discussion.

PARTIE I. Les modèles macroéconomiques à l'épreuve des politiques énergétiques et environnementales : un état de la littérature

Les modèles macroéconomiques influencent l'élaboration des politiques publiques dans le secteur de l'énergie. Hall et al. (2001), et Stern et Cleveland (2004), soulignent que l'énergie fait l'objet d'un traitement quasi-inexistant dans la majeure partie des modèles macroéconomiques dans les décennies passées, car nombreux sont les économistes qui ont supposé implicitement que l'énergie était un facteur abondant dont le coût représente une part faible des coûts totaux de l'économie. Dans la littérature, la majeure partie des modèles ignorent les aspects énergétiques et environnementaux. Historiquement, l'accent est mis sur la distribution des richesses et l'efficacité des marchés plutôt que la production de la richesse. Par ailleurs, lorsque viennent les premières études sur la production de la richesse, seuls les facteurs travail et capital réussissent à se glisser dans les modèles macroéconomiques. Les chocs pétroliers ont un peu changé la vision des économistes, surtout celle de la nouvelle économie classique, sur la relation entre l'énergie et les cycles économiques. La relation entre l'énergie et la croissance est toujours peu regardée.

Les récentes inquiétudes environnementales poussent les économistes à intégrer de plus en plus ces aspects en étudiant la performance des politiques environnementales sur l'économie (par ex. Fischer et Springborn [2011], Heutel [2012], Annicchiarico et Di Dio [2015], et Chan [2020]). Les économistes étudient le plus souvent des aspects conjoncturels et non structurels des politiques environnementales. En revanche, certains auteurs étudient les aspects de long terme des politiques environnementales et des politiques de stimulation de l'innovation dans le secteur énergétique (par ex., Aghion et Howitt [1998], Smulders et de Nooij [2003], Hallegatte, Henriët et Corfee-Morlot [2011], Hassler, Krussell et Olovsson [2012], Acemoglu et al. [2012], Henriët, Maggiori et Schubert [2014], et Lemoine et Traeger [2014]). Le sujet de la présente thèse se situe dans cette partie de la littérature.

L'objectif de cette partie, au-delà de la présentation des différentes modélisations macroéconomiques existantes appliquées à la transition énergétique, est de justifier le choix d'un modèle hybride couplant un modèle de croissance à équilibre général dynamique à un modèle d'optimisation du système électrique développé par RTE. La partie est organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre évoque les origines de la macroéconomie contemporaine et analyse son application dans la thématique « énergie et environnement ». Le deuxième chapitre présente les modèles en équilibre général à disposition pour étudier les politiques énergétiques et environnementales. Dans la macroéconomie actuelle, autant d'éléments de la tradition classique (cadre microfondé et anticipations rationnelles) que d'éléments keynésiens (théorie des rigidités nominales et réelles) composent le cadre théorique le plus souvent retenu par la littérature. La modélisation en équilibre général (Arrow et Debreu, 1954) est composée de trois classes de modèles, à savoir : l'équilibre général calculable (*Computable General Equilibrium*, CGE), l'équilibre général dynamique et stochastique (*Dynamic and Stochastic General Equilibrium*, DSGE) et les générations imbriquées (*Overlapping Generations*, OLG). Les modèles précédents constituent le socle de la modélisation macroéconomique contemporaine. Les inconvénients de ces modèles amènent à considérer d'autres modèles macroéconomiques. Les modèles en équilibre général soulèvent quatre inconvénients majeurs : (i) le relatif manque de détail technologique, (ii) l'étude partielle des changements structurels, (iii) la difficulté à étudier les politiques orientées technologie, et dans une moindre mesure (iv) la faiblesse de la robustesse empirique par rapport aux modèles économétriques. En fonction de la question à analyser par le modélisateur, les inconvénients peuvent amener à utiliser d'autres modèles qui affinent les trois catégories de modélisation précédemment exposées. Le troisième chapitre présente alors trois autres types de modélisation : les modèles macroéconométriques, les modèles hybrides et les modèles d'évaluation intégrée (*Integrated Assessment Models*). Enfin, le dernier chapitre agrège les avantages et inconvénients énoncés dans les parties précédentes pour révéler le modèle le plus adéquat à la question étudiée par la présente thèse. Imbriquer un modèle à équilibre général dynamique (stochastique ou déterministe) dans une approche hybride semble l'approche la plus à même de simuler différentes options d'évolutions du système électrique afin de quantifier les évolutions en résultant pour différents indicateurs macroéconomiques.

CHAPITRE 1. CONTEXTE THÉORIQUE : ORIGINES DE LA RÉFLEXION CONTEMPORAINE EN MACROÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE

Le renouvellement de la macroéconomie est historiquement lié à des événements énergétiques et environnementaux (cf. **Figure 1** *infra*). Trois phases historiques façonnent la macroéconomie contemporaine : les chocs pétroliers, les inquiétudes environnementales et le protocole de Kyoto, et l'élaboration des premières politiques technologiques dans le domaine énergétique. Les premiers modèles macroéconomiques issus du renouveau étudient l'effet des chocs pétroliers sur les fluctuations des économies et le rôle joué par les politiques conjoncturelles de l'époque. Par ailleurs, des modèles macroéconomiques, plus de long terme, intègrent les problématiques de croissance, d'innovation et de redistribution intergénérationnelle en lien avec les inquiétudes environnementales et les politiques de transition énergétique.

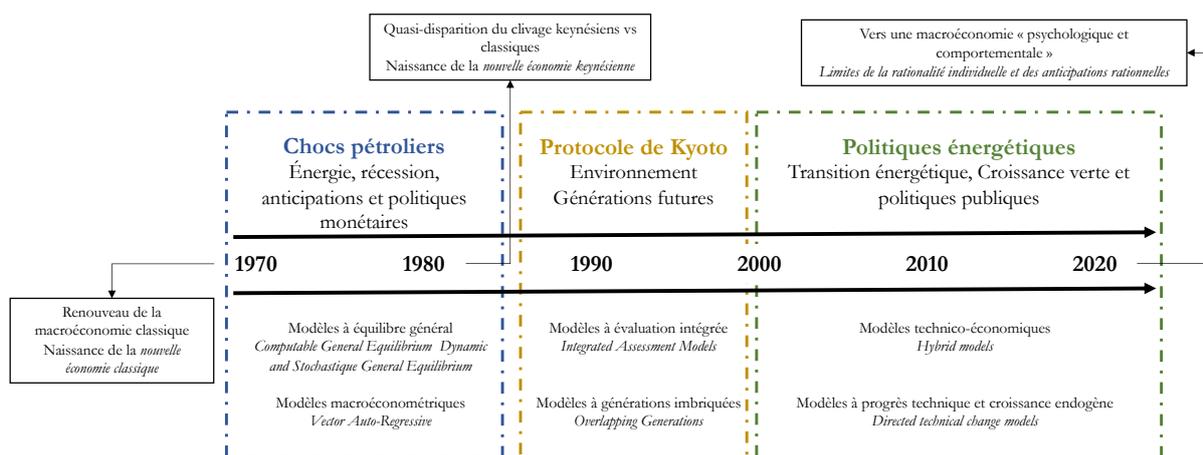


Figure 1 Frise chronologique du renouvellement de la macroéconomie en lien avec l'énergie et l'environnement

Le chapitre comporte trois sections. La première définit la « transition énergétique » au sens de la thèse. La seconde étudie l'origine des modèles macroéconomiques sous l'angle classique qui tient compte des phénomènes de moyen-long terme. Enfin, la troisième étudie l'origine des modèles macroéconomiques sous l'angle keynésien qui tient compte de phénomène de court-moyen terme.

1. Élément de définition : la transition énergétique

La transition énergétique est la **transformation** d'une économie à empreinte carbone élevée en une économie à empreinte carbone faible. La transition énergétique est un processus de transformation

d'une économie qui se situe sur le temps long. Son analyse requiert donc en particulier l'emploi de modèles de moyen-long terme⁴.

Un système énergétique à empreinte carbone élevée est un système où un ensemble d'énergies primaires émettent des gaz à effet de serre durant tout le processus d'extraction, de production et de transformation. Les énergies concernées sont, de l'énergie la plus carbonée à la moins carbonée, le charbon, le pétrole et le gaz naturel. La **transition du système énergétique vers des énergies faiblement carbonées** est un outil de la transition énergétique. Les énergies faiblement, voire pas carbonées, sont les bioénergies, l'éolien, l'hydraulique, le nucléaire et le solaire. Malgré des émissions de gaz à effet de serre faibles, voire nulles, le nucléaire a aussi un effet environnemental à cause des déchets radioactifs, ce qui peut pousser certains pouvoirs publics à vouloir s'en détacher avec précaution.

L'**efficacité énergétique** est un outil de la transition énergétique qui permet de réduire la consommation des équipements industriels, des équipements de transport et de logement qui utilisent de l'énergie notamment en substituant du capital à l'énergie. En effet, les technologies à faible intensité énergétique sont plus intensives en capital que les technologies traditionnelles. Le secteur de la R&D joue un rôle important dans le développement de ces « nouvelles » technologies.

En France, la politique énergétique définit notamment la composition du bouquet électrique via la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, les outils incitatifs à l'investissement, les mesures fiscales sur les produits énergétiques et la législation sur l'efficacité énergétique. L'article L. 100-1 du code de l'énergie prévoit notamment que la politique énergétique « favorise l'émergence d'une économie compétitive et riche en emplois grâce à la mobilisation de toutes les filières industrielles, notamment celles de la croissance verte qui se définit comme un mode de développement économique respectueux de l'environnement, à la fois sobre et efficace en énergie et en consommation de ressources et de carbone, socialement inclusif, soutenant le potentiel d'innovation et garant de la compétitivité des entreprises » et « contribue à la mise en place d'une Union européenne de l'énergie, qui vise à garantir la sécurité d'approvisionnement et à construire une économie décarbonnée et compétitive, au moyen du développement des énergies renouvelables, des interconnexions physiques, du soutien à l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la mise en place d'instruments de coordination des politiques nationales. ». Pour atteindre ces objectifs, l'article L. 100-2 du code de l'énergie dispose que les pouvoirs publics doivent veiller à la maîtrise de la demande énergétique et à favoriser l'efficacité énergétique, ainsi que la sobriété énergétique grâce à une diversification des sources d'énergie, des mesures fiscales et l'innovation.

⁴ Le long terme est défini comme l'horizon temporel de la croissance potentielle pour lequel l'évolution de la production/croissance est essentiellement liée à l'accumulation du capital et le progrès technique.

La thèse se concentrera sur les trois principaux instruments que sont (i) l'évolution du parc de production d'électricité, (ii) l'efficacité énergétique et (iii) les mesures fiscales. L'efficacité énergétique est définie dans la thèse comme la maîtrise de la demande d'énergie et les transferts d'usage vers des usages moins carbonés. La thèse suit ainsi les doctrines de l'Agence Internationale de l'Énergie et l'IRENA (2017) qui soulignent que l'amélioration des efforts d'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables à grande échelle sont les principaux moteurs d'une transition énergétique.

L'étude des politiques publiques dans le domaine énergétique et de leurs conséquences sur les systèmes requièrent des modèles macroéconomiques adaptés aux besoins des décideurs et des acteurs. La littérature macroéconomique à disposition est suffisamment abondante pour établir un état de la littérature. Le déroulement du reste du chapitre s'efforcera de répondre aux besoins énoncés.

2. Les outils de la « nouvelle économie classique »

Au tournant des années 1970, la réflexion macroéconomique se renouvelle autour de deux courants : la *nouvelle économie classique* et la *nouvelle économie keynésienne*. Le renouvellement intervient après les premières crises pétrolières. La nouvelle économie classique met principalement l'accent sur le rôle clé des impulsions technologiques dans l'explication des fluctuations de l'économie et de la croissance sur le long terme. Ces impulsions technologiques sont un élément clé des politiques de transition énergétique, par ex. le développement des véhicules électriques et le développement des énergies renouvelables à grande échelle.

La section se décompose en deux sous-sections. La première sous-section revient sur les origines de la réflexion macroéconomique et de ses prolongements dans la macroéconomie de l'énergie. La seconde sous-section s'intéresse à une des caractéristiques les plus importantes de la macroéconomie moderne pour l'étude des politiques énergétiques et environnementales : le cadre microfondé.

2.1. Les origines de la réflexion et leurs prolongements dans la macroéconomie actuelle de l'énergie

La critique de l'économiste Robert Lucas (1972 et 1976), et plus tard de Lucas et Sargent (1979), sur la capacité des modèles macroéconométriques keynésiens à établir les bonnes politiques, est la plus importante dans l'émergence de la nouvelle école classique⁵. Au tournant des années 1970, les

⁵ Un des premiers résultats est que les agents ne peuvent pas discriminer entre les mouvements aléatoires et les mouvements systématiques de la monnaie, du moins sur le court terme. Par conséquent, une information incomplète

économies sont confrontées à des chocs pétroliers qui plongent les économies dans une récession. Les décideurs mettent en place des plans de relance, sur le schéma keynésien de l'après-guerre, pour stabiliser l'économie⁶. Cependant, les plans de relance se soldent tous en un échec et en des plans de rigueur ; la stagflation est empirée, la dette se creuse, et les déficits explosent. Alors, Robert Lucas montre que les régularités empiriques keynésiennes observées dans le passé et utilisées pour diriger les politiques publiques ne tiennent plus, principalement car les économistes n'étudient pas les mécanismes structurels qui les font émerger. Les régularités observées dans le passé ne persistent pas forcément lorsqu'une nouvelle politique publique est mise en place ou lorsqu'un choc exogène (par ex., un choc pétrolier) perturbe une économie. Robert Lucas conclut que les recommandations keynésiennes ne prennent pas en compte la manière dont les agents économiques anticipent et modifient leur comportement en réponse à une perturbation. Alors, Lucas (1972) développe le premier modèle d'une longue lignée pour étudier les effets des politiques conjoncturelles. Le modèle est novateur sur trois points : un cadre microfondé, un environnement dynamique, et des agents dotés d'anticipations rationnelles à la Muth permettant d'intégrer la manière dont les agents forment leur évaluation des grandeurs économiques futures. **La critique de Lucas est importante pour la macroéconomie de l'énergie à trois égards : l'importance des micro-fondations, le rôle des anticipations (rationnelles) des agents et de la crédibilité des politiques publiques.** Elle permet de mieux comprendre comment les agents économiques répondent aux engagements futurs, d'une politique de transition énergétique par exemple, via les décisions d'investissements et de consommation.

Pour décrire les mécanismes sous-jacents aux phénomènes macroéconomiques, il faut pouvoir décrire finement les comportements microéconomiques individuels des agents de l'économie. Ces mêmes comportements microéconomiques individuels sont le fruit des anticipations rationnelles. La théorie des cycles réels de Long et Plosser (1983), et King, Plosser et Rebelo (1988), reprend ce schéma et y ajoute des chocs aléatoires de nature technologique pour expliquer les fluctuations d'une économie. Ces modèles, modèles dits à équilibre général dynamique et stochastique (DSGE), sont les premiers à émerger du renouveau de la théorie macroéconomique. Les modèles se développent après les premières crises pétrolières, pour en étudier l'impact sur les fluctuations des économies de l'époque. L'élément principal d'innovation est que le modèle permet d'étudier particulièrement l'effet d'un choc sur le court terme *et le long terme*, mais aussi durant toute la période de transition (quelle est la persistance des chocs ?). Les résultats des modèles attribuent

sur la nature des perturbations économiques peut permettre à une politique publique d'obtenir un effet sur l'activité de court terme ... jusqu'à ce que les agents révisent leurs anticipations et ajustent leur comportement. Alors, les anticipations des agents rendent caduc la politique publique.

⁶ En France, le plan Giscard et le plan Mauroy.

les perturbations réelles (principalement technologiques) aux fluctuations d'une économie autour de sa tendance de long terme à la réponse optimale des agents économiques.

En lien avec les anticipations rationnelles, la littérature souligne que le rôle de la crédibilité des autorités publiques est important pour les politiques structurelles. La création d'un environnement favorable à la transition énergétique au moyen de **politiques crédibles, stables et anticipées**, est une condition pour son succès. En effet, les investissements jouent un rôle central dans la transition énergétique, d'autant plus important que les investissements dans les projets bas-carbone sont massifs et irréversibles, et les retours sur investissement sont étalés dans le temps. Mankiw (2016) écrit que l'irréversibilité de l'investissement a un effet négatif sur l'accumulation du capital, d'autant plus élevé en période d'incertitude. Par exemple, une politique de *feed-in tariffs* protège les producteurs d'énergies renouvelables en leur accordant une position favorable sur le marché de l'électricité afin qu'ils rentabilisent leurs investissements. Ce système ne pourrait pas fonctionner s'il était régi par une politique discrétionnaire. En effet, les agents pourraient alors craindre que la politique de protection initialement annoncée ne soit pas poursuivie dans le futur.

De nombreux travaux montrent le rôle joué par la crédibilité des politiques dans le soutien aux investissements. Kydland et Prescott (1977) étudient l'effet de la crédibilité⁷ des engagements politiques sur les fluctuations économiques. Ils comparent l'efficacité d'une politique de règles préétablies et d'une politique discrétionnaire flexible. L'idée centrale est de prendre en considération la manière dont les changements dans les réglementations changent le comportement des agents quand les anticipations sont rationnelles. Les auteurs concluent qu'il est préférable de suivre des règles préétablies pour maximiser le bien-être social, surtout en présence d'incohérence temporelle. Pindyck (1991) est un des premiers à soulever l'importance de la crédibilité des politiques macroéconomiques pour soutenir l'investissement dans l'industrie énergétique. Marsiliani et Renstrom (2000) étudient, via un modèle à équilibre général dynamique doté d'un modèle d'élection de type citoyen-candidat, le problème d'incohérence temporelle soulevé par les politiques de taxation de l'énergie. Helm, Hepburn et Mash (2003) montrent comment l'incohérence temporelle des politiques est due à la fixation d'objectifs multiples, au caractère irréversible des investissements et au changement de comportement des décideurs politiques sur des engagements pris dans le passé. Reinelt et Keith (2007) montrent que l'effet de l'incertitude réglementaire du prix du carbone sur les choix des technologies de production de l'électricité⁸ augmente le coût social d'abattement des émissions de gaz à effet de serre. Bosetti et Victor (2011)

⁷ Aussi, voir Auerhainmer (1974) et Calvo (1978) qui étudient la crédibilité des politiques monétaires.

⁸ Notamment le basculement du charbon vers le gaz ou le nucléaire, et le basculement du charbon vers le gaz ou la technologie de capture et de stockage du carbone (CCS).

montrent, à partir du modèle macroéconomique hybride *Witch*, qu'un manque de crédibilité pousse les agents à garder une vision de court-terme qui bride les investissements dans des technologies coûteuses et à cycle de vie long. De Cian, Bosetti et Tavoni (2012) concluent, à partir du modèle *Witch*, qu'une crédibilité faible (notamment sur la stabilité du prix du carbone) donne lieu à un comportement myope⁹ de la part des agents privés. Faehn et Isaksen (2016) avancent, via un modèle à équilibre général calculable, que les engagements des décideurs doivent être tenus sur le long terme pour stimuler suffisamment les investissements, et qu'à défaut le coût d'abattement des émissions triplerait. Rogge et Reichardt (2016) étudient, à partir d'une enquête auprès de plusieurs entreprises allemandes opérant sur toute la chaîne de valeur de l'éolien *offshore*, la manière dont le choix du dosage des politiques affecte leur activité d'innovation. Ils trouvent que la crédibilité et la stabilité de la politique énergétique à destination de l'éolien est un moteur clé de l'innovation dans le domaine. Dans la même veine, Rogge et Dutschke (2018) montrent, à partir d'une enquête de 390 entreprises allemandes, l'importance de la crédibilité de la politique de transition énergétique pour les investisseurs dans les projets bas-carbones. Les auteurs montrent que l'adoption de plusieurs instruments (*technology-push* et *demand-pull*) améliore la crédibilité de la politique mise en place, et que les changements fréquents dans les textes régissant la transition énergétique réduisent la crédibilité des politiques.

En lien avec la crédibilité des politiques publiques, une des caractéristiques majeures de l'approche de la nouvelle économie classique est la distinction entre les **changements anticipés et non-anticipés des politiques** publiques. Phelps (1968), Friedman (1968) et Lucas (1972) montrent que seuls des changements non-anticipés des politiques monétaires ont un effet sur l'output et l'emploi. D'autres économistes (*cf.* Cochrane [1998], et Romer et Romer [1994]) montrent que des effets anticipés des politiques publiques ont aussi un effet sur les dynamiques d'une économie. Dans la littérature de la macroéconomie de l'énergie et de l'environnement (*cf.* Mertens et Ravn [2012], et Chan [2020]), plusieurs auteurs se sont penchés sur les effets d'anticipation des agents aux politiques environnementales et aux chocs énergétiques. Mertens et Ravn (2012) montrent que les effets d'anticipation d'une augmentation de la fiscalité, quelle que soit, ne sont pas significatifs sur la consommation d'énergie des ménages. Mertens et Ravn (2012) montrent que l'économie, hors consommation des ménages, réagit différemment selon qu'un changement dans la fiscalité est anticipé ou pas. Surtout, ils argumentent que les effets d'annonces d'un changement dans la politique fiscale sont sensibles et que les dynamiques de l'économie, hors consommation d'énergie, vont réagir différemment sur la phase d'avant mis en œuvre de la taxe. De même, Chan (2020) montre

⁹ Un agent est doté d'anticipations myopes lorsqu'il utilise les événements passés et présents pour guider ses choix futurs.

que les effets agrégés d'une augmentation de la taxe carbone sont moins dépressifs dans le cas où l'augmentation n'est pas anticipée.

Par ailleurs, la littérature souligne que les impulsions technologiques constituent un élément important d'une transition énergétique : les améliorations des efforts dans l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables et le choc du prix des énergies. De fait, les économistes de l'énergie et de l'environnement utilisent le cadre macroéconomique pour étudier ces impulsions technologiques. Saunders (1992) étudie, à partir d'un modèle macroéconomique de type équilibre général dynamique néoclassique, le postulat de Khazzoom-Brookes et l'effet des politiques d'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie. Heutel (2012) et Fischer et Springborn (2012) se penchent sur l'interaction entre la régulation environnementale et les impulsions technologiques. Heutel (2012) trouve, en utilisant un modèle d'équilibre général dynamique et stochastique doté d'une externalité négative causée par la pollution, que l'instrument prix (taxation sur les émissions) et l'instrument quantité (quota sur les émissions) devraient répondre de manière procyclique à l'environnement économique. Il conclut que les politiques environnementales doivent s'adapter aux fluctuations économiques induites par le changement technologique. Fischer et Springborn (2011) comparent, via un modèle à équilibre général dynamique et stochastique, trois instruments de politique dans un environnement en présence de changements technologiques : plafond des émissions, taxe sur les émissions et objectif d'intensité carbone de l'output¹⁰. Henriot, Maggari et Schubert (2014) étudient sur données françaises, à partir d'un modèle macroéconomique de type équilibre général dynamique à croissance exogène et endogène, l'interaction entre la taxe carbone et le progrès technique de type efficacité énergétique, et leurs effets sur les émissions de CO₂ sur le long terme.

D'autre part, de plus en plus d'économistes se penchent sur les effets de croissance des politiques énergétiques et environnementales. Certains utilisent des modèles macroéconomiques à croissance endogène¹¹ pour étudier les impulsions technologiques. Aghion et

¹⁰ Fischer et Springborn (2011) montrent que :

- (i) Un plafond d'émission freine les effets des chocs de productivité sur une économie et réduit la volatilité de l'économie ;
- (ii) Une taxe sur les émissions freinent aussi ces effets, mais les variables économiques sont beaucoup plus volatiles (par ex. l'investissement sous politique fiscale est plus sensible aux déviations de la productivité que dans les autres politiques) ;
- (iii) Les objectifs d'intensité permettent de maintenir un niveau élevé de travail, capital et output. Par ailleurs, ce dernier régime réduit la volatilité et le coût sur le bien-être par rapport aux deux autres politiques.

¹¹Un modèle de croissance endogène est un modèle dans lequel l'état de la technologie répond de manière endogène à l'évolution d'une ou plusieurs variables du modèle (*cf.* Aghion et Howitt [1998]). Par exemple, dans un modèle doté d'un processus *learning-by-doing*, l'état de la technologie est une fonction de la production cumulée. D'autres modèles de croissance endogène intègrent un *capital dit de « connaissance »* qui s'accumule au même titre que le capital

Howitt (1998) analysent l'effet de la pollution environnementale et de l'épuisement des ressources non-renouvelables sur la croissance durable. Tahvonen et Salo (2001) étudient la transition entre les ressources énergétiques renouvelables et les ressources énergétiques non-renouvelables. Smulders et de Nooiji (2003) étudient l'effet des politiques d'efficacité énergétique sur l'innovation et la croissance. Ils trouvent un effet positif sur l'innovation et un effet parfois négatif sur le niveau de l'output. Plus récemment, Acemoglu et al. (2012) analysent la réponse du changement technologique aux politiques environnementales. Les auteurs montrent que, lorsque les facteurs de production faiblement carbonés et fortement carbonés sont imparfaitement substituables, une croissance durable peut être atteinte grâce à la mise en place d'une taxe carbone pour contrôler les émissions de gaz à effet de serre et des subventions temporaires à la recherche pour rediriger l'innovation vers les facteurs de production bas-carbone. Hassler, Krussell et Olovsson (2012) étudient la réponse de l'innovation dans l'efficacité énergétique aux incitations économiques, son effet sur la croissance et son effet sur le poids de l'énergie dans l'économie sur le long terme. Henriët, Maggiar et Schubert (2014) étudient l'effet des incitations économiques (taxe carbone) sur le progrès technique et la réduction des émissions carbonées. Atalla et al. (2017), Blazquez, Hunt et Manzano (2017) et Argentiero et al. (2018) étudient l'effet de l'évolution des mix énergétiques et de l'efficacité des politiques de soutien aux technologies faiblement carbonées sur une économie sur le moyen-long terme. Karydas et Zhang (2019) mesurent les effets agrégés sur une économie des réformes sur les taxes environnementales en Suisse. Metcalf et Stock (2020) estiment, pour les pays européens, les effets agrégés sur la croissance et l'emploi de la mise en place d'une taxe carbone. Les auteurs montrent que l'effet sur le PIB et l'emploi est nul voire positif. Enfin, d'autres d'économistes utilisent la structure des modèles macroéconomiques (*cf.* Koetse, de Groot et Florax [2008], van der Werf [2008], Hassler, Krussell et Olovsson [2012], et Papageorgiou, Saam et Schulte [2017]) pour estimer sur le long terme les paramètres de substitution entre capital, travail et énergie, et étudier leur effet sur la croissance de long terme.

En somme, nombreuses sont les applications de la macroéconomie moderne dans les questionnements énergétiques et environnementaux. Une des raisons majeures à cela est le cadre microfondé qu'offre les modèles macroéconomiques de la nouvelle économie classique.

2.2. Utilité du cadre microfondé dans l'étude de la transition énergétique

Un modèle macroéconomique microfondé est à première vue un choix pertinent pour étudier les comportements d'investissement et consommation des agents. Ces décisions

physique. Enfin, les modèles de croissance à la Schumpeter intègrent un secteur de R&D et étudient les incitations à diriger les ressources à l'innovation, notamment grâce aux brevets et aux profits de monopole temporaire.

individuelles d'investissement dans les projets énergétiques et de consommation d'énergie faiblement carbonée jouent un rôle essentiel dans la transition énergétique. Selon une étude de l'I4CE (2017), entre 45 et 75 milliards d'euros par an d'investissement dans le secteur énergétique sont nécessaires pour que la transition énergétique soit pleinement effective. L'étude note que l'environnement macroéconomique, les coûts des technologies énergétiques et les politiques énergétiques sont tout autant importants pour inciter les investissements dans les capacités solaires et éoliennes ainsi que dans l'efficacité énergétique.

Pour refléter au mieux les fluctuations temporelles de l'investissement et de l'accumulation du capital, la nouvelle économie classique a introduit une rigidité au cadre microfondé : le coût d'ajustement du capital¹² (cf. Gould [1968], King et Watson [1993], Kimball [1995], Kim [2000], et Ireland [2003]). Les coûts d'ajustement du capital renvoient au fait que la modification du facteur de production « capital » n'est pas sans coût. Les coûts renvoient principalement au coût de prospection, au coût d'apprentissage, au coût irrécupérable des investissements passés, au coût de la main d'œuvre requise pour désinstaller le capital existant et installer le nouveau capital, et au coût d'arrêt du processus de production lors de la période de remplacement du capital existant. Cela est d'autant plus vrai dans l'étude de la transition énergétique où tout un secteur est voué à se transformer au profit de nouvelles technologies plus intensives en capital.

Le cadre microfondé de la nouvelle économie classique trouve une limite majeure. L'hypothèse des marchés parfaitement compétitifs du cadre microfondé a tendance à atténuer les effets des perturbations externes sur l'économie. Dans les faits, les politiques conjoncturelles peuvent avoir un effet sur l'économie sur le court terme à cause de la présence dans les divers marchés de plusieurs rigidités nominales et réelles. Le cadre microfondé sans rigidités peine à vérifier de manière empirique certains faits stylisés observés dans différents marchés (Mankiw et Summers, 1986). C'est pourquoi, les modèles des nouveaux classiques furent affinés par les nouveaux keynésiens pour tenir compte de « déséquilibres » de court terme à travers l'introduction de rigidités pour amplifier l'effet des perturbations effectivement observées (Greenwald et Stiglitz, 1986).

3. La nouvelle économie keynésienne et ses implications pour l'énergie

L'héritage macroéconomique néo-keynésien invite à étudier l'influence du degré de rigidité¹³ des divers marchés composant l'économie sur la performance de court terme des instruments

¹² Ce concept s'ajoute à celui du *time-to-build* de Kydland et Prescott (1982) selon lequel l'investissement prend du temps à se transformer en capital effectivement productif.

¹³ Une économie est caractérisée sur le court terme par des rigidités dites nominales (Blanchard et Kiyotaki, 1987). Sur le marché des biens et services, les prix sont dits rigides s'ils s'ajustent lentement aux changements de la demande

conjuncturels de politique publique et de régulation en général, et leurs effets sur les cycles économiques. L'absence d'ajustement rapide des prix et des salaires sur le court terme va conduire à ce que la production et l'emploi fassent une partie de l'ajustement suite à un choc, s'écartant de leurs taux naturels. Par conséquent, la présence de rigidité des prix et des salaires sur les marchés justifie l'utilisation des politiques conjoncturelles pour stabiliser l'économie sur le court terme via leur effet sur la demande agrégée. Sur le court terme, les fluctuations de l'économie sont le fruit de la dynamique interne des marchés et les politiques conjoncturelles viennent améliorer le fonctionnement de l'économie. Tandis que sur le long terme, les fluctuations de l'économie sont le fruit de chocs exogènes, notamment d'offre et technologiques comme l'avance la nouvelle économie classique, et les mécanismes de marché vont réguler le fonctionnement de l'économie. C'est dans ce contexte, que les nouveaux keynésiens essayent de comprendre l'effet des chocs énergétiques sur les cycles économiques de court terme en présence de rigidités. Notamment, ils trouvent un effet plus important, attribué aux rigidités des prix, par rapport aux nouveaux classiques.

Tobin (1977) est un des premiers à avancer que les cycles économiques réels et les anticipations rationnelles ne peuvent expliquer à eux seuls les fluctuations observées dans une économie. Par ailleurs, Ball et al. (1988) montrent que les fluctuations de l'économie seraient le fruit des chocs sur le long terme (cadre de la nouvelle économie classique), mais aussi de rigidités nominales et réelles sur le court terme affectant la demande agrégée. La cause en est l'ajustement coûteux et non immédiat des prix et / ou des salaires. Pour ajouter les rigidités dans un modèle de type nouveau classique, les nouveaux keynésiens raisonnent dans un environnement à concurrence imparfaite (*cf.* Dixit et Stiglitz [1977], Hart [1982], Weitzman [1982], Stiglitz [1984], Rotemberg et Saloner [1987], et Hall [1988]). Les agents de l'économie vont créer eux-mêmes les rigidités par le biais de leur pouvoir de fixation des prix et des salaires. Les principales conclusions de ces théories sont : (i) les chocs de demande transitoires expliquent une grande partie des fluctuations de court terme (reflétant les rigidités dans l'économie), (ii) les chocs d'offre permanents dominant le moyen et le long terme, (iii) les perturbations de la demande ont un effet miroir sur l'output et le chômage, et (iv) une politique publique conjoncturelle crédible est la meilleure réponse aux fluctuations de l'économie et à la perte de bien-être engendrées par des frictions.

Certains macroéconomistes de l'énergie étudient l'influence des frictions de court terme sur l'effet des chocs énergétiques sur les cycles économiques. Par exemple, Mork et Hall (1980) fournissent une des premières études de la nouvelle économie keynésienne des chocs pétroliers. Ils concluent qu'un choc énergétique a de

agrégée. Sur le marché du travail, les rigidités nominales peuvent affecter directement le salaire réel. Les salaires réels sont rigides s'ils ne s'ajustent lentement au niveau général des prix actuel.

larges effets sur une économie, en lien avec les rigidités observées sur les prix et les salaires. Hamilton (1983) montre que les chocs énergétiques ont contribué à la performance macroéconomique des économies, même si le lien de causalité est encore à établir. Pindyck et Rotemberg (1984) et Marion et Svensson (1984) montrent l'effet des anticipations si l'économie est perturbée par des chocs de prix des énergies. Rotemberg et Woodford (1996) et Finn (2000) soulignent, à partir d'un modèle macroéconomique de type équilibre général dynamique et stochastique avec concurrence imparfaite, qu'une augmentation du prix de l'énergie agit comme un choc technologique négatif. Ils montrent que les effets agrégés du choc dépendent du poids de l'énergie dans les secteurs affectés et que l'étude des salaires réels dans l'explication des effets d'un choc énergétique est importante. Leduc et Sill (2004) préconisent, en réponse à des chocs énergétiques, l'utilisation des politiques conjoncturelles visant à stabiliser l'inflation. Wohltmann et Winkler [2008] mesurent les effets sur le bien-être d'une politique monétaire en présence de chocs anticipés du prix du baril d'une part et de chocs non-anticipés du prix du baril autre part. Ils concluent que les effets d'anticipation des chocs de prix du baril ont un effet relativement plus important sur le bien-être.

D'autres macroéconomistes de l'énergie étudient l'influence des frictions de court terme sur l'effet des politiques environnementales sur les fluctuations des économies. Annicchiarico et Di Dio (2015) étudient le comportement d'une économie face à une régulation environnementale¹⁴ sous environnement frictionnel¹⁵. Les auteurs soulignent que les sources de frictions sur le marché des biens et services, et dans une moindre mesure sur le marché du travail, doivent être introduites pour étudier correctement l'interaction entre les fluctuations macroéconomiques et la régulation environnementale¹⁶. Bretschger et Schaefer (2017) et Chan (2020) montrent que les effets d'anticipations sont importants pour l'étude des politiques environnementales. Notamment, Bretschger et Schaefer (2017) montrent que les effets d'anticipation et la crédibilité des signaux des politiques sont importants dans l'étude de la transition énergétique car ils diminuent les coûts des politiques et augmentent l'acceptabilité politique. Aubert et Chiroleu-Assouline (2019) étudient les effets d'une taxe environnementale redistribuée vers les ménages au moyen d'un allègement de l'impôt sur les revenus du travail. Et, Roach (2021) montre, en incorporant des frictions dans un modèle de type DSGE, que l'utilisation des transferts forfaitaires pour réduire les effets négatifs

¹⁴ Les auteurs proposent trois régimes : un plafond d'émissions, une taxe sur les émissions et un objectif d'intensité.

¹⁵ Les auteurs introduisent une rigidité nominale de prix à la Calvo et des coûts d'ajustement du capital.

¹⁶ Les principaux résultats sont les suivants : (i) un plafond d'émission peut freiner les fluctuations macroéconomiques causées par les chocs de productivité, mais aussi les chocs de politique monétaire et de dépenses publiques ; (ii) l'ajustement échelonné des prix vient altérer la performance de la politique environnementale ; et (iii) la réponse optimale d'une politique environnementale aux chocs est influencée par le degré auquel les prix s'ajustent et par la réaction de la politique monétaire (augmentation des taux d'intérêt notamment).

sur le bien-être des ménages d'une hausse de la taxation carbone est préférée à une diminution de la taxation sur les revenus du travail.

Au total, la théorie macroéconomique est suffisamment riche pour étudier des thématiques récentes comme la transition énergétique. En effet, la transition énergétique pose bon nombre de questions auxquelles la théorie peut répondre :

- Premièrement, la transition énergétique impose des investissements massifs dans les nouvelles technologies et un basculement vers une consommation d'énergie moins carbonée, si bien que l'évaluation de leur effet sur l'économie est d'une importance première. À cette fin, il faut pouvoir étudier les décisions individuelles d'investissement et de consommation, aussi bien du côté des industriels, que des ménages. Les deux écoles de pensée proposent un cadre théorique riche et microfondé permettant d'étudier les décisions microéconomiques et de retracer les mécanismes économiques sous-jacents.
- Deuxièmement, les politiques publiques jouent un rôle important dans l'incitation et la direction des investissements des agents privés. L'étude des politiques publiques et de leurs effets sur une économie est au cœur de la macroéconomie depuis les débuts de J.M. Keynes. Par ailleurs, les politiques publiques posent indubitablement des questions d'efficacité et de crédibilité à cause du cycle de vie long et de l'irréversibilité des investissements dans les technologies énergétiques. Le rôle joué par les anticipations est important quand l'on étudie de telles politiques et des projets à risques. La nouvelle économie classique s'est longuement penchée sur ce point.
- Troisièmement, le moteur de la transition énergétique est le changement technologique, notamment dans les technologies de production faiblement carbonées et les usages consommant plus efficacement de l'énergie. Les deux écoles de pensée proposent une étude des chocs technologiques.
- Quatrièmement, la nouvelle économie keynésienne propose une étude plus « court-termiste » de l'effet des politiques publiques, notamment de leur effet sur les cycles économiques. Tandis que la nouvelle économie classique propose une étude de la croissance sur le long terme. Si bien que l'approche de la nouvelle économie classique est préférée pour l'étude des effets macroéconomiques d'une politique structurelle, comme la transition énergétique, sur le long terme.

CHAPITRE 2. LES DIFFÉRENTES CLASSES DE MODÈLES EN ÉQUILIBRE GÉNÉRAL APPLICABLES A L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE

Dans la macroéconomie actuelle, autant d'éléments de la tradition classique que d'éléments keynésiens composent le cadre théorique le plus retenu par la littérature. La modélisation en équilibre général (Arrow et Debreu, 1954) est composée de trois classes de modèles, à savoir : l'équilibre général calculable (*Computable General Equilibrium*, CGE), l'équilibre général dynamique et stochastique (*Dynamic and Stochastic General Equilibrium*, DSGE) et les générations imbriquées (*Overlapping Generations*, OLG). L'origine de ces modèles regroupe les modèles de croissance exogène de Solow, Ramsey-Cass-Koopmans et Diamond, la critique de Lucas et l'équilibre général néoclassique. Chaque modèle peut intégrer ou non des frictions, se rangeant du côté des néoclassiques (sans frictions) ou du côté des keynésiens (en présence de frictions).

Les différents modèles en macroéconomie diffèrent principalement selon quatre critères :

- **Détail technologique** : il dépend directement du niveau d'agrégation des modèles et de la modélisation du progrès technique. La désagrégation des secteurs de l'économie dans un modèle est particulièrement importante lorsqu'on veut étudier le changement structurel de l'économie induit par le changement technologique ;
- **Dynamique vs statique** : le caractère dynamique des modèles (DSGE, OLG, modèles hybrides et macroéconométrie) est important lorsqu'on veut étudier les moteurs de croissance et les sources de fluctuations d'une économie. Les modèles statiques (CGE), eux, ne fournissent des simulations des variables qu'à un point donné du temps. La modélisation dynamique cherche à étudier le processus de décision intertemporel des agents économiques sur des variables temporelles (production, investissements, consommation etc.) et les phénomènes de transition ;
- **Stochastique vs déterministe** : l'incertitude est caractérisée par les chocs qui perturbent une économie. Les chocs peuvent aussi être déterministes, mais dans ce cas, ils sont dénués d'incertitude pour les agents de l'économie. Certains modèles (DSGE et modèles hybrides) intègrent directement la stochasticité de ces chocs dans la modélisation du comportement et des anticipations des agents augmentée d'un processus de génération aléatoire. D'autres ne prennent pas en compte, ou que partiellement, l'incertitude pesant sur certaines variables de l'économie (CGE et OLG) et ne se contentent que de construire divers scénarios. La

modélisation de l'incertitude permet de dégager une stratégie unique et optimale parmi les scénarios ;

- **Horizon temporel** : les modèles sont voués à des simulations de court-moyen terme (macroéconométrie moderne), de moyen-long terme (CGE, DSGE et modèles hybrides), de long terme (OLG et modèles hybrides) et enfin de très long terme (IAM et OLG). Le choix du modèle dépendra de l'horizon d'étude.

L'objet de ce chapitre est de donner un aperçu global des différents modèles et sur leur utilisation en économie de l'énergie. Le chapitre revient au préalable et succinctement sur les avantages et les limites d'une modélisation en équilibre général. Puis, chacun des trois modèles évoqués est analysé au regard de ses intérêts et de ses limites pour le modélisateur confronté à la question concrète qu'il doit étudier.

1. Avantages et limites principaux des modèles en équilibre général

Le but principal des modèles en équilibre général est d'expliquer les mouvements conjoints de plusieurs agrégats macroéconomiques sur plusieurs marchés de l'économie. La force des modèles en équilibre général vient de la capacité à élucider de façon prospective le caractère et la magnitude des effets économiques des politiques économiques (Wing, 2004) grâce à une approche théoriquement fondée et à portée empirique. Les modèles en équilibre général sont dotés d'une fondation microéconomique solide et cohérente. Leur fondation théorique permet de retracer les canaux de transmissions des politiques dans une économie. Aussi, la fondation microéconomique du comportement des agents permet d'étudier en profondeur l'effet des politiques sur les décisions des agents.

Par ailleurs, les modèles à équilibre général peuvent intégrer soit une (des) tendance(s) de croissance de manière exogène ou une (des) tendance(s) de croissance endogène. Un modèle à croissance endogène permet notamment d'étudier de manière endogène le progrès technique dans un modèle, néanmoins à un coût computationnel relativement plus élevé et seulement dans le cas des modèles CGE et DSGE. Pour les modèles à changement technologique endogène, voir notamment les travaux de Daron Acemoglu. Pour les modèles à progrès technique endogène sur les thématiques environnementales, se référer aux références de la section 2.1 du chapitre 1.

En revanche, les modèles en équilibre général possèdent deux inconvénients majeurs, dont :

- (i) Des hypothèses simplifiées, restrictives et toujours plus ou moins discutables, dont les marchés complets, l'efficacité des marchés à long terme et l'environnement en concurrence

pure et parfaite. Ces restrictions conduisent notamment à un relatif manque de détail technologique (Borges, 1986) ;¹⁷

- (ii) L'hypothèse des anticipations rationnelles est certes une hypothèse standard en économie, mais elle est toujours discutable (*cf.* pour une discussion De Grauwe [2010], et Dixon et Jorgenson [2013]). Certains économistes (*cf.* North [1990], Balke et al. [2012], et Liu et Phaneuf [2013]) reprennent la *Social Cognitive Theory* de Bandura (1989) et avancent que les agents sont en apprentissage constant et seraient guidés par des processus cognitifs passés.

L'équilibre général représente l'édifice des modèles macroéconomiques de nos jours. Les sections suivantes synthétise les spécificités des modèles macroéconomiques qui utilisent le cadre de l'équilibre général, leurs avantages et leurs inconvénients. Tout d'abord, les deux premières sections se focalisent sur les modèles à agents représentatifs¹⁸, à savoir l'équilibre général calculable et l'équilibre général dynamique et stochastique. La troisième section étudie les modèles à agents hétérogènes, spécifiquement l'équilibre général à générations imbriquées.

2. L'équilibre général calculable (CGE – *computable general equilibrium*)

Les modèles d'équilibre général calculable se développent initialement pour étudier les politiques de libéralisation commerciale des années 1970 (*cf.* Johansen [1960], Evans [1971], Hudson et Jorgenson [1974], Taylor et Black [1974], Adelman et Robinson [1978], Taylor et al. [1980], Jorgenson et Yun [1986], Shoven et Whalley [1992], et Doroodian, Boyd et Piracha [1994]). De manière générale, les économistes utilisent les modèles CGE dans le but d'évaluer les effets des politiques structurelles et des chocs économiques/technologiques sur l'économie grâce à leur degré de désagrégation relativement plus élevé par rapport aux DSGE et aux OLG.

Hudson et Jorgenson (1974) furent le premier à avoir développé un CGE pour étudier l'effet des politiques énergétiques et des changements des prix des énergies sur la croissance américaine. De là, nombre d'économistes ont décliné ce type de modèle pour étudier diverses questions énergétiques et environnementales (*cf.* Goulder et Schneider [1999], Gerlagh et der Zwaan [2003], Böhringer et Löschel [2006], Laitner et Hanson [2006], Schäfer et Jacoby [2006], Labandeira, Labeaga et Rodriguez [2009], Eboli, Parrado et Roson [2010], Bosello, Eboli et Pierfederici [2012],

¹⁷ Il faut noter que construire des modèles sur la base d'hypothèses reflétant toujours la réalité est fort complexe. C'est tout l'objet de la recherche économique contemporaine. Notamment, deux nouvelles synthèses classico-keynésienne sont en train de se former depuis le début des années 2000 : (i) l'économie comportementale et (ii) l'étude de la coordination des comportements via la théorie des jeux.

¹⁸ Ces modèles consistent à modéliser mathématiquement les comportements des différents agents composants l'économie ; notamment les ménages, les secteurs d'activités et les autorités publiques. Les agents sont agrégés en un agent unique par catégorie, dit agent représentatif. L'agent représentatif fait des choix optimaux sur sa période de vie. L'hypothèse de l'agent représentatif découle directement de deux éléments : l'hypothèse de rationalité et le théorème de Gorman.

Bohringer et Rutherford [2013], Bohringer et Muller [2014], Lennox et Parrado [2015], Faehn et Isaksen [2016], et Liu, Wei et Park [2019]). Au sein des organisations internationales, la Commission Européenne a développé le modèle multirégional GEM-E3 (*cf.* Capros et al. [2013]) sur la base d'un équilibre général calculable pour étudier les politiques énergétiques et environnementales.

2.1. Spécificités du modèle CGE

Johansen (1960), économiste à l'origine du modèle, souhaitait inscrire dans une description générale de l'économie norvégienne une désagrégation sectorielle à partir d'un tableau de type *input-output* à la Leontief en distinguant 22 industries. À cette fin, il identifie les comportements optimisateurs des agents privés, notamment les comportements d'investissement et de production des industries d'une part, et les comportements de consommation des ménages d'autre part.

Les CGE identifient de manière statique le passage d'un équilibre à un autre et se contentent de décrire ce nouvel équilibre sans étudier la transition jusqu'au nouvel équilibre (*cf.* Borges [1986], Kehoe et Kehoe [1994], Bhattacharyya [1996], Böhringer [2004], Wing [2004], et Dixon et Jorgenson [2013]).

Les CGE modélisent finement le cadre comptable en incluant à une matrice *input-output* à la Leontief¹⁹ ou à une matrice de comptabilité sociale²⁰ des équations de comportement des agents, comme par exemple les équations de demande des facteurs de production. Le modèle *input-output* à la Leontief permet de retracer la manière dont les biens et services sont produits ou consommés dans une économie, et il permet de retracer la création et la distribution des revenus entre les agents économiques. Les interactions entre agents sont vues comme un flux circulaire de dépenses et de revenus.

2.2. Caractéristiques

Les CGE représentent de manière désagrégée l'économie dans un cadre macroéconomique, ce qui permet d'étudier les effets des politiques structurelles sur les divers secteurs et agents qui composent une économie. Représenter l'économie de manière désagrégée permet d'analyser les

¹⁹ Le modèle prend la forme d'une matrice *input-output* qui tient compte de l'interdépendance entre tous les secteurs d'une l'économie.

²⁰ La matrice de comptabilité sociale représente les comptes du système économique sous forme matricielle, via une représentation des transactions dans l'économie.

changements (structurels) dans la composition de l'output²¹ et donc de retenir un plus large éventail d'effets économiques, à différents niveaux de désagrégation (*cf.* Horschig et Thrän [2017]).

Les CGE ne traitent les effets de long terme que de manière statique, ce qui omet l'étude des processus d'ajustement et de transition (*cf.* Borges [1986]). Les résultats du modèle sont simulés comme si l'économie s'ajustait de manière immédiate à un changement exogène, ce qui pose un problème pour les politiques de transition.

Malgré un niveau de désagrégation élevé, les modèles CGE manquent d'analyse de la technologie contrairement aux modèles en équilibre partiel. Les variables reflétant les politiques dans les modèles CGE prennent la forme de variables exogènes et sont basés sur des mécanismes de prix (par ex. une taxe carbone) ou de quantités (par ex. des quotas). De ce fait, il est compliqué d'étudier l'effet d'une politique orientée technologie, comme la transition énergétique, sauf si l'on intègre au modèle un changement technologique endogène. Et, ces modèles n'expliquent pas comment les technologies énergétiques et les coûts associés évoluent à l'avenir (*cf.* Bohringer et Löschel [2006]). La consommation (via les possibilités de substitution) est la seule réponse des agents privés aux chocs, alors qu'introduire le progrès technique de manière plus détaillée offrirait une possibilité de réponse supplémentaire aux politiques et aux chocs.

3. Synergie néoclassique et keynésienne : l'Équilibre Général Dynamique et Stochastique

Les DSGE émergent suite aux critiques des nouveaux classiques sur la faible capacité des modèles économiques traditionnels à étudier les chocs et les politiques publiques. Les économistes ont cherché à développer un modèle qui puisse mesurer et prédire les effets des chocs pétroliers, des politiques monétaires et des politiques fiscales.

Les DSGE se scindent en deux familles, selon l'école de pensée : les DSGE issus de la théorie des cycles réels (RBC) liée à la *nouvelle économie classique* et les NK-DSGE issue de la *nouvelle économie keynésienne*. Les premiers inscrivent les DSGE dans un cadre néoclassique (*cf.* Kydland et Prescott [1982], et King et Plosser [1983]), et les seconds inscrivent les DSGE dans un cadre keynésien (*cf.* Goodfriend et King [1997], et Rotemberg et Woodford [1997]).

Les organisations internationales privilégient les modèles DSGE (*cf.* annexe 1.A) pour étudier les effets macroéconomiques des politiques publiques à horizon 10-25 ans. La cause en est attribuée à la capacité des DSGE à formuler une histoire structurante et cohérente à partir d'enchaînements microfondés. Par ailleurs, les DSGE issus du nouveau keynésianisme ont des performances

²¹ Par exemple, le transfert des ressources des secteurs déclinants aux secteurs en expansion, le changement des prix relatifs des facteurs de production, ou encore les effets distributionnels d'une politique.

empiriques similaires aux modèles issus de la théorie économétrique contemporaine, voire meilleure s'ils sont augmentés d'une approche bayésienne pour l'estimation des paramètres (*cf.* Clarida, Galí et Gertler [2000], et Smets et Wouters [2003]). Dans le cas d'un DSGE, la méthode bayésienne permet de traiter plus en profondeur l'analyse des politiques sous incertitude avec un modèle probabiliste (*cf.* Clarida, Galí et Gertler [2000], et Fernandez-Villaverde, Rubio-Ramírez et Schorfheide [2016]).

3.1. Spécificités des modèles DSGE

Les modèles DSGE peuvent se distinguer selon le court-moyen terme et le moyen-long terme. Les premiers DSGE, issus de la théorie des cycles réels, cherchent à étudier les cycles économiques de manière dynamique en affectant l'économie de chocs exogènes stochastiques sur la base du modèle de Ramsey-Cass-Koopmans. Dans les modèles, les cycles représentent la réponse optimale d'une économie à un choc grâce à la modélisation microéconomique des décisions individuelles des agents. Et, les DSGE de type 'modèle de croissance' étudient les phénomènes de croissance sur le long terme sur la base du modèle de Solow. La modélisation est pratiquement la même que les DSGE de court-moyen terme à une différence près : l'ajout de tendances de croissance exogène ou endogène.

Les DSGE sont un affinement des modèles CGE augmenté d'une dimension dynamique et stochastique. Ces modèles sont dynamiques dans le sens où ils se focalisent sur le profil temporel des variables et résolvent de manière intertemporelle le modèle sur toute la trajectoire étudiée. Ces modèles sont stochastiques dans le sens où des chocs exogènes et aléatoires sont intégrés, à partir d'une description du processus aléatoire²², pour analyser la réponse de l'économie à ces derniers. Il existe aussi des modèles à équilibre général dynamique et « déterministe » qui perturbent l'économie de chocs déterministes.

3.1.1. La structure du modèle

Les modèles DSGE sont structurés en trois blocs : (i) les agents privés de l'économie, (ii) l'équilibre intertemporel, et (iii) les chocs exogènes qui produisent la dynamique du modèle. Les chocs vont venir perturber les équations comportementales des agents et ainsi l'équilibre initial de l'économie. À partir de la date du choc, l'économie s'éloigne de son équilibre sur la phase de transition pour le rejoindre sur le long terme, voire pour joindre un nouvel équilibre si le choc est permanent. Dès lors, une dynamique de transition s'amorce, guidée par les comportements d'ajustement des agents.

²² Typiquement, un processus aléatoire de Wiener.

L'idée est de résoudre le modèle pour un état stationnaire donné (c.à.d. sa tendance de long terme), puis de l'approximer au voisinage de cet état stationnaire dans le but d'observer les déviations de l'économie par rapport à sa tendance de long terme. Les déviations de l'économie sont observées à partir de fonctions de réponse obtenues par la simulation du modèle qui représentent les propriétés dynamiques de l'économie. Les fonctions de réponse vont isoler l'effet d'un choc spécifique dans l'économie et vont ainsi représenter les réponses intertemporelles des agents économiques aux chocs. On y observe la **transition** des variables économiques endogènes du modèle de la date du choc jusqu'à leur tendance de long terme.

3.1.2. L'équilibre général dynamique et stochastique comme outil de modélisation des problématiques énergétiques et environnementales

De nombreuses études utilisent les modèles DSGE pour étudier le rôle des chocs énergétiques dans l'explication des fluctuations de l'économie. Mork et Hall (1980) fournissent une des premières études de la nouvelle économie keynésienne des chocs pétroliers. Ils concluent qu'un choc de prix des énergies a de larges effets sur une économie, en lien avec les rigidités observées sur les prix et les salaires. Kim et Loungani (1992) montrent que l'introduction d'un choc de prix énergétique réduit la dépendance aux chocs technologiques des fluctuations d'une économie observée dans les modèles DSGE. Rotemberg et Woodford (1996) modifient le modèle de Kim et Loungani (1992) en introduisant de la concurrence imparfaite pour expliquer les effets négatifs d'un choc de prix énergétique sur l'output et les salaires réels. Ils montrent que les effets agrégés du choc dépendent du poids de l'énergie dans les secteurs affectés, et que l'étude des salaires réels dans l'explication des effets d'un choc énergétique est importante.

Dans les années 2000, Finn (2000) explique l'effet significatif d'un choc de prix énergétique sur l'économie malgré la faible part de l'énergie dans le PIB. Notamment, il met en avant qu'un choc de prix de l'énergie agit comme un choc technologique négatif. Leduc et Sill (2004) identifient le rôle significatif joué par les règles des politiques monétaires dans l'effet des chocs des prix énergétiques. En revanche, Carlstrom et Fuerst (2006) concluent que la volatilité du PIB est associée principalement aux chocs de prix du pétrole. Ainsi, la politique monétaire mise en place dans les années 1970 n'a joué aucun rôle. Blanchard et Galí (2007) comparent l'effet des chocs du prix du pétrole des années 1970 à ceux des années 1990. Ils expliquent que les événements ont coïncidé à des chocs larges de nature différentes durant les deux périodes (augmentation des prix des commodités pour les années 1970, et croissance de la productivité et augmentation de la demande dans 1990-2000s). Par ailleurs, ils avancent qu'une tendance vers un marché du travail plus flexible peut expliquer l'effet plus faible des chocs pétroles dans les années 2000s, et que les

changements dans la manière dont les politiques monétaires sont conduites peuvent être responsables des différences de réponses aux chocs de prix du pétrole²³. Dhawan et Jeske (2008) montrent que les pics de prix de l'énergie sont absorbés par les ménages par une diminution de l'investissement dans les biens durables plutôt qu'une diminution dans l'investissement des biens de capital, ce qui diminue le rôle joué par un choc énergétique dans l'explication des fluctuations d'une économie.

Plus récemment, Nakov et Pescatori (2010) montrent que la période de « Grande Modération » qu'ont connue les États-Unis est pour un tiers due à une dépendance plus faible de l'économie américaine au pétrole. L'effet des chocs pétroliers sur une économie sont relativement moins importants de nos jours que dans les années 1970. Baskaya, Hulagu et Kuçuk (2013) montrent que l'effet de la volatilité du prix du pétrole sur une économie importatrice passe par deux canaux : (i) le coût marginal du capital augmente et les agents substituent le capital ; et (ii) la demande pour l'épargne augmente. Et, Balke et Brown (2018) étudient les chocs énergétiques en intégrant le pétrole comme un facteur de production à part entière dans le modèle et un secteur de production de pétrole de schiste. Ils trouvent une élasticité du PIB réel aux chocs de prix du pétrole faible.

D'autres économistes utilisent les DSGE pour étudier l'effet des politiques énergétiques sur une économie. Atkeson et Kehoe (1999) perturbent l'économie d'une augmentation permanente de la taxe sur l'énergie en utilisant deux types de technologie : l'une *putty-putty* et l'autre *putty-clay*²⁴. Quelle que soit la technologie, l'utilisation de l'énergie répond sur le long terme à un changement permanent des prix de l'énergie via un ajustement du capital. Les auteurs montrent que les modèles *putty-clay* sont plus performant que les modèles *putty-putty* augmentés de coûts d'ajustement du capital pour décrire la réponse de l'investissement et de l'output aux chocs énergétiques. Acemoglu et al. (2012) montrent que, lorsque les facteurs de production sobres en carbone et les facteurs de production non-sobres en carbone sont substituables, une croissance durable peut être atteinte grâce à un dosage entre des taxes pour contrôler les émissions (*demand-pull*) et des subventions temporaires pour rediriger l'innovation vers les facteurs de production sobres en carbone (*technology-push*). Atalla, Blazquez, Hunt et Manzano (2017) expliquent les

²³ Particulièrement, l'engagement fort de la Banque Centrale à maintenir un taux d'inflation faible et stable, pourrait avoir conduit à une amélioration du compromis politique qui rendrait possible d'avoir un effet plus faible d'une augmentation des prix du pétrole sur l'inflation et l'output.

²⁴ Un modèle *putty-clay* suppose une complémentarité entre les facteurs de production sur le court terme, mais une substituabilité sur le long terme. Tandis qu'un modèle *putty-putty* à la Pindyck et Rotemberg (1983) présume une complémentarité entre les facteurs de production quel que soit l'horizon temporel. Dans le dernier modèle, l'utilisation de l'énergie répond sur le long terme uniquement si le stock de capital change. Tandis que dans le premier, l'utilisation de l'énergie s'ajuste sur le long terme au changement de prix vu que le ratio capital/énergie change. En effet, les agents vont investir dans de nouvelles technologies à basse consommation d'énergie.

différences d'évolution du mix énergétique aux États-Unis et en Europe de 1980 à 2014. Aux États-Unis, les prix relatifs des énergies fossiles dominent la détermination du mix énergétique. En Europe, les politiques énergétiques, les aspects environnementaux et sociaux conduisent le façonnement du mix. Par ailleurs, les auteurs montrent qu'en Europe, les chocs de gaz naturel pourraient devenir tout aussi importants que les chocs de pétrole, au vu de leur part croissante dans le mix énergétique. Blazquez, Hunt et Manzano (2017) étudient l'effet macroéconomique du développement des énergies renouvelables et de la diminution des subventions à l'énergie en Arabie Saoudite. Ils trouvent un effet positif sur les PIB et le bien-être des ménages sur le long terme selon le coût d'intégration et le taux d'intégration des énergies renouvelables. Argentiero et al. (2018) comparent sur la zone euro le rapport coût-efficacité des mesures visant à encourager le processus de mise sur le marché des technologies bas-carbone (*demand-pull*, basé sur une subvention) et le processus d'accélération du développement des technologies bas-carbone (*technology push*). La parité des énergies renouvelables arrive plus tôt sous la mesure *technology-push*. Par ailleurs, la subvention au capital de connaissance et la taxe carbone sont nécessaires pour atténuer la réduction de la pénétration des énergies renouvelables dans le cadre d'un choc technologique (positif) dans le secteur des combustibles fossile, et pour augmenter la pénétration des énergies renouvelables si le choc technologique affecte le secteur des énergies renouvelables.

Enfin, d'autres auteurs utilisent les DSGE pour étudier l'effet de la régulation environnementale. Fischer et Springborn (2011) montrent que la mise en place d'un plafond sur les émissions de gaz à effet de serre atténue la volatilité de l'emploi, des investissements et de l'output en réponse à un choc de productivité. Tandis qu'une taxe sur les émissions de CO₂ induit beaucoup plus de volatilité. Heutel (2012) identifie la politique environnementale optimale en réponse à un choc de productivité. L'auteur trouve que l'instrument prix (taxation des émissions) et l'instrument quantité (quota sur les émissions) doivent répondre de manière procyclique à l'environnement économique. Golosov, Hassler et Tsyvinski (2014) montrent que la trajectoire d'inaction dans l'effort de diminution de la part du charbon dans le mix énergétique est particulièrement sensible au regard de l'hypothèse de substituabilité des différentes sources d'énergie et du changement technologique. Aussi, la formule de la taxe optimale dépend de l'élasticité de substitution entre énergies²⁵. Annicchiarico et Di Dio (2015) étudient la réponse de l'économie à la régulation environnementale. Notamment, trois outils sont étudiés : le *cap-and-trade*, la taxation carbone et l'objectif d'intensité des émissions. Ils trouvent que (i) un plafond d'émission freine les fluctuations macroéconomiques en réponse aux chocs, et ce particulièrement en présence

²⁵ Si elle est élevée, alors ne pas taxer le charbon impliquerait une utilisation croissante du charbon et des coûts d'inaction élevés.

de rigidité des prix, (ii) la rigidité des prix vient altérer la performance de la politique environnementale et les variables macroéconomiques sont plus volatiles en réponse à un choc, (iii) la réponse optimale d'une politique environnementale à un choc est influencée par le degré auquel les prix s'ajustent et par la réaction de la politique monétaire, et (iv) le régime *cap-and-trade* agit comme un stabilisateur de l'économie. Dissou et Karnizova (2016) reprennent les travaux de Weitzman (1994) sur l'effet des instruments de prix et de quantité qui sont disponibles aux décideurs politiques. Comme chez Annicchiarico et Di Dio (2015), les auteurs montrent que le régime *cap-and-trade* génère une volatilité relativement plus faible des variables réelles par rapport au régime de taxation, mais ce dernier est préférable en termes de bien-être. Enfin, Bretschger et Schaefer (2017) montrent que l'utilisation simultanée des taxes et des subventions est importante pour le succès de la transition énergétique. En outre, ils soulignent que les effets anticipation sont importants dans l'étude de la transition énergétique car ils diminuent les coûts des politiques et augmentent l'acceptabilité politique. Sous certaines conditions, la transition énergétique peut enclencher une croissance menée par les anticipations et diminuer les coûts de la transformation des systèmes énergétiques.

3.2. Caractéristiques

Une des forces majeures de ces modèles est qu'ils sont dotés d'une cohérence empirique et théorique robuste (*cf.* Fernandez-Villaverde, Rubio-Ramírez et Schorfheide [2016]) grâce au cadre microfondé et à l'introduction des anticipations rationnelles que fournit la nouvelle économie classique. Ils permettent d'analyser quantitativement les liens entre la politique étudiée, les anticipations des agents et les résultats économiques (*cf.* Sbordone et al., 2010). Grâce au cadre microfondé, les modèles DSGE donnent une interprétation économique claire des mécanismes sous-jacents. Par exemple, le cadre permet de microfonder les décisions de consommation en énergie des agents et les décisions d'investissement dans les technologies bas-carbone. Cette cohérence empirique est d'autant plus importante que la thèse étudie une phase de transition (énergétique) entre deux points du temps, aujourd'hui et 2035.

Par construction, ces modèles sont dynamiques. Le caractère dynamique du modèle est important pour étudier les mécanismes de transmission du changement technologique (*cf.* Di Comite et Kancs, 2015), les phénomènes de transition et le caractère dynamique des investissements. Les investissements et le changement technologique jouent un rôle décisif pour la croissance de la productivité (*cf.* Griliches, 1973).

L'intégration des chocs, de manière stochastique ou déterministe, permet notamment à un modèle étudiant la transition énergétique d'étudier l'effet des chocs d'investissement, des efforts dans

l'efficacité énergétique, de la politique de transformation du mix électrique, de la politique fiscale et des chocs des prix des énergies. En somme, cela permet à un modélisateur d'établir plusieurs scénarios macroéconomiques en fonction d'un dosage différent d'une politique économique.

De par leur structure microéconomique, les modèles DSGE permettent l'analyse des changements structurels dans l'économie, cependant dans une moindre mesure que les CGE. L'analyse structurelle est importante car la transition énergétique enclenche indubitablement un changement structurel de l'économie ; notamment la baisse de l'activité dans certains secteurs de l'économie, comme les combustibles fossiles, et l'électrification de masse de l'économie grâce aux transferts d'usage vers des usages électriques.

De plus, ces modèles peuvent être estimés à partir d'outils économétriques de type VAR²⁶ ou SVAR. Cela permet d'évaluer quantitativement les effets des politiques sur des variables macroéconomiques sur divers horizons temporels ; court, moyen et long terme (Colander et al., 2008) ; grâce une base empirique solide. Néanmoins, les outils d'estimation économétriques sont principalement utilisés pour leur qualité d'estimation et de prévision des variables macroéconomiques et des effets des politiques conjoncturelles sur le court-moyen terme. La cause en est attribuée à la difficulté des modèles à prospecter le futur au-delà d'une dizaine d'années (Cambridge Econometrics, 2014).

Une des critiques des modèles DSGE demeure leur manque d'analyse de la technologie. Les DSGE sont des modèles plus agrégés comparativement aux modèles d'équilibre général calculable (Dixon et Jorgenson, 2013). Par ailleurs, au même titre que les CGE, les variables reflétant les politiques économiques dans les modèles DSGE sont basées sur des mécanismes de prix ou de volume. De ce fait, étudier l'effet d'une politique orientée technologie, comme la transition énergétique, est plus complexe dans ce contexte, sauf si l'on intègre au modèle un changement technologique endogène. Enfin, au même titre que les CGE, un autre inconvénient vient de l'hypothèse selon laquelle il

²⁶ Le processus VAR est beaucoup utilisé parmi les économistes de l'énergie, notamment pour étudier l'effet des chocs pétroliers sur les fluctuations des cycles économiques des années 1970 et 1980. Burbidge et Harrison (1984), Hamilton (1983 et 1996), Lee, Ni et Ratti (1996), Darrat, Giley et Meyer (1996), Bernanke, Gertler et Gilchrist (1997), Hooker (2002), Hamilton et Herrera (2004), Blinder et Rudd (2008), Kilian et Lewis (2011), et Hou, Mountain et Wu (2016) étudient l'effet des chocs des prix du pétrole sur l'économie et le rôle joué par les politiques macroéconomiques de stabilisation (notamment la politique monétaire). Par ailleurs Loungani (1986), Hamilton (1983) et Davis (1985) montrent l'effet des chocs des prix énergétiques sur la réallocation du capital et du travail dans les secteurs d'activité. Kilian (2009), Alquist et Kilian (2010) et Kilian et Murphy (2014) étudient l'effet des chocs de demande de pétrole et le rôle des anticipations sur les fluctuations du prix du pétrole. Et, Metcalf et Stock (2020) estiment, pour les pays européens, les effets agrégés sur la croissance et l'emploi de la mise en place d'une taxe carbone.

existe un agent représentatif dans l'économie (*cf.* Dixon et Jorgenson, 2013). Les modèles à agent représentatif, au sens strict, ne se contentent que d'étudier les effets intragénérationnels. Cette supposition rend difficile l'étude locale des interactions entre ces derniers (par exemple, des effets de redistribution intergénérationnelle). Il est possible d'intégrer de l'hétérogénéité cependant à un coût de calcul élevé. L'hétérogénéité est notamment introduite par les modèles à générations imbriquées.

4. Les modèles à Générations Imbriquées (Overlapping Generation Models - OLG)

Les premiers économistes à la fondation des futurs modèles à générations imbriquées sont Maurice Allais (1947) et Paul Samuelson (1958). Les deux auteurs se penchent sur le lien entre démographie et transfert intergénérationnel des revenus. Plus particulièrement, ils étudient le poids de la future retraite des *baby-boomers* sur le système de sécurité sociale. Pour ce faire, ils ont développé des modèles intégrant les décisions de consommation et d'épargne des agents avant et après le départ en retraite. Peter Diamond (1965) est celui qui a popularisé les modèles à générations imbriquées. Auerbach et Kotlikoff (1987) marquent l'application de ce type de modélisation aux problèmes économiques concrets sur données réelles.

Ce n'est qu'à partir des années 1990 que les économistes ont commencé à élargir le domaine d'application des modèles à génération imbriquées à l'énergie et l'environnement (*cf.* John et Pecchenino [1994], John et al. [1995], Michel et Venditti [1997], Olson et Knapp [1997], Howarth [1998], Bovenberg et Heijdra [1998], Marsiliani et Renstrom [2000], Nakabayashi [2010], Carbone et al. [2013], Chiroleu-Assouline et Fodha [2014], Gonand et Jouvét [2015], et Gonand, Hasanov et Hunt [2019]). Les économistes utilisent le modèle pour ne pas restreindre l'analyse des effets de redistribution de la fiscalité environnementale aux effets intragénérationnels. Par exemple, sur la France, Chiroleu-Assouline et Fodha (2014) étudient les effets distributifs d'une taxe progressive et d'une taxe régressive environnementale. Et, Gonand, Hasanov et Hunt [2019] étudient l'effet sur le bien-être intergénérationnel de la réforme sur le prix de détail des énergies en Arabie Saoudite.

4.1. Spécificités du modèle OLG

Les modèles à générations imbriquées sont des modèles microfondés en équilibre général qui prennent en compte les effets de redistribution intergénérationnelle. Ces modèles diffèrent des modèles dits à agent représentatif dans le sens où l'interaction entre les différentes générations est prise en compte.

Ces modèles capturent les effets intergénérationnels des politiques en simulant le comportement de différents groupes, hétérogènes, d'âge différent. Par conséquent, ces modèles captent le

changement de comportement des agents sur différentes phases de leur vie. En outre, ils permettent d'étudier la phase de transition vers l'équilibre de long terme en étudiant l'effet des politiques sur l'allocation des ressources intra-générationnelle et la distribution des ressources intergénérationnelle. Les externalités intergénérationnelles sont prises en compte en formulant des politiques environnementales. Typiquement, les coûts de ces politiques sont comparés aux bénéfices pour les générations présentes et les générations futures.

4.2. Caractéristiques

Les modèles étudient l'évolution des agrégats économiques sur le long voire très long terme. Auerbach et Kotlikoff (1987) avancent que l'aspect dynamique des modèles à générations imbriquées est une de ses principales forces. La cause en est attribuée à la capacité des modèles à peser les bénéfices et les pertes sur le temps des politiques étudiées et d'évaluer l'efficacité économique de politiques alternatives. L'aspect du cycle de vie du comportement des agents est comptabilisé grâce à l'introduction de l'hétérogénéité des agents. La prise en compte de différentes générations permet d'étudier l'effet des politiques et les effets de redistribution intergénérationnelle sur le long terme, voire très long terme. Les questions relatives aux distributions des revenus et de la richesse entre les générations peuvent être alors étudiées, par exemple, une question qui revient souvent dans la littérature : comment les investissements en capital et en protection environnementale, entrepris par les générations présentes, affectent les générations futures ?

Il existe plusieurs inconvénients à ce type de modélisation. D'abord, les modèles évitent souvent d'intégrer de la stochasticité par souci computationnel. Cela limite l'étude du caractère incertain des politiques et des chocs. Ensuite, comme les modèles DSGE, les modèles à générations imbriquées peinent à représenter le changement technologique et étudier les politiques de soutien aux technologies. En effet, les modèles à génération imbriquées sont des modèles complexes où l'endogénéisation du progrès technique est faisable théoriquement mais infaisable empiriquement. Par ailleurs, Gonand, Hasanov et Hunt (2019) soulignent que les modèles à générations imbriquées ne sont pas toujours les bons modèles pour observer les cycles économiques et l'influence des chocs macroéconomiques sur une économie. En effet, les modèles à générations imbriquées cherchent à reproduire une trajectoire de croissance potentielle²⁷ car ils étudient un temps long.

Les modèles présentés ci-avant constituent le socle de la modélisation macroéconomique contemporaine. Au-delà des quatre critères énoncés dans l'introduction du chapitre 2, les modèles strictement en équilibre général soulèvent quatre inconvénients majeurs : (i) le relatif manque de

²⁷ La croissance potentielle est la croissance corrigée des cycles économiques.

détail technologique, (ii) l'étude partielle des changements structurels, (iii) la difficulté à étudier les politiques orientées technologie, et dans une moindre mesure (iv) la faiblesse de la robustesse empirique par rapport aux modèles économétriques. En fonction de la question à analyser par le modélisateur, les inconvénients peuvent amener à utiliser d'autres modèles qui affinent les trois modèles précédemment exposés : les modèles hybrides, les modèles à évaluation intégrée et les modèles macroéconométriques. Le chapitre 3 propose une explication synthétique de ces modèles.

CHAPITRE 3. L'IMBRICATION DES MODÈLES SCIENTIFIQUES DANS LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

L'objet de ce chapitre est de dépasser le cadre de modélisation du chapitre 2 pour pallier les quatre inconvénients que posent les modèles macroéconomiques basés uniquement sur l'équilibre général. Il existe trois autres types de modèles macroéconomiques : les modèles hybrides et les modèles scientifiques *Integrated Assessment Models* (IAM). Le chapitre se divise en deux sections. La première étudie les modèles hybrides. Et la seconde étudie les modèles IAM.

1. Les modèles hybrides

Selon Bataille et al. (2006) et Hourcade et al. (2006), les modèles hybrides sont nés suite à deux discussions : (i) le dilemme entre choisir une approche *top-down* (les modèles en équilibre général) ou *bottom-up* (les modèles en équilibre partiel) pour évaluer les politiques influençant les choix technologiques, et (ii) les discussions de méthodologie de modélisation des années 1990 portant sur l'efficacité et le coût des politiques orientées technologies, comme la transition bas-carbone. La modélisation hybride combine un modèle *bottom-up* et un modèle *top-down*. La partie *bottom-up* du modèle hybride va détailler le processus technologique du secteur étudié à partir d'un équilibre partiel. Le modèle étudie comment les technologies et les coûts du secteur évoluent à l'avenir. Tandis que la partie *top-down* du modèle se penche sur les divers bouclages macroéconomiques que peuvent causer les politiques publiques dans le secteur.

Plusieurs équipes d'économistes ont développé de large modèles hybrides nationaux ou multirégionaux, parfois à destination de grand organismes institutionnels, pour étudier l'interaction entre les systèmes techniques énergétiques, les politiques environnementales et l'économie (*cf.* Bernard et Vielle [1998]²⁸ ; Rivers et Jaccard [2005]²⁹ ; Bosetti et al. [2006]³⁰ ; Zagamé et al.

²⁸ Le modèle *GEMINI-E3* de Bernard et Vielle (1998) évalue l'effet des politiques environnementales internationales sur les économies, la croissance et le coût des systèmes. Notamment, le modèle évalue l'effet des politiques de taxation carbone, des directives énergie-climat et de la mise en place des quotas sur les émissions de gaz à effet de serre.

²⁹ Le modèle *CIMS* de Rivers et Jaccard (2005) évalue les interactions entre la demande d'énergie, l'offre d'énergie et la performance macroéconomique de certains secteurs clés ainsi que les effets sur les échanges commerciaux. Le modèle a pour fin de fournir aux décideurs politiques un outil de prévision de la réponse des agents d'une économie aux signaux des politiques influençant l'environnement, la production énergétique et la demande des technologies bas-carbone.

³⁰ Le modèle *WITCH* évalue les stratégies optimales d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation sur une économie pour le très long terme. Aussi, le modèle évalue les trajectoires optimales de l'investissement, des technologies énergétiques et de la consommation énergétique qui maximisent le bien-être des agents d'une économie.

[N.A.]³¹ ; [Leimbach et al. 2010 ; et Bauer, Baumstark et Leimbach, 2011]³²; Sassi et al. [2010]³³; Capros et al. [2013]³⁴; Köhler et al. [2006]³⁵; Sievers et al. [2019]³⁶).

1.1. Spécificités des modèles hybrides

Les modèles *top-down* sont caractérisés par l'utilisation de modèles décrivant le système économique dans son ensemble. Spécifiquement, ils évaluent les conséquences des politiques au niveau macroéconomique en se basant sur les modèles en équilibre général. Les avantages et inconvénients dépendent du modèle choisi (*cf.* le chapitre 2 sur les modèles en équilibre général). L'inconvénient majeur de ces modèles est le manque de détail technologique, que pallie le modèle *bottom-up*.

Les modèles *bottom-up* mobilisent un modèle en équilibre partiel qui représente de manière détaillé le fonctionnement du secteur étudié. Le secteur est représenté de manière désagrégée dans le sens où les sources de consommation, de production, d'investissement et les technologies du secteur (par ex. les technologies de production d'électricité carbonées et les technologies de production d'électricité peu carbonées) sont formalisées mathématiquement. Le modèle *bottom-up* décrit les perspectives de technologie en détail du côté de l'offre (possibilités de substitution entre les sources primaires d'énergie) et du côté de la demande (efficacité énergétique et substitution entre énergies). Le but est d'illustrer des trajectoires différentes de développement technologique et de plans d'investissement d'un secteur en particulier. Le développement des technologies est pleinement endogène dans le sens où les politiques publiques mises en place peuvent l'influencer. En général, la productivité du capital est le véhicule principal liant les effets d'apprentissage aux décisions d'investissement dans le secteur étudié. Les décisions d'investissement ne sont pas basées uniquement sur les coûts des technologies, mais aussi sur les préférences des agents, les coûts intangibles, le degré de maturité d'une technologie et les parts de marché.

³¹ Le modèle *Némésis* évalue l'effet des politiques structurelles sur le moyen terme, notamment la régulation dans le secteur énergétique comme le retrait du nucléaire ou encore la promotion des énergies renouvelables. *Némésis* étudie les interactions entre la croissance, la compétitivité, l'emploi et les comptes publics. La DGEC utilise le modèle pour le cadrage macroéconomique de ses scénarios énergie-environnement.

³² Le modèle *REMIND-R* analyse les différentes options de développement des technologies dans le système énergétique et l'effet de chaque option sur le système économique.

³³ Le modèle *IMACLIM-R* évalue les effets de l'évolution du secteur énergétique au niveau macroéconomique (bien-être, chômage, perte de compétitivité, croissance etc.) et au niveau microéconomique (poids de l'énergie dans les coûts de production, dépenses des ménages en énergie etc.) sur les économies.

³⁴ Le modèle *GEM-E3* mesure l'effet des politiques européennes sur les tendances économiques, énergétiques et environnementales de long terme. Le modèle évalue l'effet d'un changement de politique sur les coûts et les bénéfices du système économique et le bien-être global.

³⁵ Le modèle *E3MG* évalue les effets des politiques environnementales sur le système énergétique et l'économie sur le court et le moyen terme, et l'interaction des systèmes avec le changement technologique.

³⁶ Sievers et al. (2019) étudient les effets sur la valeur ajoutée et l'emploi des politiques de transition énergétique (efficacité énergétique et développement des énergies renouvelables) à l'horizon 2030 en Allemagne. Le modèle hybride consiste à un bouclage macroéconomique, un modèle microéconomique pour le système électrique, un modèle de demande d'énergie pour le secteur des transports et un modèle de demande d'énergie pour le logement.

Une critique majeure sur le modèle *bottom-up* émerge : les potentiels effets de retour macroéconomiques des différentes trajectoires technologiques et des politiques en termes de changement de la structure économique et de productivité sont inexistants (*cf.* Jaccard et al. [2003]) et Jaccard [2005]). Cette caractéristique est particulièrement importante pour modéliser une trajectoire de demande d'énergie sur longue période qui tient compte des évolutions macroéconomiques.

1.2. Réduire le fossé entre les approches *top-down* et *bottom-up*

Le fossé entre les deux approches est devenu notable lorsque le débat s'est focalisé sur les technologies bas-carbone (Hourcade et al., 2006). Le manque de flexibilité technologique des modèles *top-down* est important. Alors, les économistes ont cherché à réduire ce fossé en adoptant une approche hybride. **Le but final d'un modèle hybride est de décrire l'interaction entre les systèmes économiques et techniques, en simulant les comportements des consommateurs et des secteurs d'activité dans le processus de choix des technologies.** Cela donne une indication sur la manière dont les politiques peuvent influencer l'évolution des technologies et l'évolution des préférences des agents sur le long terme de manière à réduire les pertes de bien-être émanant du passage aux technologies bas carbone (Rivers et Jaccard, 2005). *Cette réflexion est importante pour l'analyse de l'effet de l'augmentation des efforts d'efficacité énergétique et du développement des énergies renouvelables sur une économie.* Les modèles hybrides intègrent trois dimensions importantes :

- Le modèle doit être *technology-specific* pour évaluer comment les politiques, promouvant la commercialisation et la diffusion des technologies, pourraient affecter les coûts d'acquisition de nouvelles technologies (approche *bottom-up*) ;
- Le modèle doit pouvoir représenter de manière réaliste les comportements des agents économiques en évaluant comment des politiques, qui augmentent les parts de marchés des technologies, pourraient affecter les coûts intangibles futurs (acceptabilité et préférences des agents économiques) d'acquisition d'une nouvelle technologie. Cela est fait, par exemple, en estimant les paramètres des comportements microéconomiques reflétant les choix technologiques (*top-down*) ;
- Le modèle doit posséder une boucle de rétroaction macroéconomique liant la production et la demande des technologies (*bottom-up*) à l'évolution de la structure de l'économie et à l'output total de l'économie (*top-down*). Par exemple, le modèle *top-down* formalise, côté offre, une fonction de production pour les entreprises dans laquelle l'énergie (la technologie étudiée dans le modèle *bottom-up*) est un facteur de production à part entière. Et, côté demande, le

modèle *top-down* intègre l'énergie dans les décisions de consommation des ménages. L'énergie est détaillée technologiquement dans un modèle *bottom-up*, qui sera ensuite reliée à la demande et à l'offre du modèle *top-down*.

La **Figure 2** schématise un modèle hybride appliqué à la macroéconomie de l'énergie. Les composants du module *bottom-up*, reflétant l'évolution des technologies affectent la dynamique du modèle *top-down*. L'output macroéconomique, généré par le module *top-down*, alimente le module *bottom-up*.

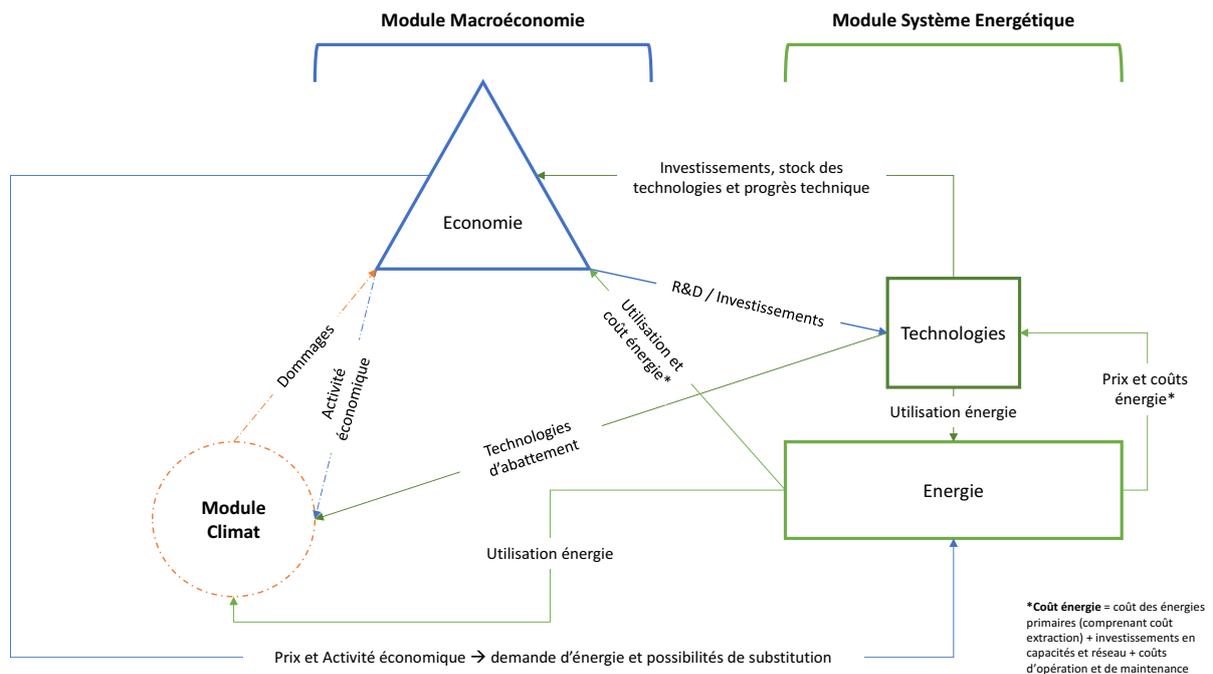


Figure 2 Schématisation des interactions entre les modules *top-down* et *bottom-up* d'un modèle hybride en macroéconomie de l'énergie

1.3. Caractéristiques

Les modèles hybrides répondent à un grand nombre de critères. Le caractère stochastique, l'étude des effets intergénérationnels et l'hétérogénéité des agents du modèle hybride va dépendre du type de modèle choisi pour le module *top-down* (voir chapitre 2). Le module *bottom-up* permet lui de décrire les systèmes techniques de manière fine et donc d'endogénéiser le progrès technique. Le modèle hybride permet de répondre aux trois premiers inconvénients des modèles *top-down* en équilibre général mentionnés en fin de chapitre 2.

1.4. Les modèles hybrides en France

Les modélisations existantes sur la transition énergétique suivie par la France sont au nombre de trois : Three-Me de l'Ademe, Imaclim-R du Cired, et Némésis de Seureco. Seul le modèle Imaclim

est hybride dans le sens où il ajoute à un modèle top-down un modèle bottom-up pour le secteur énergétique. Un des gros avantages de ces modèles est qu'ils permettent de représenter de manière détaillée tous les secteurs de l'économie, les investissements verts dans le secteur du logement et du transport. Néanmoins, ces modèles sont complexes car ils impliquent des milliers d'équation. La complexité des modèles rend difficile l'interprétation des résultats et des mécanismes de transmission sous-jacents. Actuellement, la DGEC n'utilise que les modèles Three-Me et Imaclim, notamment pour l'évaluation des scénarios de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Némésis est utilisé par le rapport Quinet de 2019 pour la valeur de l'action pour le climat.

Le modèle Némésis est un modèle macroéconométrique multisectoriel. Le modèle est de type néo-keynésien sur le court-moyen terme, et néoclassique à croissance endogène (secteur R&D) sur le long terme. Le modèle est basé sur une représentation de chaque secteur d'activité à l'aide de fonctions de production agrégées de type CES. Il prend en compte les comportements des ménages d'investissements dans le transport (véhicules électriques, bornes de recharge...) et le secteur du bâtiment. Le secteur de production de l'électricité est modélisé mais le fonctionnement technique en est peu détaillé.

Le modèle Three-ME est un modèle macroéconométrique multisectoriel de type néo-keynésien avec une représentation des investissements des ménages (hétérogènes) dans le secteur du logement et du transport via la production de services énergétiques. Les ménages produisent des services de logement et de transport grâce à des investissements selon différentes classes de logement, le nombre de rénovation, le nombre de constructions neuves etc. Le volume d'énergie consommé des ménages est directement lié à leur utilisation par le logement et le nombre de voitures ainsi que la classe énergétique des équipements. Comme Némésis, il ne possède de modèle bottom-up du secteur énergétique. Les secteurs énergétiques produisent selon des fonctions de production agrégées de type *Generalized CES*. Les investissements du modèle sont financés par la création monétaire. Enfin, il existe dans le modèle des signaux prix-fictifs qui visent à augmenter virtuellement le prix des énergies fossiles pour atteindre les objectifs de la SNBC. Cette augmentation virtuelle peut se traduire dans la réalité comme une augmentation de la fiscalité carbone, de nouvelles politiques d'efficacité énergétique contraignante etc., donc des mesures qui incitent les agents à diminuer leur consommation d'énergies fossiles. Les signaux prix sont calibrés sur les objectifs de réduction des émissions de GES. Ce type de prise en compte de prix fictifs peut donner une estimation optimiste de la transition énergétique sachant que le moteur principal du modèle est le prix de l'énergie qui est affecté par ce prix virtuel.

Le modèle Imaclim est un modèle hybride statique dont l'évolution de l'économie est représentée par un module top-down et l'évolution des systèmes énergétiques est représentée par des modules

bottom-up. Imaclim prend en compte les efforts d'efficacité énergétique via un sous-modèle d'investissement dans le logement (qui dépend de la croissance démographique, de l'augmentation de la surface habitable, des nouvelles constructions, de l'évolution des standards d'efficacité thermique) et un sous-modèle d'investissement dans le transport (qui dépend des nouveaux modes de transport : covoiturage et autopartage, de la mobilité des passagers, des contraintes budget-temps, etc.). Aussi, pour les secteurs productifs, le modèle considère différentes générations de capital permettant de refléter le processus de création/destruction induit par le progrès technique. Imaclim considère deux versions du modèle avec un progrès technique exogène et un progrès technique endogène qui dépend de l'évolution du prix relatif des énergies. Néanmoins, les fonctions de production agrégées du modèle sont de type Leontief et en conséquence l'étude des possibilités de substitution est limitée.

Pour résumer la sous-section, la structure détaillée du modèle hybride permet d'étudier des scénarios complexes de développement technologique, et l'effet des politiques peut être représenté en détail grâce au niveau de désagrégation du secteur énergétique.

2. Les modèles à évaluation intégrée (IAM)

Dans le but d'associer modélisation socioéconomique et modélisation scientifique (climat, géophysique et biologique) en un modèle général, les économistes développent des modèles dits à évaluation intégrée. La modélisation scientifique entre dans la modélisation économique en tant que facteur affectant les choix et la satisfaction des agents (*cf.* Ackerman et al. [2009], et Nordhaus [2013]). Par exemple, les équations du modèle vont lier l'activité économique et le comportement des agents (théorie économique) aux émissions de gaz à effet de serre (théorie scientifique), elles-mêmes liées à des relations géophysiques (Metcalf et Stock, 2015).

Ces modèles sont développés principalement pour évaluer les politiques climatiques, comme le Protocole de Kyoto, et comment les choix sociétaux affectent le système climatique. Nordhaus (1994) fut le premier à étudier les modèles à évaluation intégrée sur les questions climatiques à partir du modèle à renommée internationale : le modèle DICE/RICE. Le modèle DICE/RICE établit un lien entre la croissance économique et l'environnement. Les travaux de Nordhaus (1994) ont donné lieu à d'autres modèles à évaluation intégrée tels que DART (Deke et al., 2001), MERGE (Manne, Medelsohn et Richels, 1995), FUND (Tol, 2005), ENV-Linkage (Château, Dellink et Lanzi, 2014), MIND (Edenhofer, Bauer et Kriegler, 2005) ou encore WITCH (Bosetti et al., 2006).

2.1. Spécificités des modèles IAM

Ces modèles interagissent entre eux pour évaluer les effets du changement climatique et des politiques environnementales sur le système économique (*cf.* Stern [2008], Van Vuuren et al. [2011], Gonand [2015], et Metcalf et Stock [2015]). Les IAM fournissent des jugements de valeur sur les différentes politiques environnementales qui sont disponibles pour atténuer les effets du changement climatique sur le long terme. Pour ce faire, les modèles IAM aident à élucider les décideurs sur les relations dynamiques qui existent entre les variables économique et climatique, et les implications des politiques environnementales sur les systèmes économique et climatique (Pindyck, 2013). Sous certaines hypothèses sur les systèmes économique et climatique, le modèle évalue l'effet du changement climatique sur les économies – particulièrement sur l'output et la croissance économique future (Stern, 2008) - en construisant différents scénarios énergétiques, climatiques et technologiques (DeCian, Bosetti et Tavoni, 2016). Par ailleurs, le modèle analyse les coûts et les bénéfices attendus des politiques d'atténuation mises en place pour limiter les effets du changement climatique sur les systèmes (*cf.* Stern [2008], et Ackerman et al. [2009]) et identifie le mix optimal de politiques environnementales sous divers scénarios climatiques.

Il existe deux familles de modèles à évaluation intégrée (Weyant et al. [1996], Kelly et Kolstad [1999], et Hope [2005]) :

- les IAM d'optimisation des politiques climatiques. Le modèle cherche à définir la politique optimale qui permettrait de trouver le meilleur compromis entre coûts et bénéfices attendus, ou à déterminer la politique qui minimiserait les coûts d'atteinte associés (Ortiz et Markandya [2009], et Hassler, Krussell et Smith [2016]) ;
- les IAM d'évaluation des politiques climatiques. Le modèle cherche à simuler les effets de différentes politiques climatiques sur les processus physiques, les processus écologiques et les systèmes économiques en générant des sentiers d'équilibre pour plusieurs variables (Bernard & Vielle, 1998).

2.1.1. Les IAM d'optimisation

La **Figure 3** schématise le fonctionnement d'un IAM d'optimisation. Le module « économie » modélise les émissions de gaz à effet de serre et les effets économiques du changement climatique. Les actions des agents dans le module « économie » déterminent les émissions de gaz à effet de serre. Le module « économie » influence le module « cycle carbone »³⁷ via les prix des combustibles

³⁷ Le module « cycle carbone » spécifie comment les émissions se traduisent en trajectoire de concentration de CO₂ dans les différents réservoirs de la Terre.

fossiles et le développement des technologies fortement et faiblement carbonées. La concentration en CO₂ du module « cycle carbone » affecte le module « climat »³⁸. Le module « climat » et le module « cycle carbone » sont liés car la capacité de la biosphère à stocker du carbone dépend directement des facteurs climatiques, comme la température et les précipitations³⁹. Le module « climat » lie, par voie de conséquence, la concentration de CO₂ de l'atmosphère aux événements climatiques, comme l'effet de l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère sur les températures. Enfin, le module « climat » affecte le module économique via le module « dommage »⁴⁰.

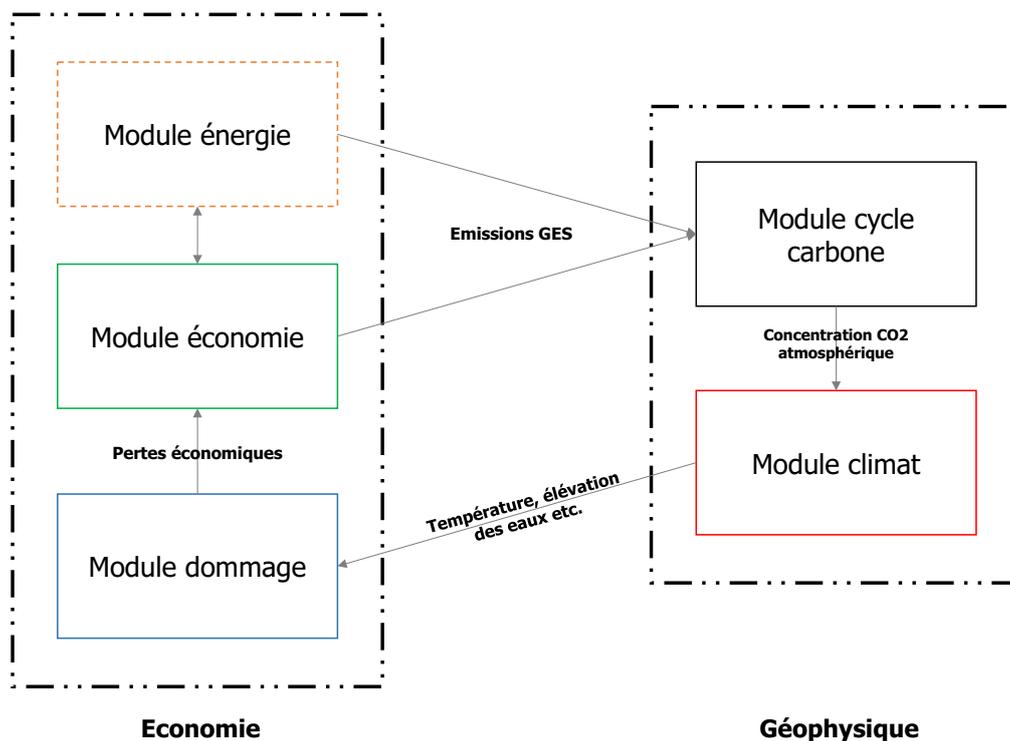


Figure 3 Représentation simplifiée d'un IAM d'optimisation

Les IAMs d'optimisation sont des modèles hybrides dotés de relation géophysiques. Ils présentent les mêmes caractéristiques que les modèles hybrides. Néanmoins, les IAM d'optimisation ne peuvent spécifier pleinement la structure d'une économie car ils intègrent plusieurs modules qui font appel à différents domaines de recherche. Représenter finement la structure d'une économie dans un modèle IAM d'optimisation rendrait complexe la simulation du modèle et l'interprétation des résultats de simulation tant les relations de cause à effet sont nombreuses dans le modèle.

³⁸ Le module climat détermine la distribution des événements climatiques dans le temps et dans l'espace.

³⁹ Par exemple, la capacité des océans à stocker du carbone dépend négativement de la température.

⁴⁰ Le module dommage exprime les pertes économiques pour les agents économiques en fonction des facteurs de changement climatique.

2.1.2. Les IAM d'évaluation

Les **IAM d'évaluation** servent principalement à faire des études qualitatives de politiques publiques. Ils sont composés de : (i) projections des émissions de gaz à effet de serre sous divers scénarios d'abattement en comparaison à un scénario de base ; (ii) projections des changements climatiques et de l'effet économique, exprimé en perte de PIB et de bien-être; (iii) estimation du coût d'abattement des émissions de gaz à effet de serre au cours du temps via des projections du changement technologique ; et (iv) hypothèses sur l'utilité sociale et le taux de préférence pour le présent pour comparer la perte de consommation venant des dépenses en abattement des émissions de gaz à effet de serre aux gains futurs en consommation.

2.2. Caractéristiques

Le principal avantage des IAM est leur capacité à intégrer divers domaines de recherche. Cela permet de disposer d'une vision globale et précise des interactions entre l'économie et le climat, comme la dynamique du progrès technique, la dynamique démographique, la croissance économique, la dynamique climatique et les interactions entre les secteurs d'activité. En outre, les modèles à évaluation intégrée sont un bon outil pour déterminer et prioriser les incertitudes pesant sur nos systèmes (Weyant et al, 1996). La cause en est attribuée à la capacité des modèles à évaluer les conséquences sur le très long terme de différentes hypothèses et scénarios de politiques sur le système économique et climatique.

Les modèles à évaluation intégrée d'évaluation des politiques ne sont pas voués à faire des prévisions. C'est plus un outil qualitatif qu'un outil quantitatif. Par le fait, les modèles à évaluation intégrée ne considèrent pas la réponse des agents économiques aux politiques. Par réponse économique, on entend une réponse endogène (via les revenus, la production, la demande et l'offre) où un agent prend une décision optimale selon une politique de contrôle. Les modèles à évaluation intégrée considèrent des réponses exogènes aux politiques (Kelly et Kolstad, 1999).

Les IAM manquent parfois de transparence et de cohérence (Pindyck, 2013). En effet, ces modèles sont composés de modèles et de sous-modèles complexes qui imposent indubitablement des restrictions et hypothèses discutables⁴¹. Par exemple, Gonand (2015) soulève que les modèles d'évaluation intégrée sont dépendants du choix de l'élasticité de la température moyenne à la concentration de gaz à effet de serre qui est subjectif tant l'estimation est difficile. Cela rend le modèle sensible aux hypothèses imposées.

⁴¹ Par exemple la croissance de la population sur le très long terme, la croissance de l'économie sur le très long terme, les émissions de gaz à effet de serre, ou encore les hypothèses climatiques.

Pindyck (2013 & 2017) remet en cause la légitimité des modèles d'évaluation intégrée pour l'évaluation des politiques publiques. Selon l'auteur, les principaux défauts du modèle sont les choix purement arbitraires des formes fonctionnelles (la fonction de dommage) et de certaines valeurs de paramètres, comme le taux d'actualisation ou l'élasticité de la température moyenne à la concentration de gaz à effet de serre, laissés à la discrétion du modélisateur. Il souligne que ces derniers guident pour beaucoup les résultats du modèle (notamment le coût social du carbone).

Gonand (2015) note que les évaluations empiriques des modèles d'évaluation intégrée peinent à fournir un degré de précision élevé. En effet, nombre de modèles donnent des résultats disparates sur notamment l'évaluation du bien-être. Par ailleurs, ces évaluations sont dépendantes du taux d'actualisation choisi par les modélisateurs, d'autant plus que le temps étudié par ces modèles est très long. Le choix est loin d'être objectif car la littérature économique sur le taux d'actualisation du bien-être futur n'a toujours pas trouvé de terrain d'entente.

Enfin, les modèles IAM sur-simplifient la réalité du monde économique en utilisant des équations simplistes (Stern, 2008). Cela ne permet pas de capturer tous les déterminants clés derrière une politique (DeCian, Bosetti et Tavoni, 2016). Le niveau d'agrégation de l'économie dans ces modèles est trop important (Geels, Berkhout et van Vuuren, 2016) pour étudier des questions de type transition énergétique où les effets se déploient à des échelles multiples.

CONCLUSION

La modélisation macroéconomique est devenue l'outil principal des institutions pour mesurer les effets des politiques, des chocs ou d'autres changements structurels. Les différents modèles en macroéconomie diffèrent principalement selon quatre critères : (i) le détail technologique, (ii) le traitement des phénomènes de transition, (iii) le traitement de l'incertitude et (iv) l'horizon temporel. Par ailleurs, le chapitre 2 a soulevé quatre inconvénients majeurs auxquels un modèle macroéconomique étudiant la transition énergétique doit s'efforcer de répondre : (i) le manque de détail technologique, (ii) l'étude partielle des changements structurels, (iii) l'incapacité à étudier les politiques orientées technologie, et dans une moindre mesure (iv) la faiblesse de la robustesse empirique par rapport aux modèles économétriques.

L'analyse du changement technologique est importante lorsqu'on étudie la transition énergétique. Le passage à une économie bas-carbone requiert un développement de masse et diffus des nouvelles technologies bas-carbone. Aussi, il est important d'évaluer la faisabilité technique des politiques de transition énergétique dans le système électrique. En effet, le passage au tout électrique affecte la consommation d'électricité sur le long terme qui vient contraindre l'évolution

du mix de production d'électricité. Sachant que l'électricité est une énergie non-stockable à grande échelle, il est important de pouvoir assurer en temps réel l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité sur le réseau. Typiquement, un modèle représentant le fonctionnement du système électrique de type ingénieur permet de prendre en compte des contraintes caractéristiques au système électrique, qui n'auraient pas pu être prises en compte dans le cas d'un modèle purement top down avec une désagrégation de type table *input-output*. Ces contraintes ont un effet direct sur le prix de l'électricité car ils contraignent la dimension du parc électrique et donc l'offre. C'est pourquoi **l'approche hybride, composée d'un sous-modèle technologique détaillant le fonctionnement du système énergétique et d'une boucle de rétroaction macroéconomique, est adéquate pour étudier les effets des politiques de transition énergétique sur le long terme en France.**

La modélisation hybride permet de répondre aux trois premiers inconvénients grâce à un sous-modèle *bottom-up* qui détaille le secteur technologique finement, ici le système électrique. À un horizon d'étude de 2035, le modèle DSGE apparaissent comme un outil adapté pour créer une boucle de rétroaction macroéconomique au système électrique. Le modèle DSGE permettent d'étudier la dynamique du système via l'optimisation intertemporelle des programmes des agents de l'économie. La cause en est attribuée à leur capacité de prospecter des variables-clés macroéconomiques à des points donnés du temps et d'étudier la transition de ces variables entre le court et le long terme. La dynamique est d'autant plus importante que les politiques énergétiques peuvent affecter les incitations à investir dans les technologies bas-carbones et que les effets de substitution entre les différents types d'énergies sont forts. Par conséquent, évaluer les effets de long terme induits par les politiques publiques implique qu'un cadre intertemporel est nécessaire. Par ailleurs, l'intégration du progrès technique ne posera pas un grand problème, même si l'intégration ne sera que partielle car le progrès technique est en vérité plus exogène qu'endogène dans le cas énergétique français (effets de déversement technologique). En outre, le modèle DSGE permet d'intégrer une forme d'incertitude. L'incertitude est importante car les politiques de transition énergétiques sont soumis à une incertitude réglementaire forte et l'évolution du prix des énergies dans le temps est soumise à des pressions exogènes. Par mesure de faisabilité (*cf.* Partie II ci-après), la **boucle de rétroaction macroéconomique sera dans un premier temps modélisé dans un cadre déterministe**, si bien qu'il sera en équilibre général dynamique non-stochastique. La modélisation suit la même qu'un DSGE classique, sauf que l'économie n'est plus perturbée par des chocs stochastiques, mais par des chocs temporaires et/ou permanents déterministes. Une forme d'incertitude est intégrée au modèle dans la Partie IV grâce à la simulation de chocs non-anticipés par les agents de l'économie. Enfin, **un DSGE permet au**

modélisateur d'interpréter les mécanismes sous-jacents aux résultats de simulation grâce à un cadre théorique fort. Le cadre microfondé du modèle DSGE permet de simuler différentes options d'évolutions du système électrique sous différentes évolutions du prix des énergies afin de quantifier les évolutions en résultant pour différents indicateurs macro-économiques.

Annexes de la Partie I

1.A. Les modèles DSGE développés par les institutions (Sergi, 2015)

Institution	Nom du modèle	Année	Références
Banque centrale européenne	NAWM	2003	Smets et Wouters (2003); Christoffel <i>et al.</i> (2008)
Fonds Monétaire International	GEM	2003	Bayoumi (2004)
Federal Reserve	SIGMA	2005	Erceg <i>et al.</i> (2005)
Bank of England	BEQM	2005	Harrison <i>et al.</i> (2005); Harrison et Oomen (2010)
Czech National Bank	New Model ou G3	2005	Beneš <i>et al.</i> (2005)
Commission Européenne	QUEST	2005	Ratto et Röger (2005); Ratto <i>et al.</i> (2009)
Fonds Monétaire International	GFM	2006	Botman <i>et al.</i> (2006)
Bank of Canada	ToTEM	2006	Murchison et Rennison (2006)
Norges Bank	NEMO	2006	Brubakk et Sveen (2009)
Bank of Finland	AINO	2006	Kilponen et Ripatti (2006)
Banco de España	BEMOD	2006	Andrés <i>et al.</i> (2006)
Banco central de Chile	MAS	2006	Medina et Soto (2006)
Fonds Monétaire International	GIFM	2007	Kumhof <i>et al.</i> (2010)
Sveriges Riksbank (Suède)	RAMSES	2007	Adolfson <i>et al.</i> (2007)
Banque nationale Suisse	DSGE-CH	2007	Cuche-Curti <i>et al.</i> (2009)
DGTPE (France)	Omega3	2007	Carton et Guyon (2007)
Banco Central de Reserva del Perú	MEGA-D	2008	Castillo <i>et al.</i> (2009)
Banco Central do Brasil	SAMBA	2008	Gouvea <i>et al.</i> (2008); de Castro <i>et al.</i> (2011)
Banco de la Republica (Colombie)	PATACON	2008	González <i>et al.</i> (2011)
Reserve Bank of Australia		2008	Jääskelä et Nimark (2008)
Reserve Bank of New Zeland	KITT	2009	Lees (2009)
Banco de España	MEDEA	2009	Burriel <i>et al.</i> (2010)
Federal Reserve	EDO	2010	Chung <i>et al.</i> (2010)
Bank of Japan	M-JEM	2010	Fueki <i>et al.</i> (2010)
Sedlabanki Islands		2010	Seneca (2010)
Banque centrale européenne	EAGLE	2010	Gomes <i>et al.</i> (2010)
Bank of Israel	MOISE	2012	Argov <i>et al.</i> (2012)

1.B. Bibliographie

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *The American Economic Review*, 102(1), 131-166.
- Ackerman, F., DeCanio, S., Howarth, R., & Sheeran, K. (2009). Limitations of integrated assessment models of climate change. *Climate Change*, 95(3-4), 297-315.
- Adelman, I., & Robinson, S. (1978). *Income Distribution Policy in Developing*. Oxford University Press.
- Aghion, P., & Howitt, P. (1998). *Endogenous Growth Theory*. MIT Press.
- Akerlof, G., & Yellen, J. (1985). A near-rational model of the business cycle, with wage and price inertia. *The Quarterly Journal of Economics*, 100(Supplement), 823-838.
- Allais, M. (1947). *Economie et intérêt. Présentation nouvelle des problèmes fondamentaux relatifs au rôle économique du taux d'intérêt et de leur solutions* (Vol. 2). Paris: Imprimerie Nationale.
- Allan, G., Hanley, N., McGregor, P., Swales, J., & Turner, K. (2007). The impact of increased efficiency in the industrial use of energy: A computable general equilibrium analysis. *Energy Economics*, 29(4), 779-798.
- Alquist, R., & Kilian, L. (2010). What do we learn from the price of crude oil futures? *Journal of Applied Econometrics*, 25(4), 539-573.
- Annicchiarico, B., & Di Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new Keynesian model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1-21.
- Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a Bayesian DSGE model. *Renewable Energy*, 120, 60-68.
- Arnott, R., Hosios, A., & Stiglitz, J. (1987). Implicit contracts, labor mobility and unemployment.
- Arrow, K., & Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 265-290.
- Atalla, T., Blazquez, J., Hunt, L., & Manzano, B. (2017). Prices versus policy: an analysis of the drivers of the primary fossil fuel mix. *Energy Policy*, 106, 536-546.

- Atkeson, A., & Kehoe, P. (1999). Models of energy use: putty-putty versus putty-clay. *The American Economic Review*, 89(4), 1028-1043.
- Aubert, D., & Chiroleu-Assouline, M. (2019). Environmental tax reform and income distribution with imperfect heterogeneous labour markets. *European Economic Review*, 116, 60-82.
- Auerbach, A., & Kotlikoff, L. (1987). Dynamic fiscal policy. *Cambridge University Press*.
- Auernheimer, L. (1974). The Honest Government's Guide to the Revenue from the Creation of Money. *Journal of Political Economy*, 82(3), 598-606.
- Azariadis, C. (1975). Implicit contracts and underemployment equilibria. *Journal of Political Economy*, 83(6), 1183-1202.
- Bagnai, A., Granville, B., & Ospina, C. A. M. (2017). Withdrawal of Italy from the euro area: Stochastic simulations of a structural macroeconometric model. *Economic Modelling*, 64, 524-538.
- Baily, M. (1974). Wages and employment under uncertain demand. *The Review of Economic Studies*, 41(1), 37-50.
- Balke, N., & Brown, S. (2018). Oil supply shocks and the US economy: an estimated DSGE model. *Energy Policy*, 116, 357-372.
- Balke, N., Canova, F., Milani, F., & Wynne, M. (2012). DSGE models in macroeconomics: estimation, evaluation, and new developments. (E. G. Publishing, Éd.) 28.
- Ball, L., & Cecchetti, S. (1988). Imperfect information and staggered-price setting. *The American Economic Review*, 78(5), 999-1018.
- Ball, L., & Romer, D. (1990). Real rigidities and the non-neutrality of money. *The Review of Economic Studies*, 57(2), 183-203.
- Ball, L., Mankiw, N., Romer, D., Akerlof, G., Rose, A., Yellen, J., & Sims, C. (1988). The new Keynesian economics and the output-inflation trade-off. *Brookings papers on economic activity*, 1988(1), 1-82.
- Bandura, A. (1989). Human agency in social cognitive theory. *American psychologist*, 44(9), 1175.
- Barker, T., & Scricciu, S. (2010). Modeling low climate stabilization with E3MG: towards a 'new economics' approach to stimulating energy-environment-economy dynamics. *The Energy Journal*, 137-164.
- Baskaya, Y., Hulagu, T., & Kucuk, H. (2013). Oil price uncertainty in a small open economy. *IMF Economic Review*, 61(1), 168-198.
- Basu, S., Fernald, J., & Kimball, M. (2006). Are technology improvements contractionary? *The American Economic Review*, 96(5), 1418-1448.
- Bataille, C., Jaccard, M., Nyboer, J., & Rivers, N. (2006). Towards general equilibrium in a technology-rich model with empirically estimated behavioral parameters. *The Energy Journal*, 93-112.
- Bauer, N., Baumstark, L., & Leimbach, M. (2011). The REMIND-R model: the role of renewables in the low-carbon transformation first-best vs second-best worlds. *Climatic Change*.
- Bernanke, B., Gertler, M., & Gilchrist, S. (1999). The financial accelerator in a quantitative business cycle framework. Dans *Handbook of Macroeconomics* (Vol. 1, pp. 1341-1393).
- Bernanke, B., Gertler, M., Watson, M., Sims, C., & Friedman, B. (1997). Systematic monetary policy and the effects of oil price shocks. *Brookings papers on economic activity*, 1997(1), 91-157.
- Bernard, A., & Vielle, M. (1998). La structure du modèle GEMINI-E3. *Economie et Prévision*, 136, 19-32.
- Bhattacharyya, S. (1996). Applied general equilibrium models for energy studies: a survey. *Energy Economics*, 18(3), 145-164.
- Blanchard, O., & Gali, J. (2007). The macroeconomic effects of oil shocks: why are the 2000s so different from the 1970s? *NBER Working Papers*(w13368).
- Blanchard, O., & Kiyotaki, N. (1987). Monopolistic competition and the effects of aggregate demand. *The American Economic Review*, 647-666.
- Blanchard, O., Gordon, R., & Sims, C. (1987). Aggregate and individual price adjustment. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1987(1), 57-122.
- Blazquez, J., Hunt, L., & Manzano, B. (2017). Oil subsidies and renewable energy in Saudi Arabia: a general equilibrium approach. *Energy Journal*, 38, 29-45.
- Blinder, A., & Rudd, J. (2008). The supply-shock explanation of the great stagflation revisited. *NBER Working Paper*(14563).
- Bodenstein, M., Erceg, C., & Guerrieri, L. (2011). Oil shocks and external adjustment. *Journal of International Economics*, 83(2*), 168-184.
- Bohringer, C. (2004). Sustainability impact assessment: the use of computable general equilibrium models. *Economie Internationale*(3), 9-26.
- Bohringer, C., & Löschel, A. (2006). Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: statu quo and prospects. *Ecological Economics*, 60(1), 49-64.

- Böhringer, C., & Müller, A. (2014). Environmental tax reforms in Switzerland a computable general equilibrium impact analysis. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 150(1), 1-21.
- Bohringer, C., & Rutherford, T. (2013). Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland. *Energy Policy*, 55, 16-26.
- Borges, A. M. (1986). Applied general equilibrium models: an assessment of their usefulness for policy analysis. *OECD Economic Studies*, 7, 15.
- Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. (2012). Assessing the Economic Impacts of Climate Change. *Fondazione Eni Enrico Mattei, Review of Environment, Energy and Economics*.
- Bosetti, V., & Victor, D. (2011). Politics and Economics of Second-Best Regulation of Greenhouse Gases: The Importance of Regulatory Credibility. *The Energy Journal*, 32(1), 1-24.
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., & Tavoni, M. (2006). WITCH a world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 13-37.
- Bovenberg, A., & Heijdra, B. (1998). Environmental tax policy and intergenerational distribution. *Journal of Public Economics*, 67(1), 1-24.
- Bretschger, L., & Schaefer, A. (2017). Dirty history versus clean expectations: can energy policies provide momentum for growth? *European Economic Review*, 99, 170-190.
- Bulow, J., & Summers, L. (1986). A theory of dual labor markets with application to industrial policy, discrimination, and Keynesian unemployment. *Journal of Labor Economics*, 4(3), 376-414.
- Burbidge, J., & Harrison, A. (1984). Testing for the effects of oil-price rises using vector autoregressions. *International Economic Review*, 459-484.
- Calvo, G. (1978). On the Time Consistency of Optimal Policy in a Monetary Economy. *Econometrica*, 46(6), 1411-1428.
- Calvo, G. (1983). Staggered prices in a utility-maximizing framework. *Journal of Monetary Economics*, 12(3), 383-398.
- Caplin, A., & Spulber, D. (1987). Menu costs and the neutrality of money. *The Quarterly Journal of Economics*, 102(4), 703-725.
- Capros, P., D.Van Regemorter, L.Paroussos, P.Karkatsoulis, C.Fragkiadakis, S.Tsani, B.Saveyn (2013). *GEM-E3 Model Documentation*.
- Carbone, J., Morgenstern, R., Williams III, R., & Burtraw, D. (2013). Deficit reduction and carbon taxes: budgetary, economic, and distributional impacts. *Resources for the Future*.
- Carlstrom, C., & Fuerst, T. (2006). Oil prices, monetary policy, and counterfactual experiments. *Journal of Money, Credit, and Banking*, 38(7), 1945-1958.
- Chan, Y. T. (2020). Collaborative optimal carbon tax rate under economic and energy price shocks: A dynamic stochastic general equilibrium model approach. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120452.
- Château, J., Dellink, R., & Lanzi, E. (2014). An Overview of the OECD ENV-Linkages Model : Version 3. *OECD Environment Working Papers*(65).
- Chiroleu-Assouline, M., & Fodha, M. (2014). From regressive pollution taxes to progressive environmental tax reforms. *European Economic Review*, 69, 126-142.
- Christiano, L., Eichenbaum, M., & Evans, C. (2005). Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy. *Journal of Political Economy*, 113(1), 1-45.
- Christiano, L., Eichenbaum, M., & Vigfusson, R. (2003). What happens after a technology shock? *National Bureau of Economic Research*.(w9819).
- Clarida, R., Gali, J., & Gertler, M. (2000). Monetary policy rules and macroeconomic stability: evidence and some theory. *The Quarterly Journal of Economics*, 115(1), 147-180.
- Cochrane, J. H. (1998). What do the VARs mean? Measuring the output effects of monetary policy. *Journal of monetary economics*, 41(2), 277-300.
- Colander, D., Howitt, P., Kitman, A., Leijonhufvud, A., & Mehrling, P. (2008). Beyond DSGE models: towards an empirically based macroeconomics. *The American Economic Review*, 98(2), 236-240.
- Cooper, R., & John, A. (1988). Coordinating coordination failures in Keynesian models. *The Quarterly Journal of Economics*, 103(3), 441-463.
- Darrat, A., Giley, O., & Meyer, D. (1996). US oil consumption, oil prices, and the macroeconomy. *Empirical Economics*, 21(3), 317-334.
- Davis, S. (1985). Sectoral shifts and the dynamic behavior of unemployment: a theoretical analysis.
- De Cian, E., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2012). Technology innovation and diffusion in “less than ideal” climate policies: An assessment with the WITCH model. *Climatic Change*, 114(1), 121-143.
- De Grauwe, P. (2010). The scientific foundation of dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) models. *Public choice*, 144(3-4), 413-443.
- Deke, O., Hooss, K., Kasten, C., Klepper, G., & Springer, K. (2001). Economic impact of climate change: simulations with a regionalized climate-economy model. *Kiel Working Papers*.

- Del Negro, M., & Schorfheide, F. (2011). Bayesian macroeconometrics. *The Oxford handbook of Bayesian econometrics*, 293, 389.
- Dhawan, R., & Jeske, K. (2008). Energy price shocks and the macroeconomy: the role of consumer durables. *40(7)*, 1357-1377.
- Di Comite, F., & Kancs, D. (2015). Macro-Economic models for R&D and innovation policies - A comparison of QUEST, RHOMOLO, GEM-E3 and NEMESIS. *Joint Research Center*.
- Diamond, P. (1965). National debt in a neoclassical growth model. *The American Economic Review*, 55(5), 1126-1150.
- Dissou, Y., & Karnizova, L. (2012). Emissions cap or emissions tax? A multi-sector business cycle analysis. *Working Paper, University of Ottawa*.
- Dixit, A., & Stiglitz, J. (1977). Monopolistic competition and optimum product diversity. *The American Economic Review*, 67(3), 297-308.
- Dixon, P., & Jorgenson, D. (2013). *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling* (Vol. 1A). (Newnes, Éd.)
- Doroodian, K., Boyd, R., & Piracha, M. (1994). A CGE analysis of the impact of trade liberalization between the U.S. and Mexico. *Atlantic Economic Journal*, 22(4), 43-54.
- Dreger, C., & Marcellino, M. (2007). A macroeconomic model for the Euro economy. *Journal of Policy Modeling*, 29(1), 1-13.
- Eboli, F., Parrado, R., & Roson, R. (2010). Climate-change feedback on economic growth: explorations with a dynamic general equilibrium model. *Environment and Development Economics*, 15(5), 515-533.
- Edenhofer, O., Bauer, N., & Kriegler, E. (2005). The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. *Ecological Economics*, 54(2-3), 277-292.
- Evans, H. (1971). Effects of protection in a general equilibrium framework. *The Review of Economics and Statistics*, 53(2), 147-156.
- Faehn, T., & Isaksen, E. (2016). Diffusion of Climate Technologies in the Presence of Commitment Problems. *The Energy Journal*, 37(2), 155-180.
- Fernández-Villaverde, J., Rubio-Ramírez, J., & Schorfheide, F. (2016). Solution and estimation methods for DSGE models. (Elsevier, Éd.) *In Handbook of Macroeconomics*, 2, 527-724.
- Finn, M. (2000). Perfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *Journal of Money, Credit and Banking*, 32(3), 400-416.
- Fischer, C., & Springborn, M. (2011). Emissions targets and the real business cycle: intensity targets versus caps or taxes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 352-366.
- Fischer, S. (1977). Long-term contracts, rational expectations, and the optimal money supply rule. *Journal of Political Economy*, 85(1), 191-205.
- Fisher, J. (2006). The dynamic effects of neutral and investment-specific technology shocks. *Journal of Political Economy*, 114(3), 413-451.
- Friedman, M. (1968). The role of monetary policy. *The American Economic Review*, 58(1), 1-17
- Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., & Matsuoka, Y. (2006). Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model. *The Energy Journal*, 343-354.
- Gali, J. (1999). Technology, employment, and the business cycle: do technology shocks explain aggregate fluctuations? *The American Economic Review*, 89(1), 249-271.
- Geels, F., Berkhout, F., & van Vuuren, D. (2016). Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature Climate Change*, 6(6), 576.
- Gerlagh, R., & Van der Zwaan, B. (2003). Gross world product and consumption in a global warming model with endogenous technological change. *Resource and Energy Economics*, 25(1), 35-57.
- Gerlagh, R., & van der Zwaan, B. (2006). Options and instruments for a deep cut in CO2 emissions: carbon dioxide capture or renewables, taxes or subsidies? *The Energy Journal*, 27(3), 25-48.
- Gleitman, H. (1996). Basic Psychology.
- Golosov, M., Hassler, J., & Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.
- Gonand, F. (2015). Dérèglement climatique et croissance économique. *La Revue de l'Energie*(625).
- Gonand, F. (2016). La transition énergétique: entre objectif environnemental et réalité macroéconomique. *Revue de l'Energie*(630).
- Gonand, F. (2018). Inégalité intergénérationnelle et redistribution du produit d'une taxe carbone.
- Gonand, F., Hasanov, F., & Hunt, L. (2019). Estimating the Impact of Energy Price Reform on Saudi Arabian Intergenerational Welfare using the MEGIR-SA Model. *The Energy Journal*, 40(3), 25-47.

- Gonand, F., & Jouvet, P.-A. (2015). The “second dividend” and the demographic structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 71-97.
- Goodfriend, M., & King, R. (1997). The new neoclassical synthesis and the role of monetary policy. *NBER macroeconomics annual*, 12, 231-283.
- Gould, J. (1968). Adjustment costs in the theory of investment of the firm. *The Review of Economic Studies*, 35(1), 47-55.
- Goulder, L., & Schneider, S. (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. *Resource and Energy Economics*, 21(3-4), 211-253.
- Greenwald, B., & Stiglitz, J. (1986). Externalities in economies with imperfect information and incomplete markets. *The Quarterly Journal of Economics*, 101(2), 229-264.
- Griliches, Z. (1973). Research expenditures and growth accounting. Dans P. Macmillan (Éd.), *Science and technology in economic growth* (pp. 59-95). London.
- Hall, C., Lindenberger, D., Kümmel, R., & Kroeger, T. (2001). The need to reintegrate the natural sciences with economics. *BioScience*, 51, 663-673.
- Hall, R. (1988). The relation between price and marginal cost in US industry. *Journal of Political Economy*, 96(5), 921-947.
- Hallegatte, S., Henriet, F., & Corfee-Morlot, J. (2011). The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework. *Climatic change*, 104(1), 51-87.
- Hamilton, J. (1983). Oil and the macroeconomy since World War II. *Journal of Political Economy*, 91, 228-248.
- Hamilton, J. (1996). This is what happened to the oil-price macroeconomy relationship. *Journal of Monetary Economics*, 38(2), 215-220.
- Hamilton, J., & Herrera, A. (2004). Oil shocks and aggregate macroeconomic behavior: the role of monetary policy: a comment. *Journal of Money, Credit, and Banking*, 36(2), 265-286.
- Hart, O. (1982). A model of imperfect competition with Keynesian features. *The Quarterly Journal of Economics*, 97(1), 109-138.
- Hassler, J., Krusell, P., & Olovsson, C. (2012). *Energy-saving technical change* (No. w18456). National Bureau of Economic Research.
- Hassler, J., Krusell, P., & Smith, J. (2016). Environmental macroeconomics. Dans *Handbook of Macroeconomics* (Vol. 2B, pp. 1893-2008).
- Helm, D., Hepburn, C., & Mash, R. (2003). Credible Carbon Policy. *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 438-450.
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244-264.
- Hooker, M. (2002). Are oil shocks inflationary?: Asymmetric and nonlinear specifications versus changes in regime. *Journal of Money, Credit, and Banking*, 34(2), 540-561.
- Hope, C. 2005. Integrated Assessment Models. Chapter 4 in Helm, D. (ed.), *Climate Change Policy*, Oxford University Press.
- Horschig, T., & Thrän, D. (2017). Are decisions well supported for the energy transition? A review on modeling approaches for renewable energy policy evaluation. *Energy, Sustainability and Society*, 7(1), 5.
- Hou, K., Mountain, D., & Wu, T. (2016). Oil price shocks and their transmission mechanism in an oil-exporting economy: a VAR analysis informed by a DSGE model. *Journal of International Money and Finance*, 68, 21-49.
- Hourcade, J., Jaccard, M., Bataille, C., & Ghersi, F. (2006). Hybrid modeling: new answers to old challenges. *The Energy Journal*, 1-11.
- Howarth, R. (1998). An overlapping generations model of climate economy interactions. *The Scandinavian Journal of Economics*, 100(3), 575-591.
- Hudson, E., & Jorgenson, D. (1974). U.S. Energy Policy and Economic. *Bell Journal of Economics and Management Science*, 5(2), 461-514.
- Iacoviello, M. (2005). House prices, borrowing constraints, and monetary policy in the business cycle. *The American Economic Review*, 95(3), 739-764.
- I4CE (2017). Panorama des financements climat.
- International Energy Agency, & IRENA. (2017). *Perspectives for the energy transition*.
- Ireland, P. (2003). Endogenous money or sticky prices? *Journal of Monetary Economics*, 50(8), 1623-1648.
- Jaccard, M. (2005). Hybrid energy-economy models and endogenous technological change. Dans *Energy and environment* (pp. 81-109). Boston, MA: Springer.
- Jaccard, M., Nyboer, J., Bataille, C., & Sadownik, B. (2003). Modeling the cost of climate policy: distinguishing between alternative cost definitions and long-run cost dynamics. *The Energy Journal*, 49-73.
- Johansen, L. (1960). *A Multisectoral Study of Economic Growth*. (N.-H. P. Company, Éd.)
- John, A., & Pecchenino, R. (1994). An overlapping generations model of growth and the environment. *The Economic Journal*, 1393-1410.

- John, A., Pecchenino, R., Schimmelpfennig, D., & Schreft, S. (1995). Short-lived agents and the long-lived environment. *Journal of Public Economics*, 58(1), 127-141.
- Jorgenson, D., & Yun, K.-Y. (1986). The efficiency of capital allocation. *Scandinavian Journal of Economics*, 88, 85-107.
- Karydas, C., & Zhang, L. (2019). Green tax reform, endogenous innovation and the growth dividend. *Journal of Environmental Economics and Management*, 97, 158-181.
- Kehoe, P., & Kehoe, T. (1994). A primer on static applied general equilibrium models. *Quarterly Review-Federal Reserve Bank of Minneapolis*, 18(2), p. 2.
- Kelly, D., & Kolstad, C. (2000). Integrated assessment models for climate change control. *International yearbook of environmental and resource economics*, 171-197.
- Kilian, L. (2008). The economic effects of energy price shocks. *Journal of Economic Literature*, 46(4), 871-909.
- Kilian, L. (2009). Not all oil price shocks are alike: disentangling demand and supply shocks in the crude oil market. *The American Economic Review*, 99(3), 1053-1069.
- Kilian, L., & Lewis, L. (2011). Does the Fed respond to oil price shocks? *The Economic Journal*, 121(555), 1047-1072.
- Kilian, L., & Murphy, D. (2014). The role of inventories and speculative trading in the global market for crude oil. *Journal of Applied Econometrics*, 29(3), 454-478.
- Kim, I., & Loungani, P. (1992). The role of energy in real business cycle models. *Journal of Monetary Economics*, 29(2), 173-189.
- Kimball, M. (1995). The quantitative analytics of the basic neomonetarist model. (w5046).
- King, R., & Plosser, C. (1984). Money, Credit, and Prices in a Real Business Cycle. *The American Economic Review*, 74(3), 363-380.
- King, R., & Watson, M. (1996). Money, prices, interest rates and the business cycle. *The Review of Economics and Statistics*, 35-53.
- Koetse, M. J., De Groot, H. L., & Florax, R. J. (2008). Capital-energy substitution and shifts in factor demand: A meta-analysis. *Energy Economics*, 30(5), 2236-2251.
- Kohler, J., Barker, T., Anderson, D., & Pan, H. (2006). Combining energy technology dynamics and macroeconometrics: the E3MG model. *The Energy Journal*, 113-133.
- Kydland, F., & Prescott, E. (1982). Time to build and aggregate fluctuations. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1345-1370.
- Labandeira, X., Labeaga, J., & Rodriguez, M. (2009). An integrated economic and distributional analysis of energy policies. *Energy Policy*, 37(12), 5776-5786.
- Laitner, J., & Hanson, D. (2006). Modeling Detailed Energy-Efficiency Technologies and Technology Policies within a CGE Framework. *The Energy Journal*, 27, 151-169.
- Leduc, S., & Sill, K. (2004). A quantitative analysis of oil-price shocks, systematic monetary policy, and economic downturns. *Journal of Monetary Economics*, 51(4), 781-808.
- Lee, K., Ni, S., & Ratti, R. (1995). Oil shocks and the macroeconomy: the role of price variability. *The Energy Journal*, 39-56.
- Leimbach, M., Bauer, N., Baumstark, L., Luken, M., & Edenhofer, O. (2010). Technological change and international trade - insights from REMIND-R. *The Energy Journal*, 31, 109-136.
- Lemoine, D., & Traeger, C. (2014). Watch your step: optimal policy in a tipping climate. *American Economic Journal: Economic Policy*, 6(1), 137-66.
- Lennox, J., & Parrado, R. (2015). Capital-embodied Technologies in CGE Models. *Fondazione Eni Enrico Mattei*.
- Liu, Z., & Phaneuf, L. (2013). The transmission of productivity shocks: what do we learn about DSGE modeling? *Annales d'Economie et de Statistique*, 283-304.
- Liu, Y., Wei, T., & Park, D. (2019). Macroeconomic impacts of energy productivity: a general equilibrium perspective. *Energy Efficiency*, 12(7), 1857-1872.
- Long Jr., J., & Plosser, C. (1983). Real business cycles. *Journal of Political Economy*, 91(1), 39-69.
- Loungani, P. (1986). Oil price shocks and the dispersion hypothesis. *The Review of Economics and Statistics*, 536-539.
- Lucas Jr, R. (1972). Expectations and the neutrality of money. *Journal of Economic Theory*, 4(2), 103-124.
- Lucas Jr, R. (1976). Econometric policy evaluation: a critique. *Carnegie-Rochester conference series on public policy*. 1, pp. 19-46. North-Holland: 1972.
- Lucas Jr, R., & Sargent, T. (1979). After keynesian macroeconomics. *Quarterly Review of Federal Reserve Bank of Minneapolis*, 1(295-319).
- Manescu, C., & Nuno, G. (2015). Quantative effects of the shale oil revolution. *Energy Policy*, 86, 855-866.
- Mankiw, G. (2016). *Macroéconomie*. De Boeck Supérieur.
- Mankiw, N., & Summers, L. (1986). Money demand and the effects of fiscal policies. *Journal of Money, Credit and Banking*, 18(4), 415-429.

- Manne, A., Mendelsohn, R., & Richels, R. (1995). MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy Policy*, 23(1), 17-34.
- Manning, A. (1987). Collective bargaining institutions and efficiency: an application of a sequential bargaining model. *European Economic Review*, 31(1-2), 168-176.
- Marion, N. P., & Svensson, L. E. (1984). Adjustment to expected and unexpected oil price changes. *Canadian Journal of Economics*, 15-31.
- Marsiliani, L., & Renstrom, T. (2001). Time Inconsistency in Environmental Policy: Tax Earmarking as a Commitment Solution. *The Economic Journal*, 110(462).
- McCallum, B. (1977). Price-level stickiness and the feasibility of monetary stabilization policy with rational expectations. *Journal of Political Economy*, 85(3), 627-634.
- McCallum, B. (1986). On "real" and "sticky" price theories of the business cycle. *Journal of Money, Credit, and Banking*, 18, 397-414.
- McDonald, I., & Solow, R. (1981). Wage bargaining and employment. *The American Economic Review*, 71(5), 896-908.
- Mertens, K., & Ravn, M. O. (2012). Empirical evidence on the aggregate effects of anticipated and unanticipated US tax policy shocks. *American Economic Journal: Economic Policy*, 4(2), 145-81.
- Metcalf, G., & Stock, J. (2015). The role of integrated assessment models in climate policy: a user's guide and assessment. *The Harvard Project on Climate Agreements Discussion Paper*, 15-68.
- Metcalf, G. E., & Stock, J. H. (2020, May). Measuring the macroeconomic impact of carbon taxes. In *AEA Papers and Proceedings* (Vol. 110, pp. 101-06).
- Michel, P., & Venditti, A. (1997). Optimal growth and cycles in overlapping generations models. *Economic Theory*, 9(3), 511-528.
- Mork, K., & Hall, R. (1980). Energy prices, inflation, and recessions, 1974-1975. *The Energy Journal*, 1(3), 31-63.
- Muth, J. (1961). Rational expectations and the theory of price movements. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 315-335.
- Nakabayashi, M. (2010). Optimal tax rules and public sector efficiency with an externality in an overlapping generations model. *Journal of Public Economics*, 94(11-12), 1028-1040.
- Nakov, A., & Pescatori, A. (2010). Oil and the Great Moderation. *The Economic Journal*, 120(543), 131-156.
- Nordhaus, W. (1994). Managing the global commons: the economics of climate change. MIT Press, 31.
- Nordhaus, W. (2013). Integrated economic and climate modeling. Dans P. Dixon, & D. Jorgenson, *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling* (Vol. 1, pp. 1069-1131).
- North, D. (1990). Institutions and their consequences for economic performance. *The limits of rationality*, 383-401.
- Olson, L., & Knapp, K. (1997). Exhaustible Resource Allocation in an Overlapping Generations Economy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32(3), 277-292.
- Ortiz, R., & Markandya, A. (2009). Integrated impact assessment models of climate change with an emphasis on damage functions: a Literature Review.
- Papageorgiou, C., Saam, M., & Schulte, P. (2017). Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective. *Review of Economics and Statistics*, 99(2), 281-290.
- Pani, M., & Perroni, C. (2018). Energy subsidies and policy commitment in political equilibrium. *Energy Economics*, 71, 149-160.
- Phelps, E. S. (1968). Money-wage dynamics and labor-market equilibrium. *Journal of political economy*, 76(4, Part 2), 678-711.
- Pindyck, R. (1991). Irreversibility, uncertainty and investment. *Journal of Economic Literature*, 29, 1110-48.
- Pindyck, R. (2013). Climate change policy: What do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872.
- Pindyck, R. S., & Rotemberg, J. J. (1984). Energy price shocks and macroeconomic adjustments. *Natural Resources Journal*, 24(2), 277-296.
- Reinelt, P., & Keith, D. (2007). Carbon Capture Retrofits and the Cost of Regulatory Uncertainty. *The Energy Journal*, 28(4), 101-128.
- Rivers, N., & Jaccard, M. (2005). Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modeling using discret choice methods. *The Energy Journal*, 83-106.
- Roach, T. (2021). Dynamic carbon dioxide taxation with revenue recycling. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125045.
- Rogge, K., & Dutschke, E. (2018). What makes them believe in the low-carbon energy transition? Exploring corporate perceptions of the credibility of climate policy mixes. *Environmental Science & Policy*, 87, 74-84.
- Rogge, K., & Reichardt, K. (2016). Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45(8), 1620-1635.
- Romer, C. D., & Romer, D. H. (1994). Monetary policy matters. *Journal of Monetary Economics*, 34(1), 75-88.

- Rotemberg, J., & Saloner, G. (1987). The relative rigidity of monopoly pricing. *The American Economic Review*, 77(5), 917-926.
- Rotemberg, J., & Woodford, M. (1996). Imperfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *NBER Working Papers*(w5634).
- Rotemberg, J., & Woodford, M. (1997). An optimization-based econometric framework for the evaluation of monetary policy. *NBER macroeconomics annual*, 12, 297-346.
- Salop, S. (1979). A model of the natural rate of unemployment. *The American Economic Review*, 69(1), 117-125.
- Samuelson, P. (1958). An exact consumption-loan model of interest with or without the social contrivance of money. *Journal of Political Economy*, 66(6), 467-482.
- Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J., Gitz, V., Waisman, H., & Guivarch, C. (2009). IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1-2), 5-24.
- Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J.-C., Gitz, V., Waisman, H., & Guivarch, C. (2010). Imaclim-R: a modelling framework to stimulate sustainable development pathways. *International Journal of Global Environmental Issues, Special Issue on Models for Sustainable Development for Resolving Global Environmental Issues*, 10(1-2), 5-24.
- Saunders, H. D. (1992). The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth. *The Energy Journal*, 13(4).
- Sbordone, A., Tambalotti, A., Rao, K., & Walsh, K. (2010). *Policy analysis using DSGE models: an introduction*.
- Schäfer, A., & Jacoby, H. (2006). Experiments with a hybrid CGE-MARKAL model. *The Energy Journal*, 171-177.
- Schwanitz, V. (2013). Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environmental Modelling & Software*, 50, 120-131.
- Shapiro, C., & Stiglitz, J. (1984). Equilibrium unemployment as a worker discipline device. *The American Economic Review*, 74(3), 433-444.
- Shea, J. (1998). What do technology shocks do? *NBER macroeconomics annual*, 13, 275-310.
- Sheshinski, E., & Weiss, Y. (1977). Inflation and costs of price adjustment. *The Review of Economic Studies*, 44(2), 287-303.
- Shoven, J., & Whalley, J. (1992). *Applying General Equilibrium*. Cambridge University Press.
- Sievers, L., Breitschopf, B., Pfaff, M., & Schaffer, A. (2019). Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions. *Ecological Economics*, 160, 191-204.
- Sims, C. (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1-48.
- Smets, F., & Wouters, R. (2003). An estimated dynamic stochastic general equilibrium model of the euro area. *Journal of the European Economic Association*, 1(5), 1123-1175.
- Smets, F., & Wouters, R. (2007). Shocks and frictions in US business cycles: a Bayesian DSGE approach. *The American Economic Review*, 97(3), 596-606.
- Smulders, S., & de Nooij, M. (2003). The impact of energy conservation on technology and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 25(1), 59-79.
- Smulders, S., Toman, M., & Withagen, C. (2014). Growth theory and 'green growth'. *Oxford Review of Economic Policy*, 30(3), 423-446.
- Solow, R. (1986). On the intergenerational allocation of natural resources. *The Scandinavian Journal of Economics*, 141-149.
- Stern, N. (2008). The economics of climate change. *The American Economic Review*, 98(2), 1-37.
- Stern D., & Cleveland C.J. (2004). Energy and economic growth. *Rensselaer Working Papers in Economics*, n°0410.
- Stiglitz, J. (1974). Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. *The Review of Economic Studies*, 41, 123-137.
- Stiglitz, J. (1984). Price rigidities and market structure. *The American Economic Review*, 74(2), 350-355.
- Tahvonen, O., & Salo, S. (2001). Economic growth and transitions between renewable and nonrenewable energy resources. *European Economic Review*, 45, 1379-1398.
- Taylor, J. (1979). Staggered wage setting in a macro model. *The American Economic Review*, 108-113.
- Taylor, J. (1980). Aggregate dynamics and staggered contracts. *Journal of Political Economy*, 88(1), 1-23.
- Taylor, L., & Black, S. (1974). Practical general equilibrium estimation of resource pulls under trade liberalization. *Journal of International Economics*, 4(1), 37-58.
- Taylor, L., Bacha, E., Cardoso, E., & Lysy, F. (1980). *Models of growth and*. Oxford University Press for the World Bank.
- Tobin, J. (1977). How dead is Keynes? *Economic Inquiry*, 15(4), 459-468.
- Tol, R. (2005). 'Emission Abatement versus Development as Strategies to Reduce Vulnerability to Climate Change: An Application of FUND. *Environment and Development Economics*(10), 615-629.
- Turner, K., & Hanley, N. (2011). Energy efficiency, rebound effects and the environmental Kuznets Curve. *Energy Economics*, 33(5), 709-720.

- Unalmis, D., Unalmis, I., & Unsal, D. (2012). On oil price shocks: the role of storage. *IMF Economic Review*, 60(4), 505-532.
- van Vuuren, D., Lowe, J., Stehfest, E., Gohar, L., Hof, A., Hope, C., . . . Plattner, G. (2011). How well do integrated assessment models simulate climate change? *Climate Change*, 104(2), 255-285.
- Weitzman, M. (1982). Increasing returns and the foundations of unemployment theory. *The Economic Journal*, 92(368), 787-804.
- Weitzman, M. (1994). On the "environmental" discount rate. *Journal of Environmental Economics and Management*, 26(2), 200-209.
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlabathi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E., & Cline, W. (1996). Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results. Dans B. J., Y. H., & E. Haites, *Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change* (pp. 367-439). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wickens, M. (1995). Real business cycle analysis: a needed revolution in macroeconometrics. *The Economic Journal*, 105(433), 1637-1648.
- Wing, I. (2004). *Computable general equilibrium models and their use in economy-wide policy analysis*. Joint Program on the Science and Policy of Global Change. MIT.
- Wohltmann, H. W., & Winkler, R. C. (2008). *Anticipated and unanticipated oil price shocks and optimal monetary policy* (No. 2008-05). Economics Working Paper.
- Zagamé, P., Boitier, B., Fougeyrollas, A., & Le Mouel, P. (N.A.). *The NEMESIS Reference Manual*. Erasme.

PARTIE II. HyGEM, un modèle hybride de croissance dynamique couplé aux trajectoires de transformation du paysage électrique français

La Partie I a montré qu'un modèle d'équilibre général dynamique déterministe hybridé avec un module énergétique de type ingénieur fournit un cadre pertinent pour évaluer les conséquences macroéconomiques d'une transition énergétique à un horizon d'une vingtaine d'années. La Partie II pose les hypothèses et détaille la construction du modèle hybride.

Dans cette partie, le premier chapitre présente les scénarios de transformation du système électrique *Ampère* et *Volt* du Bilan Prévisionnel (ci-après, BP) de Rte sur lesquels la thèse se repose. En conformité avec le Code de l'énergie, Rte publie tous les deux ans cinq scénarios de moyen-long terme de consommation et de production d'électricité. Dans l'élaboration de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, les pouvoirs publics prennent comme référence deux scénarios du BP, à savoir le scénario *Volt* et le scénario *Ampère*. Ces scénarios ne sont basés que sur des modèles en équilibre partiel sans considération de l'environnement macroéconomique. Or, une modification dans les signaux-prix des énergies modifie le choix des acteurs économiques en matière de consommation d'énergie, ce qui modifie la demande et l'offre de l'économie en retour. C'est dans ce contexte que la thèse cherche effectuer un bouclage macroéconomique des deux scénarios du Bilan Prévisionnel de Rte retenus par les pouvoirs publics.

Le deuxième chapitre évoque le modèle d'ingénieur utilisé par Rte pour simuler, par définition en équilibre partiel, son bouquet électrique et les investissements sur le long terme. Le chapitre donne au lecteur une vue d'ensemble de l'outil d'optimisation du bouquet électrique développé par Rte et utilisé dans la thèse en interaction avec le modèle macroéconomique développé.

Le troisième chapitre justifie le choix de l'environnement de simulation (déterministe), présente le modèle de croissance exogène et son interfaçage avec le modèle d'optimisation du système électrique. La modélisation suit la même que celle d'un équilibre général dynamique et stochastique classique, sauf que l'économie n'est plus perturbée par des chocs stochastiques mais par des chocs temporaires et/ou permanents déterministes.

Enfin, le chapitre clôt sur la paramétrisation du modèle. Notamment, un effort d'estimation économétrique est fait sur les différentes élasticités de substitution qui font partie des principaux moteurs de la dynamique du modèle.

CHAPITRE 1. PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS AMPÈRE ET VOLT DU BILAN PRÉVISIONNEL 2017 DE RTE

Le souhait de la neutralité carbone d'ici à 2050, de la réduction du parc nucléaire, l'arrêt des centrales thermiques à charbon et l'arrêt de la construction des centrales à gaz orientent les choix des pouvoirs publics. Volt et Ampère sont deux scénarios construits par RTE de sorte à être compatibles avec ces objectifs qui entraînent une modification du secteur électrique tant sur le plan de la consommation (évolution des modes de consommation) que sur la production (diminution du nucléaire, augmentation des EnR et déclasserement des actifs thermiques). Chaque scénario se différencie par une évolution du mix électrique différente et une évolution de la consommation d'électricité différente. Ampère et Volt sont les deux scénarios avec le plus d'EnR tout en assurant la sécurité d'approvisionnement. Les scénarios sont construits sous contraintes techniques, notamment de manière à assurer l'équilibre entre production et consommation en temps réel via des moyens de productions ou de flexibilités supplémentaires.

1. Le scénario Volt

Du côté de l'offre, le scénario Volt repose sur **un développement soutenu des énergies renouvelables et une évolution du parc nucléaire en fonction des débouchés économiques dans une Europe très interconnectée**. L'évolution du mix électrique est basée sur la rentabilité économique grâce aux débouchés sur le marché européen. Le développement des EnR est relativement moins conséquent que dans le scénario Ampère, mais reste tout de même soutenu, et la part du nucléaire dans le mix dépend des opportunités économiques. La **Figure 4** détaille le mix de production d'électricité de la France à l'horizon 2025, 2020 et 2035 en fonction des différentes technologies.

Le scénario ne vise pas à déterminer un mix optimal entre les énergies renouvelables et le nucléaire. La trajectoire des énergies renouvelables électriques est considérée comme une variable orientée par les choix publics ; elle ne constitue pas un résultat du modèle. Le scénario permet une diversification du bouquet électrique significative, mais moins rapide que les autres scénarios envisagés par RTE. La part de la production nucléaire dans le mix électrique est de 55% en 2035. Par rapport à aujourd'hui, la production éolienne et photovoltaïque est multipliée par cinq, avec

l'objectif de 40% du bouquet électrique atteint en 2035. Il n'existe pas d'espace économique pour de nouvelles unités de gaz dans ce scénario, et les unités de charbon et de lignite sont déclassées. Le système français reste exportateur sur toute la période considérée (33 GW de capacité d'export).

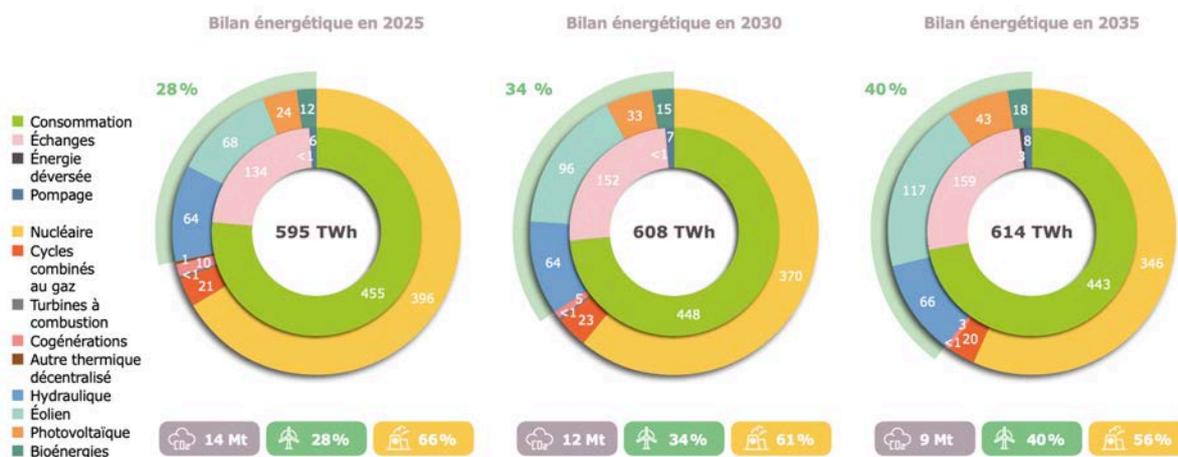


Figure 4 Bilan énergétique prévisionnel - Scénario Volt. Source : Rte

Le prix du CO₂ suit une trajectoire basse dans le scénario avec une valeur de 30€ la tonne de CO₂ à l'horizon 2035. Les émissions du mix électrique français s'établissent à 9 millions de tonnes en 2035 grâce à la fermeture des centrales au charbon, l'absence de nouveaux moyens thermiques et une utilisation modérée des centrales à cycle combiné au gaz (CCG).

À l'horizon 2035, la réduction du montant d'investissement fixe annuel, bien qu'élevé⁴², résulte de la contraction du parc nucléaire et d'une réduction des coûts unitaires d'investissement des technologies renouvelables les plus matures (photovoltaïque et éolien). En conséquence, le montant d'investissement annuel décroît globalement sur la période d'étude, même s'il connaît un pic à l'horizon 2030 pour les besoins d'investissement des interconnexions.

Du côté de la demande, *bors effets volume* (croissance économique et démographique), le scénario Volt est caractérisé par des **efforts de maîtrise de la demande d'énergie et des transferts d'usage relativement plus faibles** dans le secteur résidentiel et le secteur non-résidentiel (*cf. Tableau 1 infra*). Et, le **développement du parc de véhicules électriques et hybrides rechargeables est relativement plus faible** à l'horizon 2035 par rapport à Ampère.

⁴² Les investissements fixes sont à peu près de 8 milliards d'euros sur la plage 2021-2025, de 9,5 milliards d'euros sur la plage 2026-2030 et de 7,2 milliards d'euros sur la plage 2031-2035.

		Logement	Industrie	Tertiaire	Agriculture et Énergie	Transport	
						Résid.	Non-résidentiel
Ampère	Maîtrise de la demande d'énergie	-70,5	-22,2	-60,4	-2,5	-	-5
	Nouveaux usages	+20,5	+6,6	+22,4	+0,02	+25,7	+12,1
Volt	Maîtrise de la demande d'énergie	-53,4	-18	-45,9	-2,3	-	-3,5
	Nouveaux usages	+8,3	+6,2	+11	+0,02	+13,5	+6,8

Tableau 1 Effet des mécanismes de demande sur la consommation d'électricité en 2035 par rapport à 2016 (en TWh) – Source : Rte

2. Le scénario Ampère

Du côté de l'offre, le scénario Ampère repose sur **une réduction de la production nucléaire au rythme du développement effectif des énergies renouvelables** sans recours à de moyens thermiques supplémentaires. Par conséquent, l'évolution du mix de production d'électricité se fait au rythme de développement des EnR. Par rapport à aujourd'hui, l'objectif de 50% d'énergies renouvelables dans le mix de production d'électricité est atteint en 2035. Il n'existe pas d'espace économique pour de nouvelles unités de gaz, et les centrales charbons sont déclassées⁴³. La **Figure 5** détaille le mix de production d'électricité de la France à l'horizon 2025, 2020 et 2035.

Le rythme de développement des énergies renouvelables dans le scénario Ampère est le « rythme PPE haut » de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie. À cela, la trajectoire de consommation haute reflète une trajectoire de développement des interconnexions la plus élevée, et un scénario de prix des combustibles et du CO₂ permettant l'effort de décarbonation le plus important (trajectoire « 450 ppm » de l'Agence Internationale de l'Énergie).

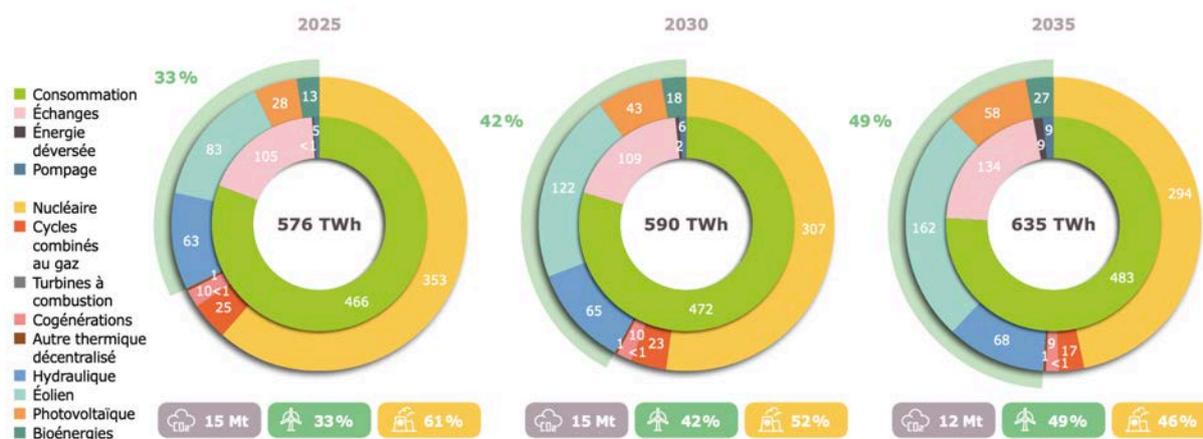


Figure 5 Bilan énergétique - scénario Ampère. Source : Rte

⁴³ À l'exception des centrales au charbon, dont l'arrêt est prévu pour 2022, pratiquement tous les moyens thermiques existants, ou en cours de construction (cycles combinés au gaz et turbines à combustion), sont supposés encore en service en 2040. Ces moyens sont nécessaires à l'équilibre offre-demande du scénario.

La logique du scénario implique un début de substitution de la filière nucléaire par la filière renouvelable dès 2020 sans construction de moyens thermiques supplémentaires ; la substitution s'achève lorsque l'objectif de 50% des énergies renouvelables dans le mix de production d'électricité est atteint. En 2030, le parc nucléaire se stabilise et les énergies renouvelables continuent leur progression. Les parcs « éolien terrestre » et « photovoltaïque » atteignent respectivement 52 GW et 46 GW en 2035, soit respectivement quatre et sept fois les niveaux actuels. L'ajustement du parc nucléaire prend dix ans (entre 2021 et 2030), avec un rythme moyen de déclassement de deux réacteurs par an.

Le parc de production français augmente donc significativement sa production d'électricité à faibles coûts variables. Les exportations d'électricité augmentent en cohérence. Le mix électrique futur repose sur de moins en moins de moyens thermiques et doit intégrer des flexibilités (par ex. l'effacement⁴⁴) pour assurer la sécurité d'approvisionnement.

Ce scénario fait l'hypothèse d'un prix de CO₂ élevé (108 €/tonne) à horizon 2035 pour assurer la cohérence avec l'hypothèse de développement « haute » des énergies renouvelables. Les émissions du mix électrique français s'établissent à 12 millions de tonne en 2035. La fermeture des centrales au charbon, l'absence de nouveaux moyens thermiques et une utilisation modérée des CCG permettent cela. Au niveau européen, le parc français permet d'éviter la production d'émissions de CO₂ européenne à hauteur de 42,3 millions de tonne.

Les besoins d'investissements⁴⁵ sur la période portent sur les énergies renouvelables (de l'ordre de 7 milliards d'euros par an en moyenne) et dans une moindre mesure sur le grand carénage du parc nucléaire maintenu (3 milliards d'euros par an en moyenne). Bien que les capacités annuelles développées soient supposées constantes, les montants à investir dans les technologies d'éolien terrestre, d'éolien en mer et solaire décroissent car leur coût unitaire d'investissement diminue avec l'amélioration des technologies.

Du côté de la demande, *hors effets volume* (croissance économique et démographique), le scénario Ampère est caractérisé par des **efforts de maîtrise de la demande d'énergie et des transferts d'usage relativement plus élevés** dans le secteur résidentiel et le secteur non-résidentiel (*cf. Tableau 1 supra*). Et, le **développement du parc de véhicules électriques et hybrides rechargeables est relativement plus élevé** à l'horizon 2035 par rapport au scénario Volt.

⁴⁴ Le stockage par batteries apparaît trop onéreux à l'horizon 2025 par rapport aux effacements pour présenter une possibilité économiquement intéressante (Bilan Prévisionnel 2017, Rte).

⁴⁵ Les investissements sont à peu près de 10 milliards d'euros sur 2021-2025, de 11,6 milliards d'euros sur 2026-2030 et de 11 milliards d'euros sur 2031-2035.

La **Figure 6** donne le profil de consommation d'électricité des scénarios Ampère (« trajectoire haute ») et Volt (« trajectoire intermédiaire 3 ») sans bouclage macroéconomique simulé par RTE.

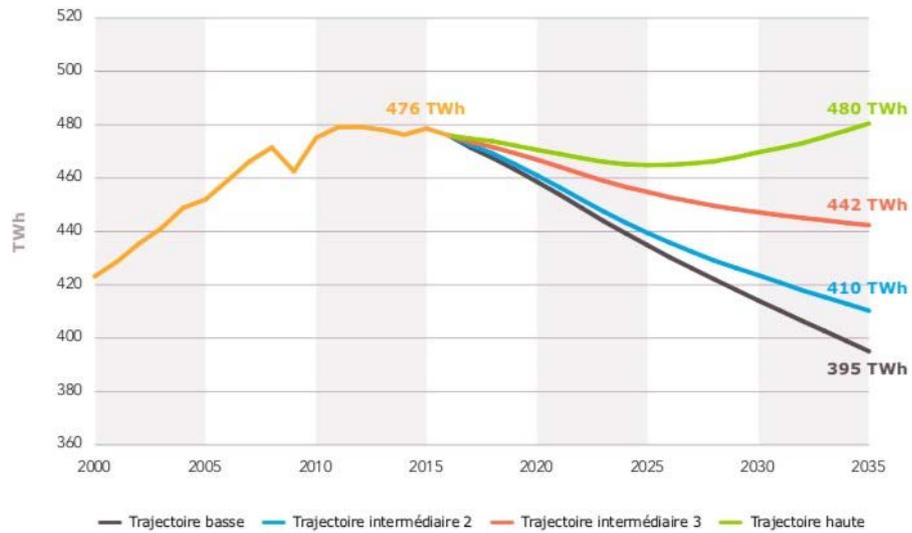


Figure 6 Trajectoires de consommation annuelle d'électricité (France continentale, à températures de référence, hors enrichissement de l'uranium) sans bouclage macroéconomique. *Source : RTE*

CHAPITRE 2. LE SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS ET SON INTERFAÇAGE AVEC LE MODÈLE MACROÉCONOMIQUE

Le présent chapitre donne une description synthétique du modèle *bottom-up* caractérisant le système électrique développé par Rte et son interfaçage avec le modèle *top-down*, construit dans la thèse, caractérisant le reste de l'économie (*cf.* chapitre 3).

1. Présentation du modèle d'optimisation du secteur de production d'électricité

Le modèle d'optimisation du système électrique développé sous *AMPL* par Rte caractérise le développement optimal des technologies de production (au pas horaire) et au coût le plus faible (*cf.* *Figure 7 infra*). **Le modèle fournit quatre variables en entrée au modèle macroéconomique qu'il considère comme exogène : les coûts annualisés du système électrique nets de la balance commerciale, les subventions au système électrique, les revenus de marché et le prix de l'électricité sur le marché de gros.**

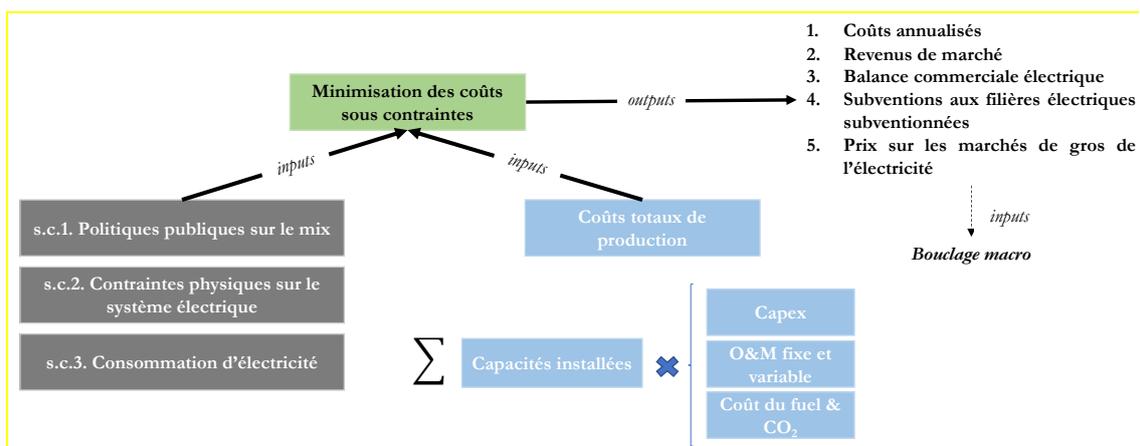


Figure 7 Représentation simplifiée du modèle d'optimisation du système électrique

C'est un modèle microéconomique de minimisation du coût total annuel de production de l'électricité sous contraintes, c.-à-d. le coût d'investissement annualisé des capacités de production installées et le coût de production d'électricité⁴⁶ pour couvrir la charge à chaque heure sur une année. **La fonction de coût est minimisée sous contraintes physiques et politiques⁴⁷**, comme

⁴⁶ Ce sont les coûts d'opération (notamment de combustible et de carbone) et de maintenance.

⁴⁷ Les contraintes imposées au système sont les suivantes : (i) l'équilibre du système électrique à chaque heure, (ii) un maximum de trois heures de délestage (traité comme moyen de production sans coûts fixes), (iii) des capacités minimales et maximales de production, (iv) des capacités de transferts, (v) une contrainte de dispatch pour le stockage hydraulique (la production est contrainte par l'eau stockée présente dans les réservoirs), (vi) l'équilibre entre l'offre et la demande à chaque heure et (vii) des contraintes sur l'effacement. En plus, il existe des contraintes environnementales, telles que la pénétration des énergies renouvelables et le plafond des émissions de CO₂.

la structure du portefeuille de centrales de production. Le modèle est divisé en zones géographiques pour prendre en compte les échanges transfrontaliers d'électricité. Le modèle est simulé dans un environnement en concurrence pure et parfait. Les revenus de marchés et les subventions compensent totalement les coûts annualisés du système électrique.

Les variables endogènes du modèle d'optimisation du système électrique sont : les capacités installées, la production d'électricité, les transferts d'électricité entre zones géographiques, la production déversée et la production d'effacement activée. Les j technologies de production sont : le solaire, l'éolien terrestre et marin, l'hydroélectricité au fil de l'eau, hydraulique lac et éclusé, le stockage hydraulique⁴⁸, le nucléaire, le charbon, la lignite, l'effacement⁴⁹, les centrales à cycle combiné au gaz, les centrales à turbine à gaz à cycle ouvert, les turbines à combustion gaz et fioul, la cogénération gaz et la cogénération fioul, les déchets, la biomasse et le biogaz.

Les variables exogènes au modèle sont les coûts fixes et variables pour chaque technologie de production, les capacités d'interconnexion, la courbe de charge/consommation (sortie du bouclage macroéconomique), le prix du CO₂, le prix des combustibles, le facteur d'émission de chaque technologie, la disponibilité des centrales de production, l'équivalent en énergie de l'eau stockée et les coûts de déversement. Les études de long terme de RTE, notamment du scénario *New Mix*⁵⁰ du « Generation Adequacy Report », et les données de l'Agence Internationale de l'Énergie fournissent les données pour ces variables exogènes.

Contrairement au reste de l'économie, le système électrique ne délègue pas le processus d'accumulation du capital aux ménages. Les investissements du système électrique obtenus à partir des simulations du modèle du système électrique contraignent la contrainte de ressource du modèle macroéconomique. En effet, le mix de production dans Ampère et Volt correspond à une trajectoire bien précise des investissements dans le système électrique sur le long terme. Par conséquent, les investissements du système électrique sont traités comme un choc exogène de

Le modèle exclut certaines contraintes pour des raisons de faisabilité. Notamment, le modèle n'étudie pas les réserves pour le contrôle de la fréquence, le temps minimal et maximal d'opération des centrales, le temps minimal d'activation et d'extinction des centrales, et les coûts de démarrage et d'extinction d'une centrale. En effet, intégrer de telles contraintes rendrait les ensembles de production et les fonctions de coût non-convexes, ce qui mènerait à une absence d'équilibre ou à des prix négatifs. La convexité d'un ensemble de production exclut les coûts fixes de démarrage, les durées maximales et minimales de fonctionnement, et les rendements d'échelle croissants. On suppose que le coût de ces simplifications est minimal sur les résultats. La thèse s'intéresse à des phénomènes de croissance de long terme, donc ne pas tenir compte des phénomènes de très court terme liés au fonctionnement du marché électrique est cohérent avec la démarche de la thèse.

⁴⁸ La technologie n'est pas considérée comme une technologie permettant d'optimiser le mix car la France a atteint son potentiel. Sa capacité installée est fixe.

⁴⁹ L'effacement est un moyen de production dans le modèle. La centrale a une production positive si les consommateurs adaptent leur consommation à la baisse.

⁵⁰ Un développement conséquent des énergies renouvelables, une réduction de la consommation d'électricité et une diminution du parc nucléaire à 50%.

demande positif qui vient perturber l'économie française et, par effet d'éviction, ils contraignent l'investissement total dans l'économie des ménages. Le profit total du système électrique pour l'année t est le suivant :

$$\Pi_t^{el} = p_t^{el} \cdot \sum_{techno, hours} Y_{j,h,t}^{el} + \sum_{techno} sub_{j,t}^{el} - \sum_{techno} Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el}) \quad (1)$$

Avec, p_t^{el} le prix de gros moyen pondéré (par le poids normalisé des semaines sur une année) de l'électricité pour l'année t, $Y_{j,h,t}^{el}$ la production d'électricité par technologie de production j et par heure h , $sub_{j,t}^{el}$ les subventions publiques aux filières électriques subventionnées⁵¹, $Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el})$ les coûts annualisés du système électrique, $capex_{j,t}^{el}$ les coûts fixes annualisés nets de la balance commerciale, $o\&m_{j,t}^{el}$ les coûts d'opération et de maintenance fixes de fonctionnement, $fuels_{j,t}^{el}$ les coûts des combustibles fossiles, $CO2_{j,t}^{el}$ le coût du CO₂ sur le marché des quotas pour le secteur énergétique.

Le gouvernement distribue un complément de rémunération aux filières subventionnées avec $sub_{j,t}^{el}$. Les subventions par filière sont calculées par le modèle d'optimisation du système électrique selon l'équation suivante :

$$sub_{j,t}^{el} = Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}) - \underbrace{\left[p_t^{el} \cdot \sum_{hours} Y_{j,h,t}^{el} - Costs(fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el}) \right]}_{quasi-rente} \quad (2)$$

Le prix de marché au pas horaire durant l'année t, $p_{h,t}^{el}$, est calculé de sorte à assurer l'équilibre offre-demande suivant :

$$\sum_{techno, hours} Y_{j,h,t}^{el} + \sum_{techno, hours} imports_{j,h,t}^{el} = \sum_{techno, hours} consumption_{j,h,t}^{el} + \sum_{techno, hours} pump_{j,h,t}^{el} + \sum_{techno, hours} exports_{j,h,t}^{el} \quad (3)$$

Avec, $Y_{j,h,t}^{el}$ la production d'électricité, $imports_{j,h,t}^{el}$ les importations d'électricité, $consumption_{j,h,t}^{el}$ la consommation d'électricité, $pump_{j,h,t}^{el}$ le pompage d'électricité, $exports_{j,h,t}^{el}$ les exportations d'électricité.

⁵¹ Les subventions aux filières électriques concernent deux outils : le complément de rémunération et les obligations d'achat des acheteurs contraints qui garantissent sur le long terme une rémunération supérieure à la valeur de marché de l'électricité. Le surcoût des acheteurs contraints que causent ces obligations d'achat est supporté par l'État via les subventions.

Le prix moyen pondéré de l'électricité est calculé selon l'équation suivante :

$$p_t^{el} = \frac{(\sum_{week} PNS_{week} * \sum_{hours} p_{h,t}^{el})}{number\ of\ hours} \quad (4)$$

Avec, PNS_{week} le poids attribué à chaque semaine dans une année, $p_{h,t}^{el}$ le prix horaire de l'électricité, et $number\ of\ hours$ le nombre d'heure sur une année.

Le profit du système électrique est positif si les revenus de marché des filières électriques non subventionnées sont supérieurs aux coûts annualisés de ces filières. En effet, les subventions aux filières électriques subventionnées assurent un complément de rémunération leur permettant de couvrir la totalité de leurs coûts. D'ailleurs, les simulations de la Partie III montrent que les profits du système électrique sont relativement plus élevés dans le scénario Volt, dont le mix est relativement plus carboné par rapport au scénario Ampère.

L'entreprise « réseau » investit dans le réseau de distribution et de transport selon ses revenus du paiement par les ménages et les entreprises du tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité (TURPE). Le modèle assume par simplicité que les coûts du réseau sont égaux aux revenus du TURPE. En effet, le TURPE est censé couvrir l'intégralité des charges des gestionnaires de réseau d'électricité selon la loi. Sa contrainte budgétaire est donc,

$$TURPE_t * consumption_t^{el} = GridCosts_t \quad (5)$$

Avec, $TURPE_t$ le tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité en €/MWh, $consumption_t^{el}$ la consommation totale d'électricité et $GridCosts_t$ les coûts supportés par le réseau.

2. Interfaçage avec le modèle macroéconomique

Le modèle d'optimisation du système électrique et le modèle macroéconomique itèrent séparément, et échangent des informations de prix et de quantités dans les deux sens. C'est ce qu'on appelle un *two-way soft link* (cf. **Figure 8** *infra*). Les deux modèles bouclent sur cinq variables : la consommation d'électricité, les coûts annualisés du système électrique nets de la balance commerciale, les revenus de marché du système électrique, les subventions publiques aux filières subventionnées du système électrique et le prix de gros de l'électricité. Les deux modèles vont itérer jusqu'à convergence, c.-à-d., qu'entre deux itérations, les cinq variables ne varieront plus. À ma connaissance, il n'existe pas dans la littérature de modèles hybrides où un modèle macroéconomique et un modèle d'optimisation complet du système électrique itèrent et échangent des informations de la sorte.

Le couplage entre les deux modèles est important pour deux raisons majeures. Premièrement, il permet de prendre en compte une trajectoire fiable d'évolution du prix de gros *au pas horaire* de

l'électricité et des investissements dans le système électrique. L'étude de l'évolution du prix de l'électricité est importante dans l'étude de la transition énergétique car la transition énergétique en France passe par l'électrification de masse des usages et la décarbonation du mix électrique. Par conséquent, l'électricité jouera un poids relativement plus important dans le futur par rapport à aujourd'hui et devancera les énergies fossiles dans leur utilisation sur le long terme. De plus, on sait que les choix d'investissement et de consommation se font beaucoup sur l'évolution relative des différents types d'énergie. Deuxièmement, l'électricité n'étant pas une énergie stockable à grande échelle, il faut pouvoir assurer l'équilibre entre l'offre et la demande en temps réel. La consommation d'électricité, affectée par les comportements des agents, contraint l'évolution du mix de production de l'électricité sur le long terme et affecte en retour l'évolution du prix de gros de l'électricité via l'ordre de mérite. Par conséquent, boucler sur cette consommation est clé pour s'assurer du bon fonctionnement du système électrique. Somme toute le couplage permet d'étudier au mieux l'interaction entre les systèmes énergétiques et les systèmes économiques dans le cadre d'une transition énergétique.

Bien qu'une boucle de rétroaction entre l'évolution de la consommation d'électricité et les marchés de gros de l'électricité est faite, le bouclage entre l'évolution de la consommation d'énergie non-électrique (gaz et pétrole) et les marchés de gros des combustibles est laissé volontairement de côté. Le modèle considère que le poids de la France dans la consommation mondiale de gaz et de pétrole n'est pas assez élevé pour influencer significativement le prix du baril et le prix du gaz naturel sur les marchés internationaux. Selon les scénarios étudiés, les résultats de la Partie III montrent que l'énergie non-électrique diminue au maximum de 13,7% en 2035 par rapport à 2018. Cette diminution est supposée marginale sur les marchés internationaux. En revanche, on pourrait s'attendre à ce que la France ne soit pas le seul pays à diminuer sa consommation d'énergie carbonée dans le temps, menant à une diminution du prix des énergies carbonées sur les marchés mondiaux. Cela est pris en compte dans une des trois versions d'évolution du prix des énergies des scénarios Ampère et Volt qui considère une diminution du prix du baril à 12\$ en 2050 selon le scénario bas de Saudi Aramco.

Il existe une autre façon d'interfacer les deux modèles : le *two-way hard link*. Cet interfaçage consiste à relier directement les équations du modèle bottom-up aux équations du modèle top-down dans la simulation du modèle hybride. Par mesure de faisabilité, il n'est pas possible de relier directement les équations du modèle du système électrique utilisé dans le cadre de la thèse à celles du modèle en équilibre général car les deux modèles sont codés dans des langages différents et la complexité du modèle du système électrique rendrait les simulations du modèle hybride trop lourdes.

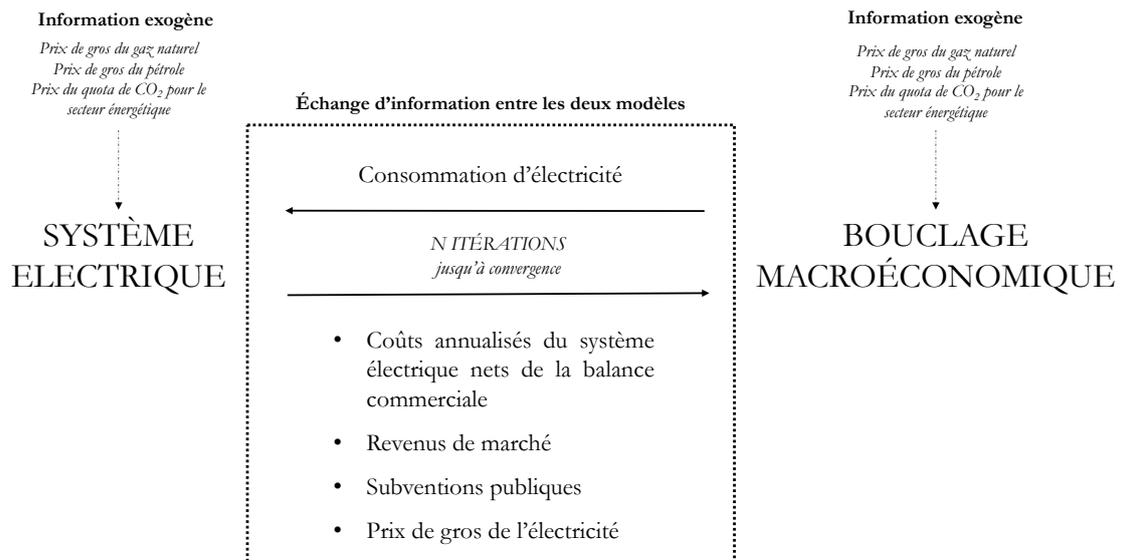


Figure 8 Interfaçage entre le modèle *bottom-up* et le modèle *top-down*

CHAPITRE 3. LE MODÈLE DE CROISSANCE DYNAMIQUE

Le chapitre présente le bouclage macroéconomique. La première section donne une vue d'ensemble du modèle. La seconde section justifie le choix de l'environnement déterministe pour la simulation du modèle. Enfin, les dernières sections décrivent mathématiquement et justifient le comportement de chaque agent composant l'économie.

1. Vue d'ensemble du bouclage macroéconomique

Le bouclage macroéconomique consiste à la construction d'un modèle de type équilibre général dynamique avec comme seule friction le coût d'ajustement du capital physique. Il distingue trois catégories d'agents : le ménage ricardien⁵², le ménage non-ricardien⁵³, l'entreprise représentative et l'autorité publique. Le ménage et l'entreprise interagissent sur le marché du travail⁵⁴ et du capital⁵⁵. Le ménage ricardien offre du capital et du travail à l'entreprise, et obtient une rémunération lui permettant de consommer et d'épargner. Le ménage non-ricardien offre du travail à l'entreprise et obtient une rémunération en conséquence lui permettant de consommer. L'entreprise demande du travail et du capital, et rémunère les détenteurs des facteurs de production. L'autorité publique lève des impôts sur l'entreprise et les ménages, et met en place une politique de redistribution vers les ménages et le système électrique.

L'énergie entre dans la modélisation grâce à la production de services énergétiques par les ménages d'une part, et la production des biens et services par l'entreprise d'autre part. Le modèle étudie l'ensemble des énergies, excepté le charbon qui joue un rôle marginal dans l'économie française, comme produit de manière exogène. Par conséquent, le prix des énergies évolue de manière exogène au modèle macroéconomique. Par ailleurs, le modèle macroéconomique ajoute des

⁵² Un ménage ricardien est défini comme un ménage qui a accès aux marchés du capital et peut optimiser intertemporellement entre sa consommation présente et sa consommation future.

⁵³ Un ménage non-ricardien est défini comme un ménage qui fait face à des contraintes fortes de liquidité et optimise intratemporellement entre les différents biens de consommation.

⁵⁴ Le marché du travail n'est pas modélisé pour deux raisons. La première tient à l'horizon temporel d'étude. Le modèle développé hérite plus des modèles de croissance que des modèles de cycles économiques. Sur le long terme, la part cyclique du chômage ne trouve pas sa place, tout comme la rigidité des prix. Donc, rester dans un cadre néoclassique en l'absence de chômage involontaire n'est pas une hypothèse trop forte. La flexibilité des prix est la condition nécessaire pour que ce taux soit défini comme une position de plein-emploi. La seconde tient à la faisabilité des estimations du modèle (trop de variables, de paramètres et de demande en données). En effet, les modèles récents de type *job search* (cf. Merz [1995] et Andolfatto [1996]), modèle d'appariement (cf. Mortensen et Pissadires, 1994), droit à gérer (cf. Nickell et Andrews, 1983) et contrats efficaces (cf. MacDonald et Solow [1981], et Manning [1987]) sont des modèles qui font appels à beaucoup de variables et de paramètres. Augmenter le nombre de variables et de paramètres dans un modèle déjà riche rendrait les simulations compliquées.

⁵⁵ Le capital est construit au cours du temps par le ménage ricardien qui reporte une partie de sa consommation.

tendances d'efficacité énergétique grâce au taux de croissance de l'efficacité électrique⁵⁶ calculé à partir des scénarios du BP de Rte.

Le modèle d'optimisation du système électrique renseigne le coût annualisés pour le système électrique nets de la balance commerciale, les revenus de marchés, le prix de gros de l'électricité et les subventions correspondantes en entrée du modèle macroéconomique.

Le modèle n'intègre pas de manière endogène les échanges commerciaux et financiers extérieurs. Cette hypothèse n'est pas contraignante ici, car la dynamique du taux de change et la dynamique des échanges commerciaux⁵⁷ importent peu dans les résultats attendus, si ce n'est pour le prix mondial du gaz et du pétrole. Neiss et Nelson (2003) montrent que ce type d'hypothèse n'a pas d'effet significatif sur les résultats, tant que le modèle ne s'attache pas à étudier les politiques commerciales et monétaires. Plusieurs modèles d'équilibre général dynamique utilisent cette spécification, comme Kim et Loungani (1992), Finn (2000), Smulders et de Nooij (2003), Leduc et Sill (2004), Christiano, Eichenbaum et Evans (2005) et Dhawan et Jeske (2008). L'économie importe tout de même de l'énergie non-électrique comme chez les auteurs susmentionnés. Et l'énergie électrique est le fruit d'une production locale et d'importations modélisées par le modèle d'optimisation du système électrique et intégrée dans le modèle macroéconomique.

L'année de base de simulation du modèle – l'année $t = 0$ – est l'année 2018. La simulation s'étend jusqu'à l'année 2035.

2. L'environnement déterministe

La modélisation reprend la même démarche qu'un équilibre général dynamique et stochastique classique sauf que l'économie n'est plus perturbée par des chocs stochastiques mais par des chocs temporaires et permanents déterministes.

Un avantage d'un modèle déterministe est qu'il ne contraint pas l'économie à revenir vers un état stationnaire prédéfini, c.-à-d. que *l'économie peut aussi bien converger vers un nouvel état stationnaire, par ex. à la suite d'un choc permanent*. Cela est utile dans la cadre de la thèse car la transition énergétique

⁵⁶ Les hypothèses microéconomiques de gains d'efficacité énergétique alimentent les trajectoires de consommation du Bilan Prévisionnel de Rte. La croissance de l'efficacité énergétique est calculée à partir des trajectoires de consommation d'électricité des scénarios Ampère et Volt en ne tenant pas compte des effets volume (croissance économique et démographique). Seuls les effets de maîtrise de la demande d'énergie et des nouveaux usages sur la consommation d'électricité sont pris en considération dans le calcul du taux de croissance de l'efficacité énergétique. La croissance de ces trajectoires correspond à plusieurs effets : l'électrification et le transfert des usages, l'efficacité énergétique (produits blancs, TIC, cuisson et éclairage), la rénovation des bâtiments, l'amélioration du confort thermique, la réglementation thermique, la pénétration des pompes à chaleur et la sobriété.

⁵⁷ Intégrer le solde commercial de manière exogène dans le modèle n'affecte pas la dynamique du modèle. Il ne l'affecte que si le modélisateur le considère endogène et étudie les dynamiques de taux de change, la mobilité du capital et du commerce international, ce qui n'est pas l'objet de la thèse.

modifie profondément le paysage électrique français sur le long terme. Par ailleurs, la thèse est vouée à simuler une trajectoire bien définie d'évolution du prix des énergies des coûts annualisés dans le système électrique, des revenus de marchés et des subventions aux filières électriques subventionnées entre 2018 et 2035. Par conséquent, l'évolution des variables exogènes au modèle dans le temps est connue à l'avance avec certitude par le modélisateur et les agents de l'économie. La Partie IV dévient de ce cadre informationnel parfait.

La justification de ce choix est par ailleurs liée à la présence de trois tendances de croissance du modèle : la population totale en emploi, le progrès technique *labor-augmenting*, et le progrès technique *energy-augmenting*. Pour trouver une solution numérique au modèle stochastique, il faut utiliser, notamment, des méthodes de perturbations qui approximent le modèle initial *au voisinage d'un équilibre stationnaire*⁵⁸ déterministe. Pour un tel modèle, il faut pouvoir enlever la tendance de croissance du modèle pour le rendre stationnaire, ce qui n'est pas faisable s'il existe plusieurs tendances de croissance. Par ailleurs, le sentier de croissance équilibré n'est pas compatible avec chaque configuration de progrès technique. Mêmes si toutes les formes de progrès technique sont plausibles *ex-ante*, la croissance équilibrée au sens d'Uzawa⁵⁹ requiert que le progrès technique soit *labor-augmenting*, ou bien il faut que la technologie de production soit de type Cobb-Douglas ce qui n'est pas le cas ici. Donc, si le modèle possède une croissance à l'état stationnaire, alors le changement technologique doit être uniquement *labor-augmenting* pour pouvoir stationnariser de manière conventionnelle le modèle au sens d'Uzawa. De ce fait, pour des simulations stochastiques, il faut enlever la tendance *labor-augmenting* (le travail efficace) et laisser les autres tendances de croissance intactes, pour avoir un état stationnaire bien défini et un modèle stationnaire. Or, pour les tendances de croissance de l'efficacité énergétique, il n'existe pas d'état stationnaire bien défini⁶⁰, donc le sentier de croissance est « non-régulier ». Si bien que le modèle ne serait pas stationnaire au sens d'Uzawa. En revanche, Henriët, Maggiar et Schubert (2014) montrent que pour avoir un sentier de croissance régulier en présence d'efficacité énergétique, il aurait fallu que les taxes et les prix des énergies croissent au taux de croissance de l'efficacité énergétique dans le modèle.

Les simulations déterministes ne requièrent pas une telle approximation au voisinage d'un état stationnaire. En effet, le modèle peut aussi bien être simulé sans être stationnaire. Un modèle déterministe permet donc d'avoir plusieurs types de progrès technique.

⁵⁸ L'état stationnaire est un état pour lequel l'économie est stable, soit pour une variable x , $x_{t+1} = x_t = x_{t-s} = x_{SS}$. L'économie a atteint alors son potentiel de croissance. Le sentier de croissance équilibré est un état stationnaire en présence croissance.

⁵⁹ Redémontré plus tard par Schlicht (2006) et Jones et Scrimgeour (2008).

⁶⁰ Néanmoins, il en existe un si la technologie de production de l'économie est de type Cobb-Douglas, ce qui n'est pas le cas dans le modèle développé dans la thèse. Une fonction de type Cobb-Douglas permet de combiner les différents types de progrès technique en un seul progrès technique neutre.

3. Le secteur résidentiel: un sous-modèle à agents hétérogènes

Il existe un continuum de ménages h sur l'intervalle $[0,1]$. Une fraction ω^{61} , dits « ménage ricardien », indexée par $R \in [0, \omega]$, a accès aux marchés du capital, et possède un portefeuille d'actifs composé de biens de capital et de biens durables lui permettant d'optimiser intertemporellement. La fraction restante $1 - \omega$, dits « ménage non-ricardien », indexée par $NR \in [1 - \omega, 1]$, n'a pas accès aux marchés du capital et possède un portefeuille d'actifs composé uniquement de biens durables lui permettant d'optimiser intertemporellement. Le ménage non-ricardien alloue l'intégralité de ses revenus du travail à la consommation, tandis que le ménage ricardien alloue une portion de son revenu à la consommation présente et une autre portion à son épargne. Les raisons derrière le modèle à agents hétérogènes sont multiples : le comportement de myopie, les contraintes d'accès au crédit et l'effet des chocs adverses sur divers groupes de ménage (Galí, López-Salido et Vallés, 2007). Par exemple, la fiscalité environnementale touche de manière hétérogène le pouvoir d'achat des ménages selon leur lieu d'habitation (rural vs urbain), leur type de véhicule (essence vs électrique) et leurs revenus.

3.1. Le ménage ricardien

Le ménage représentatif ricardien maximise de manière intertemporelle sa fonction « objectif » en choisissant sa consommation et son épargne (ici, l'investissement en capital physique). La fonction « objectif », pour les deux ménages, est standard de type *constant relative risk aversion* (CRRA) comme chez King, Plosser et Rebelo (1988) :

$$u(C_t^R) = \frac{C_t^{R^{1-\sigma}} - 1}{1 - \sigma} \quad (10)$$

Le ménage représentatif ricardien tire l'utilité intratemporelle uniquement de la consommation agrégée, C_t^R . Comme chez Henriët, Maggiar et Schubert (2014), et Blazquez, Hunt et Manzano (2017), le ménage offre inélastiquement du travail⁶² à chaque période, si bien que l'utilité ne dépend

⁶¹ Pour des recherches futures, il serait intéressant d'endogénéiser la part des ménages Ricardien et des ménages non-Ricardien dans le modèle en la rendant non-constante dans le temps. En effet, le modèle étudie le comportement des ménages sur le temps long. Or, la taille relative des deux populations peut en réalité évoluer dans le temps et affecter les dynamiques du modèle en réponse aux politiques de transition énergétique sur le long terme. Par exemple, un mécanisme de redistribution de la fiscalité carbone pourrait être ciblée uniquement sur les ménages non-Ricardien et faire potentiellement sortir ces ménages non-Ricardien de leur situation de contraintes de liquidité sur le long terme. En conséquence, cela amplifierait les effets de substitution entre biens durables et biens non-durables, ainsi donc que l'effet des politiques de transition énergétique sur la croissance. En effet, les résultats de la Partie III et de la Partie IV montrent que les deux types de ménage réagissent différemment aux politiques de transition énergétique sur le long terme.

⁶² Cette hypothèse n'est pas contraignante dans un modèle de croissance car les heures travaillées moyennes sont relativement constantes sur le long terme en France, et ce surtout dans un marché du travail rigide où les heures travaillées sont fixées dans les contrats de travail. L'hypothèse n'est contraignante que si le modèle cherche à étudier la

pas du loisir et l'offre de travail est inélastique aux fluctuations macroéconomiques. Le modèle n'est pas construit pour étudier les effets emplois de la transition énergétique, si bien que les deux marges d'ajustements de l'emploi n'importent pas. Le paramètre σ représente l'élasticité intertemporelle de substitution entre consommation et épargne, soit le degré d'aversion au risque du ménage.

La consommation agrégée du ménage ricardien, C_t^R , est composée de biens non-durables et de services énergétiques. Le bien générique non-durable consommé par le ménage ricardien, X_t^R , est un bien acquis sur le marché des biens et services ; tandis que les services énergétiques produits par le ménage ricardien, ES_t^R , désigne les services que procurent l'utilisation conjointe du stock de biens durables et de l'énergie efficace. Le ménage ricardien combine les deux biens de consommation selon la fonction de type *Constant Elasticity of Substitution* (CES) suivante :

$$C_t^R = \left[\alpha_x \cdot X_t^R \frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c} + (1 - \alpha_x) \cdot ES_t^R \frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c} \right]^{\frac{\sigma_c}{\sigma_c - 1}} \quad (11)$$

Avec α_x , le paramètre de distribution des biens non-durables dans la consommation agrégée, et σ_c le paramètre de substitution entre les biens non-durables et les services énergétiques.

Les services énergétiques sont produits par le ménage à partir de l'énergie efficace et du stock de biens durables (*cf.* équations 12 et 13 *infra*). La théorie de production des ménages (*cf.* Becker [1965], Lancaster [1966]) et Muth [1966]) permet d'intégrer l'énergie dans le secteur résidentiel. La théorie se focalise sur un ménage producteur de services durables. Par exemple, une voiture et du gazole produisent le service « mobilité », ou encore un lave-linge et de l'électricité produisent le service « linge propre ». En effet, le ménage ne retire aucune utilité de la consommation de l'énergie *per se*. Néanmoins, le ménage tire satisfaction du service que l'énergie permet de produire. Nombreux sont les économistes à étudier les décisions de consommation d'énergie des agents grâce à la théorie de production des ménages (*cf.* Quigley [1984], Flaig [1990], et Halvorsen et Larsen [2001]⁶³).

La fonction de production des services énergétiques est de type *CES* comme chez Ogaki et Reinhart (1998), Marsiliani et Renstrom (2000), Barsky, House et Kimball (2007), Dhawan et Jeske (2008) et Henriët, Maggiar et Schubert (2014) :

réponse des heures travaillées aux changements dans les salaires et le taux de taxation du revenu du travail sur le court terme, ce qui n'est pas l'objet de la thèse. Par ailleurs, l'autre contrainte est que l'élasticité de l'offre de travail peut aussi déterminer la réponse de l'emploi aux fluctuations de la productivité durant les cycles économiques.

⁶³ Quigley (1984) estime la demande résidentielle d'énergie sur des données américaines. Il étudie l'effet du changement des prix des énergies sur la demande de services énergétiques des ménages et l'effet des standards d'efficacité énergétique sur la demande d'énergie du secteur résidentiel. Flaig (1990) étudie la demande d'électricité du secteur résidentiel sur des données de la République fédérale d'Allemagne sur le court terme et le long terme. Il montre que le prix des biens durables utilisant de l'énergie et le prix des services acquis sur le marché (par ex. la restauration) ont un effet sur la demande finale d'énergie des ménages. Halvorsen et Larsen (2001) estiment les effets d'un changement de prix de l'électricité sur la demande d'électricité norvégienne sur le long terme.

$$ES_t^R = \left[\alpha_d \cdot (D_t^R)^{\frac{\sigma_{es}-1}{\sigma_{es}}} + (1 - \alpha_d) \cdot E_t^R \frac{\sigma_{es}-1}{\sigma_{es}} \right]^{\frac{\sigma_{es}}{\sigma_{es}-1}} \quad (12)$$

$$E_t^R = \left[\alpha_{el} \cdot (A_t^{el,h} \cdot El_t^R)^{\frac{\sigma_e^h-1}{\sigma_e^h}} + \alpha_{nel} \cdot (A_t^{nel} \cdot Nel_t^R)^{\frac{\sigma_e^h-1}{\sigma_e^h}} \right]^{\frac{\sigma_e^h}{\sigma_e^h-1}} \quad (13)$$

Avec, D_t^R le stock de biens durables disponible pour le flux de service en t détenu par le ménage ricardien, E_t^R l'énergie efficace consommée par le ménage ricardien, α_d le paramètre de distribution, et σ_{es} l'élasticité de substitution entre le stock de biens durables et l'énergie efficace. L'énergie est décomposée en électricité, El_t^R , et en énergie non-électrique, Nel_t^R . Les paramètres d'efficacité du composite énergétique sont : (i) $A_t^{el,h}$, les efforts d'efficacité dans les équipements électriques des ménages⁶⁴ et (ii) A_t^{nel} , les efforts d'efficacité de l'énergie non-électrique. Les paramètres de distribution du composite énergétique sont : α_{el} et $\alpha_{nel} \cdot \sigma_e^h$ correspond à l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique du ménage.

Les tendances d'efficacité électrique et d'efficacité de l'énergie non-électrique évoluent selon les processus suivants :

$$A_t^{el,h} = (1 + g_t^{ael,h}) \cdot A_{t-1}^{el,h} \quad (14)$$

$$A_t^{nel} = (1 + g_t^{anel}) \cdot A_{t-1}^{nel} \quad (15)$$

Avec $g_t^{ael,h}$ le taux de croissance de l'efficacité électrique des ménages et g_t^{anel} le taux de croissance de l'efficacité de l'énergie non-électrique de l'économie.

La distinction entre consommation d'électricité et consommation d'énergie non-électrique est importante. La transition énergétique française favorise l'électrification des équipements sur le long terme. **Sachant que l'électricité prend une place de plus en plus importante dans l'effort de décarbonation des économies, il est important de distinguer dans le modèle les deux types d'énergies. Par ailleurs, le modèle simule l'effet d'un choc de prix énergétique sur la demande de biens durables des ménages sur le long terme. Les résultats de la Partie III montreront que le secteur des biens durables est un canal important de transmission des chocs énergétiques⁶⁵.**

⁶⁴ Le modèle distingue entre efforts d'efficacité électrique des ménages et efforts d'efficacité électrique des entreprises, car les trajectoires des scénarios de consommation électrique de RTE sont construites sur des hypothèses d'évolution des transferts d'usage et de l'efficacité énergétique différentes selon les secteurs (cf. annexe 2.C).

⁶⁵ Dhawan et Jeske (2008) montrent, via un modèle de type équilibre général dynamique et stochastique, que combiner les biens durables et l'utilisation de l'énergie diminue le rôle joué par les prix de l'énergie dans l'explication des

Le ménage ricardien peut réoptimiser à chaque période grâce à un accès aux marchés financiers : il ne connaît pas de contrainte de liquidité. Il arbitre entre consommation présente et consommation future – ici, l’accumulation du capital (ainsi que les biens durables qui servent de collatéral) reflètent les décisions sur la consommation future et donc sur l’épargne. Les ménages prennent des décisions d’investissement dans le capital physique⁶⁶ de l’économie et d’investissement dans les biens durables. Comme il est standard dans la littérature (*cf.* Kydland et Prescott [1982], et Kim et Loungani [1992]), le ménage ricardien est le propriétaire de l’entreprise représentative, grâce à son épargne qui est la source principale d’accumulation du capital. Il reçoit des dividendes de l’entreprise et du système électrique. En revanche, comme mentionné dans la section 2, le ménage n’investit pas, grâce à son épargne, dans le système électrique. Le système électrique investit à partir des revenus de marché reçus de la consommation locale d’électricité et des échanges transfrontaliers.

La contrainte budgétaire du ménage ricardien est la suivante :

$$(1 + \tau^c) \cdot [X_t^R + I_t^{d,R} + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot EL_t^R + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^R] + I_t^{k,R} \\ = \\ (1 - \tau^l) \cdot w_t \cdot h_t^R \cdot L_t^R + (1 - \tau^k) \cdot r_t \cdot K_t^R + TR_t^R + PS_t^R + (1 - \tau^k) \cdot (\Pi_t^R + \Pi_t^{el,R} + \Pi_t^{network,R}) \quad (16)$$

Avec, τ^c la taxe sur la valeur ajoutée, X_t^R la consommation réelle de biens durables du ménage ricardien, $I_t^{d,R}$ l’acquisition réelle de biens durables du ménage ricardien, p_t^{el} le prix de gros réel de l’électricité pour les ménages obtenu à partir du modèle d’optimisation du système électrique, $TURPE_t^h$ le tarif d’utilisation des réseaux d’électricité réel versé par les ménages à l’opérateur de réseau, $\tau_t^{el,h}$ la taxe réelle sur l’électricité pour les deux types de ménage⁶⁷, EL_t^R la consommation réelle d’électricité du ménage ricardien, $p_t^{nel,h}$ le prix de détail réel *hors taxes* de l’énergie non-électrique pour les deux types de ménage, $\tau_t^{nel,h}$ la taxe réelle sur l’énergie non-électrique pour les deux types de ménage, Nel_t^R la consommation réelle d’énergie non-électrique du ménage ricardien,

fluctuations du PIB. Les agents possèderaient deux marges d’ajustement dans leur décision d’investissement en réponse à un choc : les biens durables et de capital. Les agents vont préférer diminuer leur investissement en biens durables plutôt qu’en capital. Dans la même veine, Hamilton (2008) conclut que le secteur des biens durables est un canal important de transmission des chocs énergétiques. Les agents retarderaient leurs dépenses dans les biens durables et les biens de capital. Lee et Ni (2002) et Mehra et Peterson (2005) donnent des évidences microéconomiques sur lesquelles Hamilton (2008) se base, notamment dans l’industrie automobile et les industries énergivores. Les auteurs estiment économétriquement que les chocs du prix du pétrole diminuent la demande de biens durables des ménages.

⁶⁶ Les variables de stock (le capital et les biens durables) sont des variables prédéterminées. Leur valeur aujourd’hui est déterminée par le passé et leur valeur future est affectée par les autres variables du modèle. Le stock a la même valeur dans l’intervalle de période et saute de manière discrète vers une nouvelle valeur lorsque l’intervalle prend fin et que la période suivante commence. Le modèle de la thèse est simulé avec le logiciel Dynare. Le modèle utilise, comme Dynare, le stock de fin de période. Formellement, D_t et K_t sont les stocks accumulés en période (t) disponible en début de période (t+1).

⁶⁷ Les deux types de ménage sont soumis au même taux de taxation de l’énergie et au même taux d’efficacité électrique.

$I_t^{k,R}$ l'investissement réel dans le capital physique du ménage ricardien, τ^l la taxe sur les revenus du travail, w_t le salaire réel, h_t^R le nombre d'heures travaillées, L_t^R le nombre d'employés chez le ménage ricardien, τ^k la taxe sur les revenus du capital, r_t le taux de retour réel sur le capital physique de l'économie (hors système électrique), K_t^R le stock de capital de l'économie (hors système électrique) en début de période détenu par le ménage ricardien, TR_t^R les transferts sociaux réels de l'autorité publique vers le ménage ricardien, PS_t^R le surplus primaire réel du gouvernement redistribué au ménage ricardien, Π_t^R le profit (dividendes) économique réel de l'entreprise représentative versé au ménage ricardien, $\Pi_t^{el,R}$ le profit réel du système électrique versé au ménage ricardien, et $\Pi_t^{network,R}$ le profit économique réel de l'opérateur de réseau versé au ménage ricardien.

Les variables de stock s'accumulent au fil du temps (*cf.* équations 17 et 18 *infra*). Seuls les investissements en capital physique (hors système électrique) font l'objet de coûts d'ajustement internes à l'entreprise⁶⁸ comme chez Iacoviello (2005), Barsky, House et Kimball (2007), et Monacelli (2009). Cela permet notamment d'éviter les taux d'investissement infinis et d'intégrer de la rigidité dans le processus d'accumulation du capital physique. Les variables de stock suivent le processus d'accumulation suivant :

$$D_{t+1}^R = I_t^{d,R} - (1 - \delta^d) \cdot D_t^R \quad (17)$$

$$K_{t+1}^R = I_t^{k,R} \cdot (1 - AC_t^{ik}) - (1 - \delta^k) \cdot K_t^R \quad (18)$$

Avec, D_t^R le stock de biens durables réel en début de période du ménage ricardien qui procure un flux de service en période t , $I_t^{d,R}$ les investissements réels en biens durables du ménage ricardien, δ^d le taux de dépréciation des biens durables, K_t^R le stock de capital physique réel de l'économie en début de période t détenu par le ménage ricardien, $I_t^{k,R}$ les investissements réels en capital pour la période t du ménage ricardien, AC_t^{ik} les coûts réels d'ajustement de l'investissement en capital physique et δ^k le taux de dépréciation du stock de capital physique.

Les coûts d'ajustement suivent la même formule mathématique que Smets et Wouters (2003), Christiano, Eichenbaum et Evans (2005), Christoffel et al. (2008), et Justiniano et al. (2010) :

⁶⁸ En effet, sur le long terme, contrairement aux biens durables, si une entreprise veut modifier son stock de capital physique, elle ne peut le faire du jour au lendemain sans coûts de transformation. Elle doit engager plusieurs dépenses : dépenses de désinstallation du capital existant et d'installation du nouveau capital, coût de recherche, de prospection et d'apprentissage. Ces coûts représentent un coût de main d'œuvre non négligeable pour une entreprise qui cherche à ajuster son stock de capital. Néanmoins, le coût de recherche et d'apprentissage pour un ménage n'est pas coûteux en argent *per se*, il n'est coûteux qu'en temps. Henriët, Maggiar et Schubert (2014) notent que les coûts d'ajustement n'affectent pas sensiblement les dynamiques des variables hors stock de capital et stock de biens durables.

$$AC_t^{ik} = \frac{\vartheta}{2} \cdot \left(\frac{I_t^{k,R}}{I_{t-1}^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} - 1 \right)^2 \quad (19)$$

Avec, ϑ le paramètre de coûts d'ajustement de l'investissement en capital physique et $(g^l + g^n + g^l \cdot g^n)$ le taux de croissance de l'économie. La fonction est positive, croissante et convexe. Plus le ménage investit, plus il doit engager des dépenses pour acheter et installer les machines. En conséquence, le ménage investit de manière graduelle de sorte à limiter les coûts d'ajustement.

3.2. Le ménage non-ricardien

La construction de la fonction d'utilité du ménage non-ricardien est identique à celle du ménage ricardien. Néanmoins, le ménage non-ricardien n'optimise pas de manière intertemporelle car il n'a pas accès aux marchés du capital. Il suit une règle générale selon laquelle il alloue l'intégralité de son revenu du travail après impôts à la consommation selon la contrainte budgétaire suivante :

$$(1 + \tau^c) \cdot [X_t^{NR} + I_t^{d,NR} + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^{NR} + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^{NR}] \\ = \\ (1 - \tau^l) \cdot w_t \cdot h_t^{NR} \cdot L_t^{NR} + TR_t^{NR} + PS_t^{NR} \quad (20)$$

Avec, τ^c la taxe sur la valeur ajoutée, X_t^{NR} la consommation réelle de biens durables du ménage non-ricardien, $I_t^{d,NR}$ l'acquisition réelle de biens durables par le ménage non-ricardien, $p_t^{el,h}$ le prix de gros réel de l'électricité obtenu à partir du modèle d'optimisation du système électrique, $TURPE_t^h$ le tarif d'utilisation des réseaux d'électricité réel versé par les ménages à l'opérateur de réseau, $\tau_t^{el,h}$ la taxe réelle sur l'électricité pour les deux types de ménage, El_t^{NR} la consommation réelle d'électricité du ménage non-ricardien, $p_t^{nel,h}$ le prix de détail réel *bors taxes* de l'énergie non-électrique, $\tau_t^{nel,h}$ la taxe réelle sur l'énergie non-électrique pour les deux types de ménage, Nel_t^{NR} la consommation réelle d'énergie non-électrique du ménage non-ricardien, τ^l la taxe sur les revenus du travail, w_t le salaire réel, h_t^{NR} le nombre d'heures travaillée du ménage non-ricardien, L_t^{NR} le nombre d'employés chez le ménage non-ricardien, TR_t^{NR} les transferts sociaux réels de l'autorité publique vers le ménage non-ricardien, et PS_t^{NR} le surplus primaire réel du gouvernement redistribué au ménage non-ricardien.

Sur le long terme, l'investissement en biens durables ne fait pas l'objet de coûts d'ajustement comme chez Iacoviello (2005), Barsky, House et Kimball (2007), et Monacelli (2009). Les biens durables suivent le processus d'accumulation suivant :

$$D_{t+1}^{NR} = I_t^{d,NR} - (1 - \delta^d) \cdot D_t^{NR} \quad (21)$$

Avec, D_t^{NR} stock de biens durables réel en début de période, $I_t^{d,R}$ les investissements réels en biens durables et δ^d le taux de dépréciation des biens durables.

3.3. Agrégation

Sachant que les ménages sont identiques dans chaque groupe, au niveau agrégé, les variables de consommation suivent l'agrégation suivante :

$$Z_t = \int_0^1 Z_t^h dh = (1 - \omega) \cdot Z_t^{NR} + \omega \cdot Z_t^R \quad (22)$$

Les autres variables suivent l'agrégation suivante :

$$K_t = \omega \cdot K_t^R \quad (23)$$

$$I_t^k = \omega \cdot I_t^{k,R} \quad (24)$$

$$L_t = \omega \cdot L_t^R + (1 - \omega) \cdot L_t^R \quad (25)$$

4. Les secteurs d'activité

Par hypothèse, il existe un grand nombre d'entreprises identiques qui sont agrégées en une seule entreprise représentative. Acemoglu (2003) note que les modèles à équilibre général pour lesquels il n'existe pas d'externalité de production et pour lesquels l'économie opère en concurrence pure et parfaite utilisent intensivement l'hypothèse de l'entreprise représentative. L'horizon temporel de la réflexion permet de supposer que l'économie opère en concurrence pure et parfaite. La partie 1 faisait état de nombreux économistes qui utilisent ce cadre néoclassique pour étudier des questions environnementales et énergétiques (*cf.* Saunders [1992], Kim et Loungani [1992], Atkeson et Kehoe [1999], Finn [2000], Dhawan et Jeske [2008], Fischer et Springborn [2012], Heutel [2012], Golosov, Hassler et Tsyvinski [2014], Dissou et Karnizova [2016] et Argentiero et al. [2018]). Notamment, Finn (2000) montre qu'un cadre néoclassique en concurrence pure et parfaite permet de fournir à un choc de prix énergétique les mêmes résultats sur l'output et les salaires qu'un cadre en concurrence imparfaite en présence de rigidités des prix, comme chez Rotemberg et Woodford (1996).

Comme il est standard dans la littérature (*cf.* Smets et Wouters [2007]), l'économie ne produit qu'un seul bien générique, si bien qu'il n'existe qu'un seul déflateur : le prix de l'output⁶⁹. L'entreprise

⁶⁹ Selon la loi de Walras, s'il y existe N marchés dans une économie, seuls (N-1) prix relatifs sont requis pour trouver l'équilibre de l'économie. Or, dans le modèle, l'économie ne produit qu'un seul bien générique. Cela permet de prendre comme numéraire le prix du bien produit, $p_{o,t}$ (soit le déflateur du PIB) et de le normaliser à 1. Le bien joue le rôle de la monnaie en exprimant les prix des autres biens en quantité de ce bien. Cela est faisable dans le cas d'un équilibre

représentative produit un bien générique qui est consommé ou épargné – plus tard transformé en capital – par le ménage.

L'entreprise représentative combine quatre facteurs de production : le capital, le travail, l'électricité et l'énergie non-électrique. La possibilité de basculer d'un type d'énergie à un autre est contenue par l'élasticité de substitution car les investissements initiaux sont importants. Par ailleurs, les matières premières sont volontairement laissées de côté. Comme noté par Hall et al. (2001), malgré le rôle important des matières premières dans le processus de production, les dernières ne sont que des facteurs « passifs » qui ne contribuent pas directement à la génération de valeur ajoutée.

Théoriquement, Klump et de la Grandville (2000), et Miyagiwa et Papageorgiou (2006), montrent qu'un modèle de croissance gagne généralement à privilégier les technologies de production de type *CES* à rendements constants⁷⁰ à la de Jong et Kumar (1972). Sur les aspects énergétiques et environnementaux, Duffy et Papageorgiou (2000), Stern et Cleveland (2004), Edenhofer, Bauer et Kriegler (2005), et Hassler, Krussell et Olovsson (2012), montrent qu'une fonction de type *Cobb-Douglas* de type (Capital-Travail-Énergie) n'est pas appropriée car cela permettrait de remplacer asymptotiquement l'énergie par les autres facteurs de production. Notamment, Stern et Cleveland (2004) avancent quatre arguments. Premièrement, une fonction de production de type *CES* permet d'introduire un seul secteur tout en permettant un changement dans le degré pour lequel l'énergie contraint la croissance au cours du temps. Deuxièmement, pour des considérations thermodynamiques, la production des entreprises requiert toujours un minimum d'énergie dans le processus de production. Pour permettre un niveau minimal d'énergie dans le processus de production, il faut que l'élasticité de substitution soit strictement inférieure à 1 entre l'énergie et les autres facteurs de production, ce qui implique que la fonction de production ne soit pas une fonction *Cobb-Douglas*. Les évidences empiriques – notamment, Koetse, de Groot et Florax (2008) et Van der Werf (2008) – suggèrent que l'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie est inférieure à 1. Troisièmement, la part du coût de l'énergie dans la valeur ajoutée diminue au cours du temps, si bien que la fonction de production doit pouvoir présenter une part non constante. Enfin, il faut pouvoir distinguer entre progrès technique *labor-saving* et *energy-saving*.

général compétitif, si bien que toutes les variables du modèle sont exprimées en termes réels (en volume comme en prix). Par conséquent, on a : $p_t^o = 1 \rightarrow p_t^x = p_t^{id} = p_t^{ik} = p_t^{tr} = p_t^{ps} = p_t^g = 1$.

⁷⁰ D'après Reynès et Tamsamani (2009), sur une estimation économétrique d'une fonction coût de type *translog* sur les secteurs d'activité français entre 1978 et 2006, le secteur du transport, le secteur de la métallurgie, et le secteur du papier et des produits minéraux ont des rendements d'échelle croissants. L'agroalimentaire et le pétrole-charbon ont des rendements d'échelle décroissants. Le bâtiment, le secteur de la chimie, l'agriculture, les services marchands et le secteur électricité-gaz ont des rendements d'échelle constants. Si bien que l'hypothèse de rendements d'échelle constants **au niveau agrégé** n'est pas trop restrictive dans le cas français.

Par ailleurs, l'ordre d'imbrication des trois facteurs de production (énergie, capital et travail) dans la technologie de production CES dépend du degré de substituabilité entre ces différents facteurs. Le choix de la spécification (Capital-Travail) – Énergie est plus standard dans la littérature macroéconomique (entre autres, Saunders [1992], Manne, Mendelsohn et Richels [1995], Goulder [1995], Bosetti et al. [2006], Carlstrom et Fuerst [2006], Allan et al. [2007], Lalanne, Pouliquen et Simon [2009], Turner et Hanley [2011], Hassler, Krussell et Olovsson [2012], Stern et Kander [2012], Gonand et Jouvét [2015], Dissou et Karnizova [2016], Papageorgiou, Saam et Schulte [2017], Blazquez, Hunt et Manzano [2017], et Gonand, Hasanov et Hunt [2019]). Particulièrement, Saunders (1992) suggère que la fonction CES de type (Capital-Travail) – Énergie serait plus adaptée pour étudier l'efficacité énergétique. Par ailleurs, Van der Werf (2008) note qu'il faut voir le capital plutôt comme l'argent investi, ou encore la renonciation à la consommation présente, et non simplement comme un stock de machines qui utilise de l'énergie. Donc, l'opinion selon laquelle il faudrait combiner le capital et l'énergie car la demande des deux facteurs serait décidée conjointement, est partiellement fautive. Empiriquement, Reynès et Yeddar-Tamsamani (2009) trouvent sur données françaises de 1978-2006 que l'énergie est imparfaitement complémentaire aux autres facteurs, ce qui milite en faveur de l'imbrication (Capital-Travail) – Énergie. Van der Werf (2008) trouve sur des données de l'OCDE que la structure (Capital-Travail) – Énergie correspond aussi relativement mieux aux données. Par ailleurs, Hassler, Krussell et Olovsson (2012) montrent que le composite capital/travail⁷¹ et le facteur énergie sont imparfaitement complémentaires. Comme dans les modèles *EPPA*, *WITCH*, *GEM-E3*, *MERGE* et *Némésis* imbriquent l'énergie électrique et l'énergie non électrique dans une même fonction.

Le bien générique, $Output_t$, est produit à partir de la technologie de production CES suivante :

$$Output_t = \left[\eta_y \cdot Y_t^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E_t^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o} \right]^{\frac{\sigma_o}{\sigma_o-1}} \quad (26)$$

$$Y_t = \left[\eta_k \cdot (K_t)^{\frac{\sigma_y-1}{\sigma_y}} + \eta_n \cdot (A_t^l \cdot N_t)^{\frac{\sigma_y-1}{\sigma_y}} \right]^{\frac{\sigma_y}{\sigma_y-1}} \quad (27)$$

$$E_t^f = \left[\eta_{el} \cdot (A_t^{el,f} \cdot El_t^f)^{\frac{\sigma_e^f-1}{\sigma_e^f}} + \eta_{nel} \cdot (A_t^{nel} \cdot Nel_t^f)^{\frac{\sigma_e^f-1}{\sigma_e^f}} \right]^{\frac{\sigma_e^f}{\sigma_e^f-1}} \quad (28)$$

Avec, $Output_t$ la production de l'économie, E_t^f le composite énergie efficace, Y_t le composite travail-capital, η_y et η_e les paramètres de distribution de la technologie de production de l'output,

⁷¹ Le composite représente la valeur ajoutée brute générée par les entreprises (après avoir payé les consommations intermédiaires) car cette dernière se partage entre les revenus du capital et les revenus du travail.

σ_o l'élasticité de substitution entre les deux composites, η_k et η_n les paramètres de distribution du composite travail-capital, K_t le facteur capital, N_t le facteur travail (le nombre total d'heures travaillées), A_t^l le progrès technique *labor-saving*, σ_y l'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail, η_{el} et η_{nel} les paramètres de distribution du composite énergie efficace, $A_t^{el,f}$ les efforts d'efficacité électrique du secteur productif, El_t^f la consommation d'électricité de l'entreprise, A_t^{nel} les efforts d'efficacité de l'énergie non-électrique, Nel_t^f la consommation d'énergie non-électrique de l'entreprise, et σ_e^f l'élasticité de substitution entre l'énergie non-électrique et l'électricité pour l'entreprise.

Les tendances de progrès technique évoluent comme suit :

$$A_t^l = (1 + g_t^l) \cdot A_{t-1}^l \quad (29)$$

$$L_t = (1 + g_t^n) \cdot L_{t-1} \quad (30)$$

$$A_t^{el,f} = (1 + g_t^{ael,f}) \cdot A_{t-1}^{el,f} \quad (31)$$

$$A_t^{nel} = (1 + g_t^{anel}) \cdot A_{t-1}^{nel} \quad (32)$$

Dans le modèle, les fonctions *CES* ne considèrent pas que l'élasticité de substitution peut changer dans le temps de manière endogène. Arrow, Chenery, Minhas et Solow (1961) soulèvent que l'élasticité de substitution entre facteurs peut varier au cours du temps en fonction du niveau de développement économique. Supposer une élasticité stable au cours du temps dans le cas d'un pays développé et dont la capacité supplémentaire de développement est limitée (le capital par tête est relativement stable) n'est pas restrictif, sauf rupture technologique majeure. Elle le serait davantage si l'on étudiait le cas d'un pays en voie de développement⁷².

L'entreprise maximise son profit économique en termes réels suivant :

$$\Pi_t = Output_t - w_t \cdot N_t - r_t \cdot K_t - [(p_t^{el,f} + TURPE_t^f + \tau_t^{el,f}) \cdot El_t^f + (p_t^{nel,f} + \tau_t^{nel,f}) \cdot Nel_t^f] \quad (33)$$

Avec, Π_t le profit, $Output_t$ l'output réel, w_t le salaire réel, N_t le nombre d'heures travaillées, r_t le taux de retour réel du capital, K_t le stock de capital, $p_t^{el,f}$ le prix de gros réel de l'électricité pour l'entreprise, $TURPE_t^f$ le tarif réel d'utilisation du réseau public de l'électricité pour l'entreprise, $\tau_t^{el,f}$ le taux de taxation réel de l'électricité pour l'entreprise, El_t^f la consommation d'électricité de l'entreprise, $p_t^{nel,f}$ le prix de détail réel *bors taxe* de l'énergie non-électrique pour l'entreprise, $\tau_t^{nel,f}$

⁷² Voir Miyagiwa et Papageorgiou (2006) pour une explication détaillée.

le taux de taxation réel de l'énergie non-électrique pour l'entreprise et Nel_t^f la consommation d'énergie non-électrique de l'entreprise.

5. L'autorité publique

La modélisation de l'autorité publique permet notamment d'étudier la place que prend la fiscalité énergétique et environnementale dans les finances publiques et la transition énergétique. L'analyse de la contrainte budgétaire du gouvernement est importante si l'on veut étudier les conséquences du passage au « tout électrique », ou a minima de l'électrification du bouquet énergétique qu'implique la transition énergétique. *Le passage au tout électrique engendre, toutes choses égales par ailleurs, un manque à gagner pour les administrations, à cause de la diminution de l'assiette de la fiscalité sur les énergies fossiles.* En revanche, la transition énergétique, en cas de hausse de l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables à coût décroissant, est susceptible a priori de stimuler la croissance du PIB de long terme (création d'entreprises, investissements et création d'emplois) ce qui rehausserait alors les recettes publiques *ceteris paribus*. La simulation du modèle dans la Partie III perturbera l'économie de chocs déterministes sur les taxes énergétiques.

5.1. Fiscalité de l'énergie et financement de la transition énergétique

La fiscalité énergétique et environnementale est utilisée pour son rôle d'inflexion du comportement agents économiques⁷³ ; dans le cas français, elle est aussi utilisée à finalité de rendement budgétaire ; en intégrant au mieux les externalités négatives dans les prix. Elle représente environ 2,4% du PIB en 2018 selon le Conseil des Prélèvements Obligatoires (2019). Les énergies sont soumises à deux types de fiscalité : (i) sur les volumes (la taxe intérieure sur la consommation des produits énergétiques [TICPE], la taxe intérieure sur la consommation de gaz naturel [TICGN], la taxe intérieure sur la consommation de charbon [TICC], la contribution au service public de l'électricité [CSPE], la taxe communale sur la consommation finale d'électricité [TCCFE] et la taxe départementale sur la consommation finale d'électricité [TDCFE]), et (ii) sur les prix (la taxe sur la valeur ajoutée [TVA] et la contribution tarifaire à l'acheminement [CTA] sur les tarifs d'utilisation du réseau électrique et gazier). La première fiscalité se décompose à son tour en deux composantes dans le cas des produits fossiles : une fiscalité purement énergétique et une fiscalité carbone dite « environnementale ». L'électricité ne contient qu'une fiscalité énergétique (les producteurs d'électricité étant par ailleurs soumis aux quotas CO₂).

⁷³ L'autorité publique possède d'autres instruments d'inflexion du comportement des agents, comme les subventions visant à diminuer le coût des investissements (massifs) favorables à la transition énergétique. C'est par exemple le cas des subventions au système électrique pour le développement des énergies renouvelables et les aides publiques à la rénovation thermique des bâtiments comme les crédits d'impôt.

Les recettes de la fiscalité environnementale sont entièrement consacrées à des dépenses en lien avec l'environnement, principalement au compte d'affectation spécial « Transition énergétique » depuis 2017. Une partie des taxes énergétiques (la TICPE principalement) est utilisée pour soutenir le développement des énergies renouvelables et des projets d'efficacité énergétique, et une autre partie (toutes les taxes énergétiques) est allouée au budget des autorités publiques. Anciennement financé par le compte « service public de l'énergie », le soutien public aux énergies renouvelables est désormais retracé dans le compte d'affectation spéciale « Transition énergétique » du budget de l'État. Le compte finance les charges des services publics engendrées par l'intégration des énergies renouvelables dans le système énergétique français, notamment les contrats d'achats des énergies renouvelables. Depuis 2017, il est alimenté à 99% par la taxe intérieure sur la consommation des produits énergétiques (TICPE) et à 1% par la taxe intérieure sur la consommation de charbon (TICC). Selon la Commission de Régulation de l'Énergie (2018), le montant du soutien aux énergies renouvelables est d'environ 5 372 millions d'euros pour 2018 (*cf.* annexe 2.A).

5.2. La fiscalité dans le modèle

Les taxes sont au nombre de cinq : la taxe sur la valeur ajoutée, la taxe sur les revenus du travail, la taxe sur les revenus du capital, la taxe sur l'électricité et la taxe sur l'énergie non-électrique. Dans le modèle, les taxes des énergies sont différenciées par secteur. La fiscalité de l'énergie est différente pour les ménages et l'entreprise à cause des différentes exonérations qui existent.

Les taxes sont fixées de manière exogène par le gouvernement et sont calibrées en partie à partir de la méthode de Mendoza, Razin et Tesar (1991), ce qui permet de prendre en compte les exonérations et dégrèvements⁷⁴. Ce schéma permet de capter plus de 86 % des recettes fiscales totales et 78 % des recettes fiscales environnementales (*cf.* **Tableau 2** et **Tableau 3** *infra*).

Taxe sur la valeur ajoutée	44.7%
Taxe sur les revenus du capital et du travail	24.2%
Taxe sur les revenus du capital	10.8%
TICPE	5.8%
Autres	14.5%

Tableau 2 Recettes fiscales 2018 (% des recettes totales) – Source : ministère de l'Action et des Comptes Publics, 2019

⁷⁴ Le Conseil des prélèvements obligatoires (2019) évalue les dépenses fiscales (essentiellement concentrées sur la TICPE), à partir des recettes des taxes environnementales, à 11 milliards d'euros environ en 2017.

TICPE	56.9%
TICGN	3.2%
CSPE	13.8%
TCFE	3.8%
Autres	22.3%

Tableau 3 Recettes fiscales environnementales 2018 (% des recettes totales) – Source : Conseil d’Orientation des Retraites (COR), 2019

5.3. Les taux effectifs de taxation

Mendoza, Razin et Tesar (1994) proposent une méthode de calcul des taux de taxation au niveau macroéconomique qui permet de prendre en compte l’ensemble des déductions, exemptions et crédits d’impôt appliqués aux différents consommateurs. La méthode permet alors d’avoir un taux qui correspond au taux moyen de taxation réalisé. Les données issues des bases de données de l’OCDE et de la DGEC permettent de calculer les taux.

Les taxes sur l’énergie ici font référence à la taxe sur l’électricité ; la CSPE principalement ; et à la taxe sur les produits énergétiques ; la TICPE et la TCGN. Les taxes sur l’électricité et l’énergie non-électrique sont des droits d’accises payés sur les quantités consommées, si bien que leur calcul ne peut suivre la méthode de Mendoza, Razin et Tesar (1994). L’annexe 2.D fournit le détail du calcul des taxes pour l’année 2018 et le **Tableau 4** fournit la valeur des taxes.

Les taux de taxation des entreprises est plus faible que ceux des ménages du fait des différentes exonérations qui existent pour les secteurs soumis au marché SEQE, aux secteurs du transport routier et de marchandise, aux secteurs exposés à la concurrence internationale et aux secteurs soumis au droit international (comme l’aviation). Le Conseil des Prélèvements Obligatoires (2019) relève que 36% des recettes de la fiscalité énergétique non-électrique sont reçues par les entreprises en 2018, et le reste par les ménages.

τ^c	Taux de taxation sur la valeur ajoutée (%)	0,185
τ^l	Taxe sur les revenus du travail (%)	0,482
τ^k	Taxe sur les revenus du capital (%)	0,310
$\tau^{el,h}$	Taxation de l’électricité pour les ménages (€/tep)	417,012
$\tau^{el,f}$	Taxation de l’électricité pour les entreprises (€/tep)	219,975
$\tau^{nel,h}$	Taxation de l’énergie non électrique (€/tep)	549,356
$\tau^{nel,f}$	Taxation de l’énergie non électrique (€/tep)	232,087

Tableau 4 Valeurs des instruments fiscaux exogènes en 2018 – Calculs de l’auteur à partir de données de la DGEC, de l’OCDE et des divers documents de la Cours des comptes

5.4. Finances publiques et règles fiscales

Dans les termes de Leeper (1991), comme il est standard dans la littérature, pour assurer la règle de l'équilibre budgétaire, l'autorité publique doit se doter d'au moins une politique « passive » en plus de politiques « actives ». Une politique fiscale « active » est une politique qui fixe ses instruments sans considération de l'équilibre budgétaire. La politique fiscale « passive » est celle qui fait l'ajustement pour assurer l'équilibre budgétaire entre les recettes et les revenus du gouvernement. Dans le modèle, la politique fiscale passive est le mécanisme de redistribution (négatif ou positif), PS_t , que met en place le gouvernement. Les différents taux de taxation, les dépenses publiques et les transferts sociaux sont des politiques actives dans le modèle. PS_t représente l'excédent budgétaire du gouvernement s'il est positif et le besoin de financement s'il est négatif. Il représente un transfert forfaitaire dans le premier cas et un impôt forfaitaire dans le deuxième cas. Il est supporté par les ménages.

Le modèle considère un mécanisme de redistribution uniquement dirigé vers les ménages, même si d'autres mécanismes de redistribution existent (cf. Partie III chapitre 4 pour une discussion). Ce choix est justifié par la recommandation du Conseil des prélèvements obligatoires (2019) d'utiliser une forme de redistribution de la fiscalité carbone entièrement vers les ménages. De plus, une partie de la littérature s'accorde sur ce point ; comme Jacobs et de Mooij (2015), Combet et Méjean (2017), Douenne (2019), Goulder et al. (2019), et Roach (2021). L'objectif principal de la redistribution forfaitaire de type « chèque climat » vers les ménages est de contrecarrer le caractère régressif de la fiscalité carbone.

Les exercices de simulation dans la Partie III et la Partie IV considèrent une évolution de la taxation de l'énergie non-électrique dans le temps. Fullerton et Monti (2013) soulignent l'importance d'ajouter une contrepartie à l'évolution de la fiscalité carbone, par ex. une compensation dégressive en fonction du niveau de revenu et du lieu d'habitation des ménages, comme préconisé par le Conseil des prélèvements obligatoires (2019), à l'évolution de la fiscalité carbone dans le but de diminuer l'effet distorsif causé et en conséquence atteindre la neutralité budgétaire des recettes. C'est ainsi le rôle de la variable PS_t .

La dette est volontairement laissée de côté comme chez Barro (1990), Glomm et Ravikumar (1994), et Cassou et Lansing (1998). Les auteurs avancent que le surplus primaire à lui seul est une bonne approximation des contraintes auxquelles font face un gouvernement pour emprunter de l'argent.

Les règles fiscales du gouvernement en termes réels sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
revenues_t = & \tau^c \cdot [X_t + I_t^d + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^h + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^h] \\
& + \tau_t^{el,h} \cdot El_t^h + \tau_t^{el,f} \cdot El_t^f + \tau_t^{nel,h} \cdot Nel_t^h + \tau_t^{nel,f} \cdot Nel_t^f + \tau^l \cdot w_t \cdot h_t \cdot L_t + \tau^k \cdot r_t \cdot K_t \\
& + \tau^k \cdot (\Pi_t + \Pi_t^{el} + \Pi_t^{network})
\end{aligned} \tag{34}$$

$$expenses_t = G_t + TR_t + sub_t^{el} + PS_t \tag{35}$$

$$revenues_t - expenses_t = 0 \tag{36}$$

Avec, τ^c le taux de taxation sur la consommation, X_t la consommation réelle de bien non-durables, I_t^d l'investissement réel en biens durables, $p_t^{el,h}$ le prix de gros de marché réel de l'électricité pour les ménages, $TURPE_t^h$ le tarif d'utilisation des réseaux publics de l'électricité réel versé par les ménages à l'opérateur de réseau, $\tau_t^{el,h}$ le taux de taxation réel de l'électricité pour les ménages, El_t^h la consommation d'électricité des ménages, $p_t^{nel,h}$ le prix détail réel *bors taxes* de l'énergie non-électrique pour les ménages, $\tau_t^{nel,h}$ le taux de taxation réel de l'énergie non-électrique pour les ménages, Nel_t^h la consommation d'énergie non-électrique des ménages, $\tau_t^{el,f}$ le taux de taxation réel de l'électricité pour l'entreprise, El_t^f la consommation d'électricité de l'entreprise, $\tau_t^{nel,f}$ le taux de taxation réel de l'énergie non-électrique pour l'entreprise, Nel_t^f la consommation d'énergie non-électrique de l'entreprise, τ^l le taux de taxation réel sur les revenus du travail, w_t le salaire réel, L_t le nombre d'employé, τ^k le taux de taxation réel sur les revenus du capital, r_t le taux de retour réel sur le capital, K_t le stock de capital de l'économie, G_t les dépenses publiques réelles en biens et services, TR_t les transferts sociaux réels vers les ménages⁷⁵, sub_t^{el} les subventions publiques réelles aux filières électriques subventionnées et PS_t l'instrument assurant l'équilibre budgétaire primaire.

6. L'évolution de la demande d'énergie dans le modèle : entre effet substitution, effet croissance et effet technologique

Le raisonnement prend en compte deux effets : (i) l'effet technologique, c'est-à-dire la comparaison du taux de croissance de l'efficacité énergétique au taux de croissance de l'économie et (ii) l'effet substitution, c'est-à-dire l'interaction entre les signaux prix, l'efficacité énergétique et l'élasticité de substitution. Les agents de l'économie peuvent diminuer leur consommation d'énergie grâce au *changement technologique* et/ou à l'augmentation des prix des énergies par *effet de substitution*.

Dans le modèle, la croissance est, entre autres, liée au changement technologique *energy-saving*. L'interaction entre les taux d'efficacité énergétique et le taux de croissance, appelé *effet technologique*, a un effet sur la consommation de long terme de l'énergie. Si le taux de croissance du progrès

⁷⁵ Ces transferts correspondent aux prestations sociales du gouvernement : maladie, invalidité, accidents du travail, vieillesse, survie, famille et maternité, emploi, logement et pauvreté/exclusion sociale.

énergétique (électrique par exemple) est supérieur au taux de croissance du progrès de l'économie, alors l'utilisation de l'énergie diminue sur le long terme. Ceci est le cas notamment pour l'énergie non-électrique qui voit son utilisation diminuer au fil du temps notamment grâce aux nouveaux usages - par ex. le développement du parc de véhicules électriques et de véhicules hybrides rechargeables, le développement du parc de cuisson et de chauffage électrique. Selon le modèle, le taux de croissance de la consommation des énergies suivent la spécification suivante⁷⁶,

$$g_t^{el} = \frac{g^l + g^n + g^l \cdot g^n - g_t^{ael}}{1 + g_t^{ael}} \quad (37)$$

$$g_t^{nel} = \frac{g^l + g^n + g^l \cdot g^n - g_t^{anel}}{1 + g_t^{anel}} \quad (38)$$

Avec, g_t^{el} le taux de croissance de la consommation d'électricité, g^l le taux de croissance de la productivité du travail, g^n le taux de croissance de la population employée, g_t^{ael} le taux de croissance de l'efficacité électrique, g_t^{nel} le taux de croissance de la consommation d'énergie non-électrique et g_t^{anel} le taux de croissance de l'efficacité de l'énergie non-électrique.

En plus de l'effet technologique, il existe un *effet substitution* entre les deux énergies notamment grâce à **l'interaction entre les prix relatifs et le progrès technologique relatif des deux énergies**. Tout d'abord, l'agent peut diminuer sa consommation d'électricité grâce au changement technologique. Pour savoir quel progrès technique *energy-saving* l'emporte sur l'autre, il faut étudier de près le produit marginal et l'élasticité de substitution. Par exemple, la productivité marginale relative des deux types d'énergie pour l'entreprise est la suivante,

$$\frac{p_t^{el,f} + TURPE_t^f + \tau_t^{el,f}}{p_t^{nel,f} + \tau_t^{nel,f}} = \frac{\eta_{el}}{(1 - \eta_{el})} \cdot \left(\frac{A_t^{el,f}}{A_t^{nel}} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} \cdot \left(\frac{El_t^f}{Nel_t^f} \right)^{-\frac{1}{\sigma_e^f}} \quad (39)$$

L'effet de l'efficacité électrique, $A_t^{el,f}$, sur le produit marginal relatif dépend de l'élasticité de substitution (Acemoglu, 2002). Si $\sigma_e^f > 1$ (substituabilité imparfaite entre les deux facteurs), une augmentation de l'efficacité électrique, $A_t^{el,f}$, relativement à l'efficacité non-électrique, A_t^{nel} , augmente le produit marginal du facteur électrique, El_t^f , et donc sa demande relative. Dans ce cas

⁷⁶ Sachant que l'énergie efficace croît au taux de croissance de l'économie, on a :

$$\begin{aligned} \frac{A_t^{el} \cdot El_t}{A_{t-1}^{el} \cdot El_{t-1}} - 1 &= \frac{\overbrace{A_t^{el} \cdot N_t}^{\text{taux de croissance de l'économie}}}{A_{t-1}^{el} \cdot N_{t-1}} - 1 \\ \Leftrightarrow \frac{(1 + g_t^{ael}) \cdot A_{t-1}^{el} \cdot El_t}{A_{t-1}^{el} \cdot El_{t-1}} &= 1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n \end{aligned}$$

Alors, le taux de croissance de la consommation d'électricité est : $g_t^{el} = \frac{1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n}{(1 + g_t^{ael})} - 1$.

le changement technologique *energy-saving* est dit *electricity-biased* et va favoriser l'utilisation du dernier. Si $\sigma_e^f < 1$ (complémentarité imparfaite entre les deux facteurs), une augmentation de $A_t^{el,f}$ relativement à A_t^{nel} augmente relativement plus la demande pour Nel_t^f que la demande de El_t^f , créant un excès de demande. Par conséquent, le produit marginal de Nel_t^f augmente relativement plus que le produit marginal de El_t^f . En effet, avec une quantité identique d'électricité, on peut produire plus d'output, mais à condition d'augmenter la quantité d'énergie non-électrique à cause de la propriété de complémentarité. Dans ce cas, le changement technologique *energy-saving* est dit *fuel-biased*.

7. Fermeture du modèle

Les ménages prennent des décisions de consommation et d'investissement sous contrainte budgétaire dans le but d'optimiser leur utilité étant donnés les prix. Les entreprises prennent des décisions de production en choisissant le niveau optimal de capital, de travail et d'énergie étant donnés les prix sous contrainte technologique. L'autorité publique décide des taxes à collecter et des dépenses publiques sous contrainte budgétaire. Au niveau agrégé, l'économie doit satisfaire la contrainte de ressources agrégée en termes réels suivante⁷⁷ :

$$\begin{aligned}
 & Output_t + p_t^{el} \cdot \sum_{techno,hours} Y_{j,h,t}^{el} \\
 & \quad = \\
 & X_t + I_t^d + p_t^{el,h} \cdot El_t^h + G_t + I_t^k + p_t^{el,f} \cdot El_t^f + \sum_{techno} Costs\left(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el}\right) \\
 & \quad + GridCosts_t + Exp_t
 \end{aligned} \tag{40}$$

Avec, $Output_t$ la production réelle de l'économie, $p_t^{el} \cdot \sum_{techno,hours} Y_{j,h,t}^{el}$ les revenus de marché réels du système électrique français, X_t la consommation réelle de biens non-durables des ménages, I_t^d l'investissement réel en biens durables des ménages, $p_t^{el,h} \cdot El_t^h$ la consommation d'électricité des ménages au prix de gros réel, G_t les dépenses publiques réelles, I_t^k l'investissement réel en capital physique, $p_t^{el,f} \cdot El_t^f$ la consommation d'électricité de l'entreprise au prix de gros réel, $\sum_{techno} Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el})$ les coûts totaux annualisés du système électrique, $GridCosts_t$ les coûts totaux du réseau de transport et de distribution d'électricité, et Exp_t les exportations du bien générique (ou les importations d'énergie non-électrique au prix de gros réel de l'énergie non-électrique).

⁷⁷ La contrainte de ressource provient de l'agrégation de la contrainte du ménage, du profit de l'entreprise représentative, du profit du système électrique et de la contrainte de l'autorité publique.

Comme chez Kilian (2008), le modèle considère qu'une augmentation du prix de l'énergie importée ou de la demande d'importation d'énergie non-électrique diminue le revenu de l'économie, et que la perte de revenu domestique est recyclée par des exportations plus élevées vers l'étranger pour écouler la production non vendue sur le territoire domestique. Par conséquent, les exportations de l'économie égalisent les importations en énergie non-électrique pour fermer correctement le modèle, de telle sorte à avoir une balance commerciale nulle en termes réels :

$$Exp_t = p_t^{nel,f} \cdot Nel_t^f + p_t^{nel,h} \cdot Nel_t^h \quad (41)$$

Enfin, le marché du travail vérifie l'égalité entre la demande du facteur travail de l'entreprise et l'offre de travail du ménage,

$$N_t = h_t \cdot L_t \quad (42)$$

CHAPITRE 4. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE

La partie est la dernière étape avant la simulation du modèle. La première section calibre certains paramètres ; notamment les taux de croissance et les paramètres de distribution ; afin que le modèle reproduise les grands ratios de l'économie française pour l'année 2018. Et, la deuxième section estime les paramètres de substitution.

1. Calibration des paramètres hors élasticités de substitution

Dans le but d'obtenir des simulations fiables, il faut pouvoir reproduire les observations de croissance de l'économie française sur le passé. Les paramètres sont fixés de telle sorte à correspondre aux caractéristiques d'une économie mesurées par les comptes nationaux. Les paramètres du modèle sont fixés à partir des équations de premier ordre (*cf.* annexes 2.G et 2.H) et des données sur les grands ratios provenant des comptes nationaux (*cf.* **Tableau 5** *infra*). Et, il convient de s'assurer que le capital, l'investissement, le PIB, la consommation et les dépenses publiques conçus dans le modèle sont conformes à leur mesure et conceptualisation dans les comptes nationaux français (*cf.* annexe 2.E). Le **Tableau 6** suivant donne la valeur des paramètres.

1.1. Les principaux ratios de l'économie française

La valeur des paramètres de distribution est calculée à partir des équations de premier ordre et des grands ratios. Le lecteur trouvera dans l'annexe 2.I le détail des calculs et dans le **Tableau 5** ci-après la valeur ces grands ratios à reproduire sur le long terme.

Couramment, les paramètres sont construits de manière à reproduire les moyennes de long terme des ratios. Néanmoins, le modèle est calibré sur l'année 2018. La cause en est attribuée à la présence de tendance dans certains ratios. Cela concerne principalement les ratios composés des variables de stock et énergétiques. En outre, l'année 2018 est considérée comme l'état initial du modèle car elle est caractérisée par un écart d'activité très faible et une année peu cyclique. Enfin, la valeur des grands ratios en 2018 est très proche de la valeur moyenne des grands ratios sur le long terme, excepté pour les ratios ayant une tendance. Cela vérifie que l'économie française se situe à peu près le long de son sentier de croissance régulier en 2018.

1.2. Le taux de croissance de l'économie et de l'efficacité énergétique

La thèse assume que les taux de croissance sont constants, à part pour l'efficacité énergétique. Cela n'est pas dérangeant car le taux de croissance démographique et le taux de croissance de la productivité horaire du travail sont relativement stables dans le temps.

Pour reproduire le scénario central de l'Insee, le taux de croissance annuel moyen de la population active est fixé à 0,201%.

Sur données du Conseil d'Orientation des Retraites (COR) et du DG Trésor, le taux de croissance annuel moyen de la productivité horaire dans les quatre scénarios établis par le COR sont compris entre 1,05 % et 1,44 % sur la période 2018-2035. La moyenne des quatre scénarios considérés par le COR⁷⁸, et dans le modèle, sur la période 2017-2035 est de 1,25%.

RATIO	2018
Investissement en capital physique – Stock de capital	0,0395
Investissement en capital physique – Valeur ajoutée brute	0,1972
Dépenses annuelles du système électrique – Valeur ajoutée brute	0,0137
Consommation d'électricité des secteurs d'activité – Valeur ajoutée brute	1,1000 ^{e-5}
Consommation de fuel des secteurs d'activité – Valeur ajoutée brute	2,3400 ^{e-5}
Revenus du capital – Revenus totaux de l'économie	0,3742
Valeur ajoutée brute – Stock de capital	0,2002
Valeur ajoutée brute par unité d'heure efficace travaillée	53,3967
Valeur ajoutée brute – Output agrégé	0,9741
Dépenses en énergie de l'entreprise – Output agrégé	0,0266
Output agrégé- Consommation en énergie de l'entreprise	29886,7001
Dépenses en fuel de l'entreprise – Dépenses totales en énergie	0,6005
Consommation en fuel de l'entreprise – Consommation totale en énergie	0,6812
Dépenses en fuel du ménage – Dépenses totales en énergie	0,6944
Consommation en fuel du ménage – Consommation totale en énergie	0,7437
Consommation en énergie du ménage – Investissement en biens durables	0,0005
Consommation en énergie du ménage – Consommation de biens non-durables	4,9680 ^{e-5}
Dépenses en biens et services du gouvernement – Valeur ajoutée brute	0,2695
Transferts sociaux – Valeur ajoutée brute	0,2564
Subventions publiques aux filières électriques subventionnées – Valeur ajoutée brute	0,0023

Tableau 5 Valeurs des principaux ratios à reproduire – Calculs de l'auteur

Selon la définition du DG Trésor, la croissance potentielle est déterminée par l'augmentation de la main d'œuvre disponible et le progrès technique⁷⁹. Sachant les taux de croissance de la population active et le taux de la productivité horaire du travail, la calibration du modèle retient un taux de croissance moyen annuel du potentielle de 1,4535 %.

⁷⁸ Sur la plage temporelle 1985-2018 et en 2018, le taux de productivité horaire est de 1,5%. La productivité par personne employée est en moyenne de 1,2% sur 1985-2018.

⁷⁹ Dans le modèle, le taux de croissance de l'output de l'économie est égal à la somme du taux de croissance du progrès technique *labor-saving* et du taux de croissance de la population active.

Le taux de croissance de l'efficacité énergétique non-électrique annuel correspond à la moyenne arithmétique des taux de croissance d'efficacité énergétique (hors électricité) sur données françaises de 1985 à 2018. La forme retenue pour le calcul est la suivante (cf. équations 37 et 38 *supra*) :

$$g_t^{anel} = (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n) \cdot \frac{Nel_{t-1}}{Nel_t} - 1 \quad (43)$$

Pour les secteurs d'activité (tertiaire, agricole, industriel et transport), la moyenne arithmétique est de 2,05 %, et pour les ménages elle est de 2,09 %. La thèse retient un taux commun de 2,07%⁸⁰.

PARAM.	DESCRIPTION	VALEUR
β	Taux d'actualisation	0,9953
δ^d	Taux de dépréciation des biens durables	0,0860
δ^k	Taux de dépréciation du capital physique	0,0249
α_x	Distribution des biens non-durables dans la consommation agrégée	0,8497
α_d	Distribution des biens durables dans la production des services énergétiques	0,9772
α_{el}	Distribution de l'électricité dans la consommation d'énergie agrégée	0,4667
α_{nel}	Distribution de l'énergie non-électrique dans la consommation d'énergie agrégée	0,7570
ω	Part des ménages ricardien dans l'économie	0,7900
α_y	Distribution du composite travail-capital dans la production de l'output agrégé	0,9742
η_e	Distribution de l'énergie agrégée dans la production de l'output agrégé	0,0277
α_k	Distribution du facteur capital dans le composite travail-capital	1,0511
α_n	Distribution du facteur travail dans le composite travail-capital	0,0487
η_{el}	Distribution de l'électricité dans l'imbrication "énergie"	0,1365
η_{nel}	Distribution de l'énergie non-électrique dans l'imbrication "énergie"	0,4253
σ	Élasticité de substitution intertemporelle	1,5000
σ_c	Élasticité de substitution entre les biens non-durables et les services énergétiques	1,0000
σ_{es}	Élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie	0,7500
σ_e^h	Élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique des ménages	1,4560
σ_o	Élasticité de substitution entre le composite travail-capital et le composite énergie	1,0064
σ_y	Élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail	0,6090
σ_e^f	Élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique de l'entreprise	0,5130
ϑ	Paramètre d'ajustement des investissements en capital	2,7000

Tableau 6 Valeur des paramètres du modèle

Le taux de croissance de l'efficacité électrique est calculé de 2018 à 2035 à partir des trajectoires de consommation d'électricité hors effet volume de Rte pour le scénario Ampère et le scénario

⁸⁰ Henriët, Maggiar et Schubert (2014) estiment, via une relation de cointégration à la Ogaki et Reinhart (1998) sur données françaises de 1959 à 2010, un taux d'efficacité énergétique à 1,6%/an pour les ménages et à 2,4%/an pour les entreprises. Ils retiennent dans leur modèle un taux moyen d'efficacité énergétique de 2%/an.

Volt. Le taux d'efficacité énergétique englobe les nouveaux usages et les efforts de maîtrise de la demande d'énergie. Comme les effets volumes (croissance économique et croissance démographique) ne sont pas pris en compte, le taux d'efficacité énergétique est calculé à partir de l'équation suivante (*cf.* équation 37 pour le calcul du taux de l'efficacité électrique avec effet volume) :

$$g_t^{ael} = \frac{EL_{t-1}}{EL_t} - 1 \rightarrow EL_t = \frac{EL_{t-1}}{1 + g_t^{ael}} \quad (44)$$

Les taux calculés (*cf.* annexe 2.C) permettent de reproduire les trajectoires de consommation de Rte hors effet volume **en l'absence d'effet de substitution entre l'énergie électrique et l'énergie non-électrique dû au bouclage macroéconomique.**

2. Estimation des élasticités de substitution intratemporelle

La magnitude des élasticités de substitution entre facteur est particulièrement importante pour expliquer les changements dans la distribution du revenu entre les facteurs et la croissance de long terme. Par exemple, Atkeson et Kehoe (1999) montrent, en perturbant l'économie d'une augmentation de la taxe sur l'énergie, que la réponse de l'énergie et du capital dépend de la magnitude des élasticités de substitution. Aussi, Papageorgiou, Saam et Schulte (2017) montrent l'influence de ces élasticités sur les résultats en matière de croissance sur le long terme. Saunders (1992) met aussi en avant l'importance du choix du type de fonction de production et de son imbrication dans l'explication des chocs énergétiques.

2.1. Méthodologie d'estimation

Les paramètres de substitution des fonctions *Constant Elasticity of Substitution* (CES) ne peuvent pas être estimés par les techniques standards de régression linéaire, car les fonctions CES à l'état brute ne sont pas linéaires en leurs paramètres. L'estimation des élasticités de substitution suivent la méthodologie de Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010), et Klump, McAdam et Willman (2012) qui consiste à régresser système d'équations non-linéaires normalisées. Le système d'équation est composé des deux fonctions linéaires de demandes relatives des facteurs de production (ou des biens de consommation), et de la fonction non-linéaire qui agrège les facteurs de production (ou les biens de consommations). Les auteurs montrent qu'une estimation à partir d'une seule équation de régression est inférieure à une estimation à partir d'un système d'équation normalisées à la Klump et de La Grandville (2000). Notamment, l'approche permet de prendre en compte le progrès technique biaisé vers un facteur, contrairement aux techniques standard qui ne prennent en compte que le progrès technique neutre à la Hicks.

L'estimation va consister à régresser trois équations normalisées simultanément. Les paramètres de substitution (et de distribution) vont être estimés par des contraintes inter-équations de telle sorte à ce que les paramètres aient la même valeur pour chaque équation. Le point de normalisation des équations correspond aux moyennes arithmétiques pour les paramètres de distribution et aux moyennes géométriques pour les facteurs de production, comme chez Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010), et Klump, McAdam et Willman (2012).

Vu le nombre faible d'observations et la littérature macroéconométrique (*cf.* Léon-Ledesma, McAdam et Willman [2010], et Klump, McAdam et Willman [2012]) le système non-linéaire est régressé à partir de l'estimateur *Iterative Non-Linear Seemingly Unrelated Regression*.

2.2. L'estimation des paramètres de substitution de la technologie de production

L'élasticité de substitution entre le travail et le capital est estimée sur la plage temporelle 1978-2018 à partir des données OCDE.

Les élasticités de substitution entre le composite travail-capital et le composite « énergie efficace » d'une part, et entre l'électricité et l'énergie non-électrique d'autre part, sont estimées de 1985-2018 par manque de données. Les données sur les rémunérations relatives des facteurs de production (données comptes nationaux et DGEC) correspondent aux valeurs nominales, et les données sur les facteurs de production en niveau correspondent aux valeurs réelles en base 2014. Commencer à partir de 1985 pour les imbrications comportant l'énergie est de plus judicieux, car il permet de mettre de côté les deux chocs pétroliers. Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010) notent que pour un nombre d'échantillon faible (mais supérieur à 30), les estimations peuvent être fiables et robustes.

2.2.1. Estimation de l'élasticité de substitution entre les composites travail-capital et énergie efficace

L'élasticité de substitution entre le composite travail-capital, Y_t , et le composite « énergie efficace », E_t^f , est estimée à partir du système d'équation non-linéaire suivant :

$$\log\left(\frac{p_t^y \cdot Y_t}{p_t^o \cdot Output_t}\right) = \log(\bar{\omega}_y) + \frac{1 - \sigma_o}{\sigma_o} \cdot \left[\log\left(\frac{\frac{Output_t}{\bar{Output}}}{\frac{Y_t}{\bar{Y}}}\right) - \log(\xi) \right] + a_t \quad (45)$$

$$\log\left(\frac{p_t^{e,f} \cdot E_t^f}{p_t^o \cdot Output_t}\right) = \log(1 - \bar{\omega}_y) + \frac{1 - \sigma_o}{\sigma_o} \cdot \left[\log\left(\frac{\frac{Output_t}{\bar{Output}}}{\frac{E_t^f}{\bar{E}^f}}\right) - \log(\xi) \right] + b_t \quad (46)$$

$$\log \left(\frac{\text{Output}_t}{\overline{\text{Output}}} \right) = \log(\xi) + \frac{\sigma_o}{\sigma_o - 1} \cdot \log \left(\varpi_y \cdot \left(\frac{Y_t}{\bar{Y}} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}} + (1 - \varpi_y) \cdot \left(\frac{E_t^f}{\bar{E}^f} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}} \right) + c_t \quad (47)$$

Avec, ϖ_y le paramètre de distribution normalisé et reparamétré (pour une explication sur la reparamétrisation des paramètres de distribution, cf. annexe 2.G), σ_o l'élasticité de substitution, ξ une constante de normalisation⁸¹, $(\overline{\text{Output}}, \bar{Y}, \bar{E}^f)$ les points de normalisation de l'output, du composite travail-capital, et du composite « énergie efficace », et (a_t, b_t, c_t) des bruits blancs. L'élasticité est estimée à partir des deux premières équations de régression. Par soucis de multicollinéarité, La troisième équation de régression est laissée volontairement de côté.

Le **Tableau 7** présente les résultats de l'estimation. Sur le long terme, l'élasticité est supérieure à 1 comme chez Papageorgiou, Saam et Schulte (2017). Néanmoins, le test de Wald indique que l'élasticité est non-significativement différente de 1. Par conséquent, la thèse retient une spécification *Cobb-Douglas* pour la technologie de production de l'output.

Par mesure de robustesse, le modèle sera simulé avec une élasticité de 0,4 dans la Partie III, comme Paltsev et al. (2005), Bosetti et al. (2006), Bohringer et Rutherford (2008), et van der Werf (2008).

	Residual diagnostic tests			Coefficient test
	Coefficient	Portmanteau test	Unit root test	Wald test H0 : $\sigma_o = 1$
σ_o	1.0064 (0.0000)	No autocorrelation	ADF-Fischer 28.107 (0.000) Levin Lin & Chu -4.937 (0.000)	1.9552 (0.1620)
ϖ_y	0.9710 (0.0000)			
ξ	0.9911 (0.0000)			

Tableau 7 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution entre les deux facteurs de production agrégés de l'entreprise

2.2.2. Estimation de l'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail

L'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail du composite travail-capital est estimée à partir du système d'équation non-linéaire suivant :

⁸¹ Comme chez Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010), et Klump, McAdam et Willman (2012), la constante de normalisation correspond à un paramètre d'échelle permettant de corriger les soucis que peut causer le choix du point de normalisation pour une fonction non-linéaire. Par exemple, en prenant comme point de normalisation la moyenne géométrique des séries temporelles, il peut exister une différence entre la moyenne géométrique de l'output et le niveau d'output obtenu à partir de la moyenne géométrique des facteurs de production. La valeur du point de normalisation attendue est autour de 1. Une valeur de 1 indique que la spécification de la fonction est de type Cobb-Douglas, et la moyenne géométrique des inputs, \bar{E}^f et \bar{Y} , correspond exactement à la moyenne géométrique de l'output, $\overline{\text{Output}}$, au point de normalisation.

$$\log \left(\frac{r_t \cdot K_t}{p_t^y \cdot Y_t} \right) = \log(\varpi_k) + \frac{1 - \sigma_y}{\sigma_y} \cdot \left[\log \left(\frac{Y_t}{\bar{Y}} \right) - \log(\zeta) \right] + d_t \quad (48)$$

$$\log \left(\frac{w_t \cdot N_t}{p_t^y \cdot Y_t} \right) = \log((1 - \varpi_k)) + \frac{1 - \sigma_y}{\sigma_y} \cdot \left[\log \left(\frac{Y_t}{\bar{Y}} \right) - F - \log(\zeta) \right] + e_t \quad (49)$$

$$\log \left(\frac{Y_t}{\bar{Y}} \right) = \log(\zeta) + \frac{\sigma_y}{\sigma_y - 1} \cdot \log \left(\varpi_k \cdot \left(\frac{K_t}{\bar{K}} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}} + (1 - \varpi_k) \cdot \left(\exp^F \cdot \frac{N_t}{\bar{N}} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}} \right) + f_t \quad (50)$$

Avec, ϖ_k le paramètre de distribution normalisé et reparamétré (pour une explication sur la reparamétrisation des paramètres de distribution, cf. annexe 2.G), σ_y l'élasticité de substitution, ζ la constante de normalisation, $(\bar{K}, \bar{L}, \bar{Y})$ les points de normalisation du facteur capital, du facteur travail et du composite travail-capital, F la série modélisant le progrès technique *labor-saving*, et (d_t, e_t, f_t) des bruits blancs.

Comme Becker, Enders et Lee (2006), le progrès technique *labor-saving* est modélisé sur le schéma des séries de Fourier (cf. équations 51 à 52 *infra*). Le progrès technique possède une composante déterministe, D , et une composante fréquentielle, $H(k)$. La composante fréquentielle correspond à un ensemble de ruptures captées par les séries de Fourier (cf. équation 52 *infra*). En effet, depuis 1978, le progrès technique est perturbé par plusieurs ruptures, notamment les épisodes de récession, la diminution de la durée de Travail sous Lionel Jospin et l'arrivée d'internet. Les auteurs, parmi d'autres (par ex. Gallant [1984]), soulignent qu'une telle approximation permet de capter le comportement d'une fonction même si elle n'est pas périodique. Le raisonnement est le suivant :

$$F = D + H(k) \quad (51)$$

$$D = g^l \cdot (t - \bar{t}) \quad (52)$$

$$H(k) = \kappa_{cos,l} \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot k \cdot t \right) + \kappa_{sin,l} \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot k \cdot t \right), k = 1, \dots, n < \frac{T}{2} \quad (52)$$

Avec, D la composante déterministe, $H(k)$ est l'harmonique de rang k qui découle de l'approximation de Fourier, g^l le taux de croissance du progrès technique *labor-saving*, n est le nombre de fréquences contenues dans l'approximation, T correspond au nombre d'observations de la série temporelle, \bar{t} la moyenne de la plage temporelle, k une fréquence unique, et $\kappa_{sin,l}$ et $\kappa_{cos,l}$ les coefficients de Fourier pour le progrès technique *labor-saving*. L'approximation de la fonction est améliorée en augmentant le nombre de fréquence k . Néanmoins, une fréquence maximale de 2 est conseillée avec des petits échantillons et des données agrégées (cf. Becker, Enders

et Lee [2006]). La fréquence ayant la plus petite somme des carrés résiduels est choisie pour les exercices d'estimation. Un test de Wald sur les coefficients de Fourier permet de vérifier que l'approximation de Fourier est la bonne pour l'étude du progrès technique *labor-saving*.

Par mesure de robustesse, sur le schéma de Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010), et Klump, McAdam et Willman (2012), l'élasticité de substitution est aussi estimée à partir d'une transformation à la *Box-Cox* du progrès technique *labor-saving*. La transformation à la *Box-Cox* suppose que le progrès technique *labor-saving* n'est pas constant dans le temps. La transformation est la suivante :

$$F = \bar{t} \cdot \frac{g^l}{\lambda} \cdot \left[\left(\frac{t}{\bar{t}} \right)^\lambda - 1 \right] \quad (54)$$

Avec, g^l le taux de croissance du progrès technique *labor-saving*, λ le paramètre de courbure de la fonction du progrès technique *labor-saving* et \bar{t} la moyenne de la plage temporelle. Le paramètre est égal à 1 si le progrès technique est linéaire, et donc le taux de croissance est constant dans le temps. Le paramètre est inférieur à 0 si le progrès technique est hyperbolique. Tandis qu'il est égal à 0 s'il est log-linéaire.

Les estimations (cf. **Tableau 8** *infra*) sont cohérentes avec la vraie valeur de la part du capital dans le revenu de l'économie sur 1978-2018 qui est de 0,362, et celle de la productivité horaire du travail qui est de 0,0175 selon les données du Conseil d'Orientation des Retraites sur la période. Par ailleurs, quelle que soit la forme mathématique du progrès technique choisie (séries de Fourier vs transformation à la *Box-Cox*), l'élasticité se concentre autour de 0,60. Enfin, les deux tests de Wald vérifient que le progrès technique *labor-saving* est mieux représenté par une spécification non-linéaire et que la spécification *Cobb-Douglas* est rejetée.

L'estimation de l'élasticité de substitution entre le capital et le travail vient ajouter une vérification empirique en plus à la littérature. Depuis la fin des années 1990, nombreux sont les économistes à rejeter statistiquement la forme Cobb-douglas pour les études de long terme. Notamment, les critiques sont : (i) Blanchard (1997), Acemoglu (2003), Caselli et Coleman (2006), Aiyar and Dalgaard (2009), Chirinko (2008) et Klump, McAdam et Willman (2012) sur le plan théorique ; (ii) Antràs (2004), Koetse, de Groot et Florax (2008), Van der Werf (2008), Léon-Ledesma, Willman et McAdam (2010), Mućk (2017), Léon-Ledesma et Saatchi (2019) et Raval (2019) sur le plan empirique ; et (iii) Duffy et Papageorgiou (2000), Stern et Cleveland (2004), Edenhofer, Bauer et Kriegler (2005), et Hassler, Krussel et Olovsson (2012) sur les aspects environnementaux. Alors, les économistes de long terme se détachent des fonctions *Cobb-Douglas* pour privilégier les fonctions *CES* et une élasticité de substitution inférieur à 1 entre le facteur travail et le facteur capital.

L'intervalle des estimations de l'élasticité de substitution entre le facteur travail et le facteur capital dans la littérature est [0,4 ; 0,8]. Empiriquement, il est compliqué de trancher sur la vraie valeur de l'élasticité car ce sont des estimations ponctuelles qui font appel à des données différentes, des plages temporelles différentes, un niveau de désagrégation différent, des modèles différents mais aussi des estimateurs différents.

	Fourier transformation	Box-Cox transformation	
	$k = 1$	<i>No-fixed value</i>	$\lambda = 0.5$
σ_y	0.609 (0.0000)	0.598 (0.0000)	0.633 (0.0000)
ω_k	0.384 (0.0000)	0.385 (0.0000)	0.392 (0.0000)
ζ	1.002 (0.0000)	1.031 (0.0000)	1.016 (0.0000)
g^l	0.016 (0.0000)	0.016 (0.0000)	0.014 (0.0000)
$\kappa_{sin,l}$	0.001 (0.0960)	-	-
$\kappa_{cos,l}$	-0.078 (0.0013)	-	-
λ	-	-0.182 (0.0090)	-

Residual diagnostic tests		Coefficient test	
<i>Portmanteau test</i>	<i>Unit root test</i>	<i>Wald test</i> $H0 : \kappa_{sin,l} = \kappa_{cos,l} = 0$	<i>Wald test</i> $H0 : \sigma_o = 1$
No autocorrelation	<i>ADF-Fischer</i> 74.47 (0.0000) <i>Levin Lin & Chu</i> -8.66 (0.0000)	12.91 (0.0016)	5571.58 (0.0000)

Tableau 8 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution entre le facteur travail et le facteur capital

2.2.3. Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les secteurs d'activité

L'élasticité de substitution inter-énergie pour l'entreprise est estimée à partir du système d'équation non-linéaire suivant :

$$\log \left(\frac{(p_t^{nel,f} + \tau_t^{nel,f}) \cdot Nel_t^f}{p_t^{e,f} \cdot E_t^f} \right) = \log(1 - \omega_{el}^f) + \frac{1 - \sigma_e^f}{\sigma_e^f} \cdot \left[\log \left(\frac{E_t^f}{E^f} \right) - \log \left(\frac{Nel_t^f}{Nel^f} \right) - U - \log(\vartheta) \right] + g_t \quad (55)$$

$$\log \left(\frac{(p_t^{el,f} + TURPE_t^f + \tau_t^{el,f}) \cdot El_t^f}{p_t^{e,f} \cdot E_t^f} \right) = \log(\varpi_{el}^f) + \frac{1 - \sigma_e^f}{\sigma_e^f} \cdot \left[\log \left(\frac{E_t^f}{E^f} \right) - \log \left(\frac{El_t^f}{El^f} \right) - Z - \log(\vartheta) \right] + h_t \quad (56)$$

$$\log \left(\frac{E_t^f}{E^f} \right) = \log(\vartheta) + \frac{\sigma_e^f}{\sigma_e^f - 1} \cdot \log \left(\varpi_{el}^f \cdot \left(\exp^Z \cdot \frac{El_t^f}{El^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} + (1 - \varpi_{el}^f) \cdot \left(\exp^U \cdot \frac{Nel_t^f}{Nel^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} \right) + i_t \quad (57)$$

Avec, ϖ_{el}^f le paramètre de distribution normalisé et reparamétré (pour une explication sur la reparamétrisation des paramètres de distribution, cf. annexe 2.G), σ_e^f l'élasticité de substitution, U et Z les transformations mathématiques de l'efficacité énergétique, ϑ la constante de normalisation, $(\overline{Nel^f}, \overline{El^f}, \overline{E^f})$ les points de normalisation de l'énergie non-électrique, de l'électricité et du composite « énergie efficace », et (g_t, h_t, t_t) des bruits blancs.

L'élasticité de substitution inter-énergie de l'entreprise est estimée à partir de deux formes du progrès technique, une transformation à la Fourier et une transformation à la Box-Cox (pour une explication détaillée de la méthodologie, cf. section 2.2.2 ci-avant).

Pour l'imbrication (*Électricité – Énergie non-électrique*), la valeur estimée vérifie l'intuition selon laquelle les énergies sont imparfaitement complémentaires (cf. **Tableau 9** *infra*). Toutes les estimations donnent une élasticité inférieure à 1. La cause peut être attribuée aux coûts d'investissement élevés des entreprises et aux forts coûts d'ajustement qui font que le capital physique est difficilement ajustable. Certains auteurs fixent cette élasticité à une valeur inférieure à 1 ; notamment Goulder et Schneider (1999), Stern (2012)⁸², Malikov, Sun et Kumbhakar (2018)⁸³ et les modèles EPPA, Witch et Némésis. D'autres la fixe à une valeur supérieure à 1 ; notamment, Gerlagh et der Zwaan (2003), Popp (2004), Bohringer et Rutherford (2008), Bruniaux et Martins (2012), Stern (2012), et Papageorgiou, Saam et Schulte (2017) au niveau macroéconomique. Les modèles Némésis et Three-ME calibrent les élasticités de substitution inter-énergie inférieure à 1. La valeur retenue pour l'élasticité de substitution inter-énergie de l'entreprise est 0,513. La littérature étant divergente sur le sujet, un exercice de robustesse sera fait en prenant en compte une élasticité supérieure à 1.

⁸² Au niveau macroéconomique, l'élasticité de substitution moyenne entre le pétrole et l'électricité est de 0.683 et entre le gaz et l'électricité est de 1,194.

⁸³ Malikov, Sun et Kumbhakar (2018) estiment une fonction CES de type KLEM pour un secteur industriel agrégé (hors énergie) sur données allant de 1995-2009 pour les pays de l'U.E. et les États-Unis. L'estimation se base sur les méthodes non-paramétriques. Ils trouvent que pour deux-tiers de l'échantillon, la valeur de l'élasticité est inférieure à 1.

	Frontier transformation	Box Cox transformation	
	$k = 1$	<i>No-fixed value</i>	$\lambda = 0.5$
σ_e^f	0.513 (0.0000)	0.740 (0.0000)	0.521 (0.0000)
ϖ_{el}^f	0.376 (0.0000)	0.338 (0.0000)	0.327 (0.0000)
ϑ	1.001 (0.0000)	0.999 (0.0000)	0.999 (0.0000)
g^{ael}	-0.007 (0.0064)	-0.014 (0.0205)	-0.020 (0.0018)
g^{anel}	0.003 (0.0553)	0.006 (0.0395)	0.009 (0.0015)
$\kappa_{sin,ael}$	-0.069 (0.0224)	-	-
$\kappa_{cos,ael}$	-0.080 (0.0000)	-	-
$\kappa_{sin,anel}$	0.046 (0.0132)	-	-
$\kappa_{cos,anel}$	0.048 (0.0002)	-	-
λ_{ael}	-	-0.503 (0.0346)	-
λ_{anel}	-	-0.523 (0.0498)	-

Residual diagnostic tests		Coefficient test	
<i>Portmanteau test</i>	<i>Unit root test</i>	<i>Wald test</i> $H_0 : \kappa_{sin} = \kappa_{cos} = 0$	<i>Wald test</i> $H_0 : \sigma_e^f = 1$
No autocorrelation	<i>ADF-Fischer</i> 67.32 (0.0000) <i>Levin Lin & Chu</i> -8.17 (0.0000)	28.00 (0.0000)	93.27 (0.0000)

Tableau 9 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution inter-énergie de l'entreprise

La section suivante estime que l'élasticité de substitution inter-énergie pour les ménages est relativement plus élevée que celle des entreprises. Il existe deux raisons principales qui justifient ce résultat. Tout d'abord, les coûts irrécupérables et la somme initialement investie dans la technologie interagissant avec l'énergie - le capital physique pour les entreprises et les biens durables pour les ménages – jouent un rôle plus important pour les entreprises que pour les ménages. Par conséquent, les entreprises changent moins facilement de type énergie dans leur processus de production car la technologie utilisée est relativement plus onéreuse. Par ailleurs, les agents renouvellent plus souvent leurs technologies car la durabilité des biens durables est relativement plus faible que la durabilité du capital physique (*cf.* annexe 2.E). Le taux d'amortissement des technologies utilisées par les entreprises est plus faible que celui des ménages. Les biens durables ont une durée de vie en moyenne d'une dizaine d'années alors que le capital physique a une durée de vie d'une vingtaine d'année.

2.3. L'estimation des paramètres de substitution de la fonction de consommation

Ici, seules les élasticités de substitution de la spécification (*Électricité - Énergie non-électrique*) et (*Biens Durables – Énergie efficace*) sont estimées. L'élasticité de substitution de la fonction CES (*Services énergétiques – Biens non-durables*) ne peut être estimée par manque de données sur la variable « services énergétiques ». L'imbrication est supposée être de type Cobb-Douglas. La spécification Cobb-Douglas est d'abord démontrée par Ogaki et Reinhart (1998) sur données agrégées américaines⁸⁴. Ogaki et Reinhart (1998) trouvent une élasticité de 1,167 non significativement différente de 1 à 5%. Ce résultat est utilisé récemment par Dhawan et Jeske (2008), Fernandez-Villaverde et Krueger (2011), et Henriët, Maggiar et Schubert (2014).

2.3.1. Estimation de l'élasticité de substitution entre l'énergie efficace et les biens durables

L'élasticité de substitution entre l'énergie efficace et les biens durables est estimée à partir de deux approches, celles de Ogaki et Reinhart (1998) et la demande relative entre les deux biens de consommation tirée des conditions de premier ordre du modèle. Le coût d'usage du bien durable et le flux de service énergétiques n'étant pas observables, estimer l'élasticité de substitution entre les deux variables à l'aide d'un système d'équation non-linéaire n'est pas faisable.

Tout d'abord, en se basant sur Ogaki et Reinhart (1998), Henriët, Maggiar et Schubert (2014) estiment l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie à partir de l'équation du taux de marginal de substitution entre les deux biens. L'équation de régression se base sur le prix d'acquisition du bien durable plutôt que sur son (réel) coût d'usage. L'équation de régression est estimée sur données non-normalisées, comme chez Henriët, Maggiar et Schubert (2014), et, par mesure de robustesse, sur données normalisées. Les estimations ne diffèrent que très peu. Et, plusieurs estimateurs sont utilisés. Cooley et Ogaki (1996), Ogaki et Park (1997), et Ogaki et Reinhart (1998), utilisent l'estimateur Canonical Cointegration Regression (CCR) pour estimer élasticité. Par mesure de robustesse, je vérifie l'estimation avec l'estimateur *Generalized Method of Moments* (GMM) comme privilégié par Hansen et Singleton (1982) pour l'estimation des équations d'Euler, et un test avec un estimateur de type *moindres carrés ordinaires* (*ARMA conditional least squares*). L'équation de régression, à partir du système non-normalisé, estimée sur données 1985-2018 est la suivante :

⁸⁴ Ogaki et Reinhart (1998) estiment l'élasticité en deux étapes, en se basant sur les travaux de Dunn et Singleton (1986), et Eichenbaum et Hansen (1990). La première consiste à utiliser l'équation de cointégration d'Euler avec des préférences non-séparables en la consommation de biens durables et de biens non-durables pour estimer la fonction CES des services énergétiques. Et, la seconde consiste à régresser l'équation d'Euler avec la fonction CES estimée à l'étape précédente en utilisant la méthode des moments généralisés.

$$\log\left(\frac{E_t^h}{I_t^d}\right) = \text{constant} + \sigma_{es} \cdot \log\left(\frac{p_t^{e,h}}{p_t^{id}}\right) + j_t \quad (58)$$

Avec, E_t^h l'énergie totale consommée par les ménages, I_t^d l'acquisition de biens durables par les ménages, σ_{es} l'élasticité de substitution entre le stock de biens durables et l'énergie efficace, $p_t^{e,h}$ le prix de l'énergie agrégée *toutes taxes comprises* des ménages, p_t^{id} le prix de vente des biens durables, et j_t un bruit blanc.

Par ailleurs, dans un souci de cohérence avec le modèle, **l'équation de régression suivante, la demande relative de l'énergie efficace par rapport au stock des biens durables, est estimée** sur la plage temporelle 1985-2017 à partir de deux estimateurs (les moindres carrés ordinaires et les moments généralisés) :

$$\log\left(\frac{p_t^{e,h} \cdot E_t^h}{uc_t \cdot D_t}\right) = \log\left(\frac{1 - \varpi_d}{\varpi_d}\right) + \frac{1 - \sigma_{es}}{\sigma_{es}} \cdot \log\left(\frac{\frac{D_t}{\bar{D}}}{\frac{E_t^h}{\bar{E}^h}}\right) + k_t \quad (59)$$

Avec, $p_t^{e,h} \cdot E_t^h$ les dépenses *toutes taxes comprises* (hors TVA) en énergie des ménages, uc_t le coût d'usage des biens durables, D_t le stock de biens durables, ϖ_d le paramètre de distribution normalisé et reparamétré (pour une explication sur la reparamétrisation des paramètres de distribution, cf. annexe 2.G), σ_{es} l'élasticité de substitution entre le stock de biens durables et l'énergie efficace, (\bar{D}, \bar{E}^h) les points de normalisation du stock de biens durables et de l'énergie efficace des ménages, et k_t un bruit blanc. Le coût d'usage des biens-durables, uc_t , est construit à partir de la condition de premier ordre découlant de l'équation d'Euler des biens durables (cf. annexe 2.H).

Les résultats de l'estimation de l'équation 58 et de l'équation 59 (cf. **Tableau 11 infra**) sont très proches, mais la régression à partir de l'équation 59 présente un souci d'autocorrélation.

La valeur choisie pour l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie est de 0,75. L'élasticité entre les biens durables et l'énergie efficace estimée inférieure à 1 est intuitive. Les biens durables et l'énergie efficace sont complémentaires. L'estimation est cohérente avec l'idée selon laquelle les ménages utilisent un niveau minimal d'énergie pour produire un service énergétique, ce qui permet d'éviter les solutions en coin. Cette complémentarité devrait impliquer qu'un choc énergétique affecte significativement les biens durables et donc le flux de services énergétiques. Dhawan et Jeske (2008) utilisent plusieurs valeurs comprises entre 0,1 et 0,6, et Henriët, Maggiar et Schubert (2014) utilisent une valeur de 0,5. Par mesure de robustesse, les résultats de simulation de la Partie III seront testés avec une élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace de 0,25.

2.3.2. Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les ménages

Comme pour l'entreprise, l'élasticité de substitution inter-énergie est estimée à partir de l'approche par le système d'équation non-linéaire suivante :

$$\log \left(\frac{(p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^h}{p_t^{e,h} \cdot E_t^h} \right) = \log(1 - \varpi_{el}^h) + \frac{1 - \sigma_e^h}{\sigma_e^h} \cdot \left[\log \left(\frac{E_t^h}{\overline{E^h}} \right) - \log \left(\frac{Nel_t^h}{\overline{Nel^h}} \right) - W - \log(\zeta) \right] + l_t \quad (60)$$

$$\log \left(\frac{(p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^h}{p_t^{e,h} \cdot E_t^h} \right) = \log(\varpi_{el}^h) + \frac{1 - \sigma_e^h}{\sigma_e^h} \cdot \left[\log \left(\frac{E_t^h}{\overline{E^h}} \right) - \log \left(\frac{El_t^h}{\overline{El^h}} \right) - S - \log(\zeta) \right] + m_t \quad (61)$$

$$\log \left(\frac{E_t^h}{\overline{E^h}} \right) = \log(\zeta) + \frac{\sigma_e^h}{\sigma_e^h - 1} \cdot \log \left(\varpi_{el}^h \cdot \left(\exp^S \cdot \frac{El_t^h}{\overline{El^h}} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} + (1 - \varpi_{el}^h) \cdot \left(\exp^W \cdot \frac{Nel_t^h}{\overline{Nel^h}} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} \right) + n_t \quad (62)$$

Avec, ϖ_{el}^h le paramètre de distribution normalisé et reparamétré (pour une explication sur la reparamétrisation des paramètres de distribution, cf. annexe 2.G), σ_e^h l'élasticité de substitution, ζ la constante de normalisation, W et S les transformations mathématiques de l'efficacité énergétique (transformation à la *Box-Cox* et séries de Fourier), $(\overline{Nel^h}, \overline{El^h}, \overline{E^h})$ les points de normalisation de l'énergie non-électrique, de l'électricité et du composite « énergie efficace », et (l_t, m_t, n_t) des bruits blancs.

Des problèmes calculatoires n'ont pas permis de tirer des estimations concluantes avec la transformation à la *Box-Cox*. Les estimations étaient hors de portée et convergeaient vers l'infini. La valeur retenue pour l'élasticité de substitution inter-énergie des ménages est de 1,456 (cf. **Tableau 10 infra**).

Il n'existe aucune étude en lien avec l'élasticité de substitution entre l'énergie électrique et l'énergie non-électrique du côté des ménages. Le plus proche est Stern (2012) qui estime une élasticité au niveau macroéconomique supérieure à 1 et Bohringer et Rutherford (2008) utilisent une élasticité inférieure à 1. Si bien qu'à long terme les ménages peuvent substituer facilement les deux types d'énergie en fonction de l'évolution relative des prix. Par ailleurs, les investissements des ménages en biens durables se font souvent au rythme de renouvellement des applications énergétiques, en plus de l'argument efficacité énergétique et évolution des prix relatifs, qui se déprécient plus vite que les équipements industriels. C'est pourquoi, l'élasticité de substitution des ménages peut être

supérieure à l'élasticité de substitution des secteurs d'activité. Un exercice de robustesse sera fait en prenant en compte une élasticité de 0,75.

	Fourier	Residual diagnostic test		Coefficient test	
	$k = 1$	<i>Portemanteau</i>	<i>ADF</i>	<i>Wald test</i> $H_0 : \kappa_{sin} = \kappa_{cos} = 0$	<i>Wald test</i> $H_0 : \sigma_e^h = 1$
σ_e^h	1.4560 (0.0000)	No autocorrelation	<i>ADF-Fischer</i> 45.6644 (0.0000) <i>Levin Lin & Chu</i> -6.2324 (0.0000)	35.0106 (0.0000)	8.4997 (0.0036)
ω_{el}^h	0.2664 (0.0000)				
ζ	0.9965 (0.0000)				
g^{ael}	-0.0064 (0.4425)				
g^{anel}	0.0004 (0.8924)				
$\kappa_{sin,ael}$	0.0909 (0.0423)				
$\kappa_{cos,ael}$	0.2950 (0.0001)				
$\kappa_{sin,anel}$	-0.0389 (0.0240)				
$\kappa_{cos,anel}$	-0.1051 (0.0002)				

Tableau 10 Résultat des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution inter-énergie du ménage

L'estimation des élasticités de substitution constitue la dernière étape avant la simulation du modèle selon les scénarios et les versions considérées dans la thèse. Le modèle développé dans le chapitre est un modèle en équilibre général dynamique simplifié de l'économie française qui interagit avec un modèle de type ingénieur du système électrique français. Malgré l'aspect agrégé, le modèle permet de capturer les principales interactions entre l'énergie et l'économie, notamment l'effet de la transition énergétique sur la croissance française. Les parties suivantes discutent des principaux résultats obtenus après simulation des deux trajectoires principales du Bilan Prévisionnel de RTE, soit Ampère et Volt, sous trois versions d'évolution du prix des énergies et sous deux structures d'information.

		OGAKI & REINHART (1998)					FIRST ORDER CONDITIONS		
<i>Data normalisation</i>		YES			NO		YES		
<i>Regression model</i>		OLS	CCR	GMM	OLS	CCR	GMM	OLS	GMM
Results	σ_{es}	0.7404 (0.0000)	0.7654 (0.0000)	0.7544 (0.0000)	0.7403 (0.0000)	0.7654 (0.0000)	0.7544 (0.0000)	0.7929 (0.0000)	0.7260 (0.0000)
	ϖ_d	-	-	-	-	-	-	0.6001 (0.0000)	0.6077 (0.0000)
	<i>constant</i>	5.0032 (0.0000)	5.1930 (0.0000)	5.0994 (0.0000)	-7.5270 (0.0000)	-7.5215 (0.0000)	-7.5343 (0.0000)	-	-
Tests	R-Squared	0.9711	0.9542	0.9710	0.9710	0.9542	0.9709	0.7640	0.7593
	Durbin Watson	2.0019	-	1.9866	2.0019	-	1.9866	2.6666	2.7808
	Sum of squared resids	0.0836	0.1322	0.0839	0.0836	0.1322	0.0839	0.2340	0.2387
	F-stat	503.2710 (0.0000)	-	-	503.2710 (0.0000)	-	-	1227.817 (0.0000)	-
	J-stat	-	-	3.38e-20	-	-	1.77e-28	-	3.37e-22
	Lagrange-Multiplier test	0.4395 (0.6488)	-	-	0.4394 (0.6488)	-	-	-	-
	Autocorrelation	No	No	No	No	Up to lag 2	No	Up to lag 10	Up to lag 11
	Breusch-Pagan test	0.4291 (0.5172)	-	-	0.4292 (0.5172)	-	-	0.1382 (0.7127)	-
	Wald test	-5.3602 (0.0000)	-5.9243 (0.0000)	-4.6391 (0.0001)	-5.3605 (0.0000)	-5.9243 (0.0000)	-4.6391 (0.0001)	-2.1736 (0.0380)	-3.2409 (0.0030)
	$H_0 : \sigma_{es} = 0$	-8.4209 (0.0000)	-3.7898 (0.0004)	-5.5390 (0.0000)	-8.4207 (0.0000)	-3.7898 (0.0004)	-5.5390 (0.0000)	-12.6760 (0.0000)	-9.2993 (0.0000)

Tableau 11 Résultats des tests économétriques pour l'estimation de l'élasticité de substitution des services énergétiques selon les deux méthodes d'estimation

Annexes de la Partie II

2.A. Montant des soutiens du compte d'affectation spécial « Transition énergétique » en 2018

	Capacités subventionnées (TWh)	Montant du soutien (Million d'euros)
Photovoltaïque	10,4	2 881,4
Éolien	27,7	1 558
Hydraulique	5,9	228,6
Biomasse	3,9	416,9
Biogaz	2,3	243,2
Géothermie	0,008	1,4
Incinération d'ordures ménagères	2,1	42,2
Total ENR	52,3	5 371,8
Total Effacement	-	17,9
Total Bio-méthane	-	99,5

Tableau 12 Montant des soutiens du compte d'affectation spécial « Transition énergétique » en 2018 – Source : Article 23 du Projet Loi Finance 2018

2.B. Le poids de la fiscalité énergétique dans la valeur ajoutée des secteurs

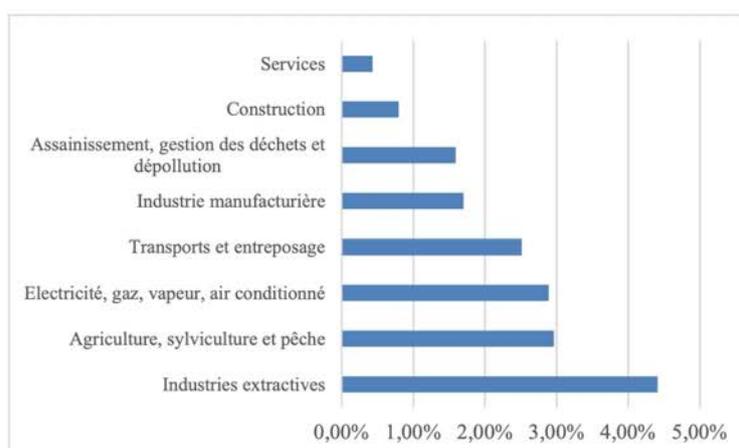


Figure 9 Le poids de la fiscalité énergétique dans la valeur ajoutée des secteurs d'activité – Source : Conseil des Prélèvements Obligatoires (2019)

2.C. Taux de croissance annuel de l'efficacité électrique

	SCENARIO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
RESIDENTIEL ($g^{ael,h}$)	Ampère	0,95%	1,65%	1,78%	1,84%	1,80%	1,77%	1,58%	1,25%	0,88%
	Volt	1,06%	1,56%	1,63%	1,76%	1,75%	1,74%	1,62%	1,42%	1,33%
NON-RESIDENTIEL ($g^{ael,f}$)	Ampère	1,31%	1,08%	1,15%	1,12%	1,30%	1,17%	1,13%	1,08%	1,10%
	Volt	1,10%	0,84%	0,93%	0,91%	1,10%	0,98%	0,95%	0,91%	0,95%

	SCENARIO	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
RESIDENTIEL ($g^{ael,h}$)	Ampère	0,76%	0,60%	0,40%	0,21%	0,26%	0,12%	0,05%	0,03%	-0,02%
	Volt	1,15%	1,10%	0,95%	0,86%	0,80%	0,72%	0,67%	0,67%	0,56%
NON-RESIDENTIEL ($g^{ael,f}$)	Ampère	1,07%	1,03%	0,90%	0,85%	0,85%	0,81%	0,67%	0,63%	0,60%
	Volt	0,93%	0,91%	0,89%	0,87%	0,86%	0,84%	0,83%	0,81%	0,80%

Tableau 13 Taux de croissance annuel de l'efficacité électrique. Calculs à partir des données de Rte

Notes :

1. Le secteur résidentiel comprend les services logement et les services de transport.
2. Le secteur non-résidentiel comprend l'industrie, l'agriculture, l'énergie, le tertiaire et le transport professionnel.
3. Le taux d'efficacité électrique prend en considération les efforts de maîtrise de la demande d'énergie et les transferts d'usage dans les secteurs.
4. Malgré des efforts de maîtrise de la demande d'énergie dans le secteur résidentiel relativement plus élevés dans le scénario Ampère que dans scénario Volt, le taux d'efficacité énergétique est relativement plus faible dans le scénario Ampère. La cause en est attribuée à des transferts d'usage relativement plus élevés dans le secteur du logement et le secteur du transport résidentiel, qui viennent atténuer la diminution de la consommation d'électricité attribuée aux efforts de maîtrise de la demande d'énergie.

2.D. Calcul des taux de taxation effectif en 2018

2.D.1. Taux de taxation effectif moyen sur la valeur ajoutée à la Mendoza, Razin et Tesar (1994)

Le dénominateur correspond à la base de taxation, c'est-à-dire le revenu avant-taxe, et le numérateur correspond au revenu de la taxation indirecte qui est égal à la différence entre la valeur nominale avant et après taxation de la consommation agrégée⁸⁵.

$$\begin{aligned}\tau^c &= [\textit{General taxes on goods and services} + \textit{Excise taxes}] \\ &/[\textit{Household and government final consumption expenditure on the territory} \\ &\quad - \textit{Compensation on employees by the government} \\ &\quad - (\textit{General taxes on goods and services} + \textit{Excise taxes})]\end{aligned}$$

Selon des données de l'OCDE, le taux effectif moyen de taxation sur la valeur ajoutée est de 18.52%.

2.D.2. Taux de taxation effectif moyen des revenus du travail à la Mendoza, Razin et Tesar (1994)

Le calcul consiste à construire un taux moyen effectif prenant en compte les cotisations sociales et autres taxes sur la masse salariale.

Taux de taxation moyen sur le revenu total des ménages

$$\begin{aligned}\tau^w &= (\textit{Taxes on income, profits, and capital gains of individuals}) \\ &\quad /[\textit{Mixed income} + \textit{households' property income and entrepreneurial income} \\ &\quad \quad + \textit{wages and salaries}]\end{aligned}$$

Selon des données de l'OCDE, le taux effectif moyen de taxation du revenu des ménages est de 19.57%.

Taux de taxation effectif moyen sur les revenus du travail

$$\begin{aligned}\tau^l &= (\tau^w \times \textit{Wage\&Salaries} + \textit{Total social security contributions} \\ &\quad + \textit{Taxes on payroll and workforce}) \\ &\quad /(\textit{Wage\&Salaries} + \textit{Employer's contribution to social security})\end{aligned}$$

⁸⁵ Les taxes sur les biens et services comprennent les taxes payées par les administrations publiques. La taxe sur la valeur ajoutée ne s'applique qu'à la consommation de biens et services (et non aux services travail). C'est pourquoi Mendoza, Razin et Tesar (1994) déduisent du calcul la rémunération totale des salariés versée par les administrations publiques. La consommation finale des administrations publiques consiste en des dépenses pour la production de biens et services finaux. Elles comprennent la rémunération des salariés.

Selon des données de l'OCDE, le taux effectif moyen de taxation sur les revenus du travail est de 48.22%.

2.D.3. Taux de taxation effectif moyen des revenus du capital à la Mendoza, Razin et Tesar (1994)

$$\tau^k = [\tau^w \times (\text{Mixed income} + \text{households' property income and entrepreneurial income}) \\ + \text{Taxes on income, profits, and capital gains of corporations} \\ + \text{Recurrent taxes on immovable property} \\ + \text{Taxes on financial and capital transactions}] \\ / [\text{Total operating surplus of the economy}]$$

Selon des données de l'OCDE, le taux effectif moyen sur les revenus du capital est de 0.310% en 2018. La baisse est due à un allègement conséquent de la taxation des revenus du capital sous l'impulsion du gouvernement. Depuis l'article 28 de la loi n°2017.1837 du 30 décembre 2017, les gains et les revenus issus du capital sont soumis à un taux d'imposition de 30%.

2.D.4. Taux de taxation effectif moyen de l'énergie non-électrique

La fiscalité énergétique appartient au régime des accises dont l'assiette porte sur la quantité consommée, si bien que le calcul ne peut suivre la méthode de Mendoza, Razin et Tesar (1994). Un tel calcul n'est applicable que dans le cas particulier des taxes *ad valorem*.

Les données des dépenses fiscales environnementales pour l'année 2018 sont tirées du projet Loi Finance 2019 et 2020, et les données de dépenses (non-déductibles), de recettes fiscales (dont TVA non-déductible), et de consommations finales en énergie sont tirées de la DGEC. Grâce aux statistiques de la DGEC, le calcul prend en compte les diverses dépenses fiscales⁸⁶ relatives à la fiscalité énergétique et environnementale pour obtenir un taux effectif de taxation énergétique. Par ailleurs, le calcul ne prend en compte que les dépenses de consommation finale en énergie à usage énergétique. La fiscalité énergétique ne s'applique pas aux consommations à usage non-énergétique selon le Code des Douanes. Et, par manque de données sur la ventilation du chèque énergie par type d'énergie utilisée, les dépenses en gaz et électricité ne sont pas nettes du chèque énergie.

Le taux de taxation du gaz correspond à la taxe intérieure sur la consommation de gaz naturel (TICGN) et la contribution tarifaire à l'acheminement (CTA). La CTA est retirée du calcul car elle n'est appliquée qu'au tarif d'accès aux tiers au réseau de distribution du gaz naturel (ATRD), et son calcul est complexe. Et, pour le gaz, la CTA ne représente que 14% des taxes totales (TICGN et

⁸⁶ Les dépenses fiscales relatives à la fiscalité environnementale correspondent aux tarifs réduits et aux exonérations liées aux politiques publiques pour les secteurs d'activité. Les mesures déclassées sont des exonérations qui ne sont plus classées comme « dépenses fiscales » ; notamment celles qui sont soumises au droit international, comme l'aviation et l'autoconsommation des raffineries. Du côté des ménages, les dépenses fiscales correspondent au crédit d'impôt transition énergétique.

CTA) selon données annexe Tome II projet loi finance 2019. De ce fait, le prix de détail final du gaz naturel correspond au prix de gros du gaz naturel et à l'ATRD.

La pondération gaz/produits pétroliers dans le calcul de la taxe sur la consommation d'énergie non-électrique correspond à la part de chaque produit énergétique dans la consommation non-électrique totale pour chaque type de consommateur. Les taxes énergétiques, exceptée la CTA, sont des droits d'accise, donc la pondération doit refléter le volume consommé.

Le calcul de la taxe sur la consommation d'énergie non-électrique du ménage est le suivant :

$$\tau_{2018}^{nel,h} = \underbrace{0,73}_{\text{pondération produits pétroliers}} * \frac{\overbrace{20'224}^{TICPE}}{28,88 \text{ consommation}} + \underbrace{0,27}_{\text{pondération gaz}} * \frac{\overbrace{1'500,45 * (1 - \overbrace{0,14}^{CTA})}^{TICGN}}{10,618 \text{ consommation gaz}}$$

$$= 544,015 \text{ €/tep}$$

Le taux effectif de taxation de l'énergie non-électrique pour les ménages est de 544,015 euros par tonne équivalent pétrole.

Le calcul de la taxe sur la consommation d'énergie non-électrique de l'entreprise est le suivant :

$$\tau_{2018}^{nel,f} = 0,536 * \frac{11'676}{28,53} + 0,464 * \frac{1'261,93 * 0,86}{24,66} = 230,305 \text{ €/tep}$$

Le taux effectif de taxation de l'énergie non-électrique pour les secteurs d'activité est de 230,035 euros par tonne équivalent pétrole.

2.D.5. Taux de taxation effectif moyen de l'électricité

Le taux de taxation de la consommation d'électricité correspond à la contribution au service public de l'électricité (CSPE), la taxe communale sur la consommation finale d'électricité (TCCFE), et la taxe départementale sur la consommation finale d'électricité (TDCFE). La CTA est retirée du calcul de la taxe sur l'électricité car elle n'est appliquée qu'au tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (TURPE). Pour l'électricité, la CTA ne représente que 10% des taxes totales en électricité selon données annexe Tome II projet loi finance 2019. De ce fait, le prix de détail final de l'électricité correspond au prix de gros de l'électricité et au TURPE.

Le calcul du taux de taxation de la consommation d'électricité appliqué aux ménages est le suivant :

$$\tau_{2018}^{el,h} = \frac{\overbrace{5'677,17}^{CSPE+TCCFE+TDCFE} * \left(1 - \overbrace{0,1}^{CTA}\right)}{\underbrace{13,61}_{\text{consommation d'électricité}}} = 364,18\text{€/tep ou } 31,31 \text{ €/MWh}$$

Le taux effectif de taxation de l'électricité pour les ménages est de 31,31 euros par MWh.

Le calcul du taux de taxation de la consommation d'électricité appliqué à l'entreprise est le suivant :

$$\tau_{2018}^{el,f} = \frac{5'475,35 * (1 - 0,1)}{24,90} = 206,81\text{€/tep ou } 17,78 \text{ €/MWh}$$

Le taux effectif de taxation de l'électricité pour les secteurs d'activité est de 17,78 euros par MWh.

Le taux est plus faible pour les entreprises car dans la réalité les entreprises énergivores ont le droit à des taux réduits – notamment, les secteurs électro-intensifs.

2.E. Concordance entre les données des comptes nationaux et le modèle

Les comptes nationaux définissent le **capital** fixe comme le stock des actifs fixes comprenant les actifs de toutes les branches d'activité. Dans le modèle, le capital physique représente tout le capital de l'économie (données comptes nationaux) hors capital fixe de production d'électricité (estimation approximative à 155,21 milliards d'euros courant 2018 sur des données de Rte).

Les comptes nationaux définissent l'**investissement** (formation brute de capital) comme l'investissement en capital physique de toute l'économie. Les comptes nationaux considèrent les biens durables comme une consommation, alors que le modèle les considère comme un investissement. Le modèle considère l'investissement en capital physique comme l'investissement du secteur productif (données comptes nationaux) hors investissements dans le système électrique (données Rte). L'investissement dans le système électrique (données Rte) est séparé des investissements en capital physique du système productif car il fait l'objet d'une simulation à part entière. Les données des coûts annualisés par technologie⁸⁷ - coût fixe annualisé du capital (investissements), coût d'exploitation, coût variable du CO2 et coût variable du combustible - sont tirées des analyses de Rte.

Les données des **subventions du système électrique** de 2018 à 2020 proviennent des rapports de la Commission de Régulation de l'Énergie sur l'évolution des charges de service public (*cf. Figure 9 infra*). Les subventions du système électrique de 2021 à 2035 sont calculées par le modèle d'optimisation su système électrique.

⁸⁷ Cycle combiné gaz, turbines à combustion gaz, solaire photovoltaïque, éolien terrestre, énergies marines, nucléaire, STEP, effacements, autres centrales à gaz, cogénération gaz, fioul lourd, autre centrale au fioul, turbines à combustion fioul, éolien en mer, hydraulique au fil de l'eau, hydraulique lac et éclusé, biogaz, biomasse, et déchets.

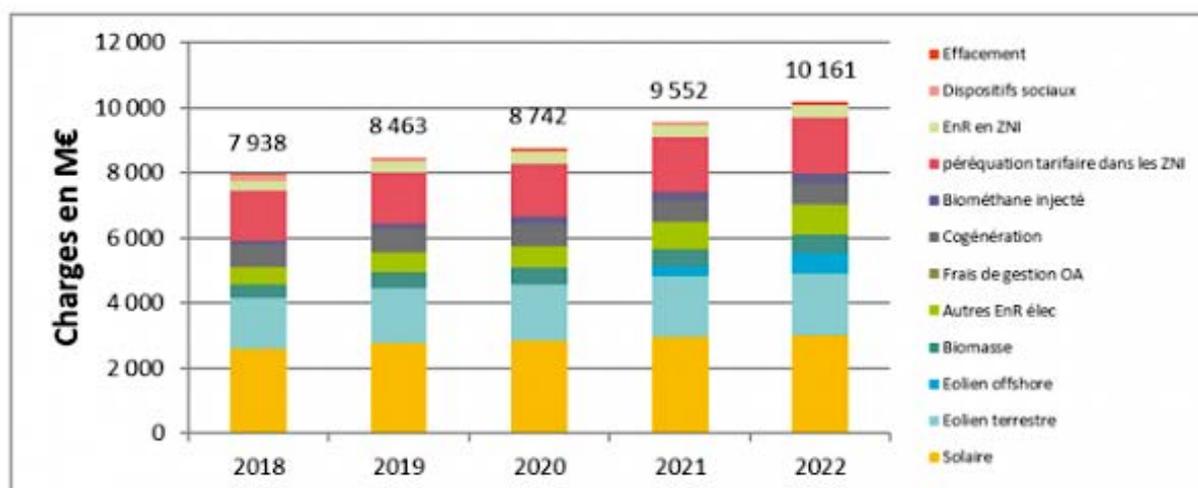


Figure 10 Charges de service public établies par la CRE (2019)

Les comptes nationaux définissent la **consommation** des ménages comme toutes les dépenses des ménages hors acquisition de logement ; c.-à-d. la consommation en biens durables, en biens non-durables et en énergie. Le modèle définit la consommation comme étant composée de biens non-durables et de services énergétiques. Les comptes nationaux ne procurent aucune donnée chiffrée des services énergétiques. Le calcul de consommation de biens non-durables, X_t , déduit de la consommation totale des ménages, la consommation d'énergie des ménages⁸⁸ et la consommation de biens durables (ici, l'investissement en biens durables)⁸⁹.

Le **stock de biens durables** ne peut pas être obtenu directement des données car la formation de capital des ménages ne correspond qu'à l'achat de logement et les biens durables sont considérés comme une consommation par les comptes nationaux. La calibration du modèle est faite à partir des séries sur les investissements des biens durables et un taux de dépréciation agrégé des biens durables à 0,086. Selon des données Rte/Ademe sur la durée de vie des équipements du secteur résidentiel (chauffage, ECS, cuisson, équipements gris et bruns, climatiseur, éclairage et froid) et des données de l'Organisme Technique Central sur la durée de vie moyenne d'une voiture en France, la durée moyenne des biens durables est de 11,68 années (*cf. Tableau 14 infra*). Ce résultat donne un taux de dépréciation d'environ 0,086. Ce chiffre est proche de l'estimation du taux de dépréciation des biens durables (0,089) de Fernandez-Villaverde et Krueger (2007).

⁸⁸ La dépense totale des ménages part type d'énergie sur la période 1995 à 2017 est calculée à partir des données du Bilan énergie 2018 et 2019 de la DGEC sur les dépenses moyennes des ménages par type d'énergie et la dépense totale des ménages en énergie.

⁸⁹ Achat de véhicules, équipement audiovisuel, autres biens durables pour loisir et culture, appareils ménagers et autres biens durables importants.

Équipement	Durée de vie en années
Réfrigérateur	13
Congélateur	20
Cave à vin	11
Lave-linge	8
Lave-vaisselle	15
ECS (Joule/CET/CESI)	20
Télévision	8
Imprimante	5
Ordinateur portable	5
Chaîne hifi	12
Appareil photo	7
Boitier TV	7
Console jeux	7
Ordinateur fixe	7
Four	20
Plaques de cuisson	14
Micro-ondes	10
Éclairage LED	15
Éclairage HL-Eco	4,5
Éclairage CFL	7,5
Clim-VMC	25
Fer à repasser	10
Piscine	20
Aspirateur	8
Voiture	12
Moyenne	11,68

Tableau 14 Durée de vie par équipement ménager -Source : Rte/Ademe et Organisme Technique Central

La DGEC définit la **consommation d'énergie des secteurs institutionnels** comme étant la somme de la consommation finale à usage énergétique et non-énergétique, et la consommation d'énergie primaire (gaz naturel et pétrole brut) pour la production d'énergie secondaire (produits pétroliers raffinés, électricité et chaleur). *Le modèle ne prend en compte que la consommation finale à usage énergétique.* La consommation à usage non-énergétique (notamment dans la branche pétrochimie et dans la branche construction) est mise volontairement de côté. Les données de **consommations énergétiques** proviennent du Bilan énergétique 2018 et 2019 de la DGEC. Par ailleurs, la consommation d'énergie des secteurs productifs comprend la consommation de toutes les branches d'activités de l'économie, sauf la consommation de gaz naturel pour la production d'électricité, de chaleur et la cogénération, et la consommation de pétrole brut des centrales fiouls. Les énergies primaires sont une consommation intermédiaire de la branche énergie plutôt qu'une consommation à usage purement énergétique dans le processus de production.

Les données **des dépenses énergétiques par type d'énergie et par type de consommateur** proviennent du Bilan énergétique 2018 et 2019 de la DGEC. Les dépenses en énergie des ménages comprennent principalement les énergies pour le logement (électricité, gaz et combustibles fossiles) et le transport (carburants). Et, les dépenses en énergie des entreprises comprennent les dépenses en énergie de tous les secteurs d'activités sauf le système électrique. Les dépenses de consommation

en énergie du système électrique sont déjà comptées dans les coûts variable du système électrique. Les séries longues des dépenses en énergie ne sont disponibles que pour la période 2011-2018. Un effort de reconstruction des données de dépenses de consommation en énergie pour la période 1985-2010 est effectué pour l'estimation des élasticités de substitution (*cf.* annexe 2.F ci-après).

Les **dépenses publiques en biens et services** selon l'approche par la demande correspondent aux dépenses de consommation finale du gouvernement des comptes nationaux.

La définition de l'**output produit par le reste de l'économie (hors système électrique) dans le modèle, $Output_t$** , n'est pas commune. L'énergie n'est pas vue comme une consommation intermédiaire, mais comme un facteur de production à part entière dans le processus de production. Idéalement, la mesure de l'output choisie doit être de sorte que la valeur de l'output soit égale à la valeur totale des inputs, soit la valeur ajoutée brute – elle se partage communément entre les revenus du facteur travail et du facteur capital – plus le coût de l'énergie dans les processus de production. Par conséquent, la mesure de l'output dans le secteur final ajoute à la valeur du PIB le coût de l'énergie pour les entreprises comme chez van der Werf (2008), Lalanne, Pouliquen et Simon (2009), Kander et Stern (2012), Papageorgiou, Saam et Schulte (2017), et Henningsen, Henningsen et van der Werf (2018).

Le facteur travail correspond au nombre d'employés dans toutes les branches d'activité. Par manque de données, le nombre d'employés dans le secteur de la production d'électricité n'est pas retiré du nombre total d'employés dans le reste de l'économie. Néanmoins, le nombre d'employés dans le secteur de la production d'électricité est relativement faible.

Toutes les valeurs sont exprimées en termes réels pour être cohérent avec le modèle. Comme chez Smets et Wouters (2007), elles sont déflatées par le déflateur du PIB par cohérence avec le modèle. En effet, l'indice de prix à la consommation ne prend pas en compte certains biens par rapport au modèle, comme les biens de capital ou les biens consommés par le gouvernement. Ce traitement permet à la contrainte de ressources de l'économie d'être vérifiée en tout temps. Par ailleurs, à long terme, le déflateur du PIB et le déflateur de la consommation sont réputées évoluer de façon similaire.

2.F. Reconstitution des dépenses en énergie des entreprises de 1985 à 2018 pour l'exercice d'estimation des élasticités de substitution

Les données des dépenses en énergie des secteurs d'activité sont issues des Bilans Énergétiques de la DGEC. Les séries longues des dépenses en énergie ne sont disponibles que pour la période 2011-2018. Un effort de reconstruction des séries sur la période 1985 à 2011 est entrepris à partir des

données publiques (DGEC, Eurostat et Loi Finance). L'année 1985 est choisie comme date de départ pour des raisons de disponibilité des données et pour éviter des données « cycliques » causées par les chocs pétroliers.

Pour le gaz et l'électricité, les dépenses de consommation des secteurs d'activité sont reconstituées à partir des données d'Eurostat (identiques aux données de la DGEC) sur la consommation et des données d'Eurostat sur les prix (hors TVA). Il existe différents prix par tranche de consommation. Selon Eurostat, la tranche de consommation représentative de la consommation moyenne de gaz naturel des secteurs d'activité est la tranche de consommation I3, qui correspond à une consommation annuelle comprise entre 10'000 GJ et 100'000 GJ. Pour l'électricité, la tranche de consommation représentative pour les secteurs d'activité est la tranche Ic, qui correspond à une consommation annuelle comprise entre 500 MWh et 2'000 MWh.

Les données de consommation d'électricité du secteur des transports de la DGEC ne différencient pas le transport résidentiel du transport non-résidentiel. Les données de RTE sont utilisées pour la consommation en électricité du transport résidentiel.

Les séries longues sur la consommation des secteurs activités par produit pétrolier raffiné n'existent pas, contrairement aux données prix. Les données sur les dépenses en produits pétroliers raffinés de 1985 à 2010 sont reconstituées à partir des dépenses en produits pétroliers raffinés entre l'année 2011 et l'année 2018 (données DGEC), et de l'évolution des prix et des quantités⁹⁰ entre 1985 et 2011 (données DGEC)⁹¹. L'évolution des prix pour chaque année correspond à la moyenne de l'évolution du prix des différents carburants (super carburant, gazole, super SP95, super SP98 et GPLc), qui est significativement liée à l'évolution des cours du brut. Le fioul lourd ne représente qu'une part faible de la consommation des produits pétroliers raffinés à usage énergétique par les entreprises (1,6 Mtep sur 27,7 Mtep en 2017 selon des données de la DGEC), le principal étant

⁹⁰ Les données sur la consommation de produits pétroliers raffinés du secteur des transports sont agrégées. La DGEC ne fournit une décomposition entre consommation du secteur résidentiel et consommation des secteurs d'activité que sur la période 2011-2018. La décomposition permet de calculer la part moyenne du transport non-résidentiel dans le transport total et est appliquée à la plage 1985-2011. Cette décomposition est quasi la même sur la période. Par ailleurs, les données sur la consommation de gaz naturel résidentiel et tertiaire proviennent d'Eurostat pour l'année 1990 à l'année 2000 et de la DGEC de l'année 2000 à l'année 2018. La DGEC ne donne que la consommation totale du secteur « tertiaire-résidentiel » en gaz naturel sur la plage temporelle 1978-2000. La cohérence du partage entre le secteur résidentiel et du secteur tertiaire de la consommation de gaz naturel est vérifiée avec les données de consommation en gaz naturel du secteur « tertiaire-résidentiel » de la DGEC sur toute la plage temporelle.

⁹¹ Par exemple, pour l'année 2010 :

$$Dépenses_{2010} = \frac{Dépenses_{2011}}{(1 + \Delta_{prix}) \cdot (1 + \Delta_{quantité})}$$

attribué aux carburants pour le transport routier de marchandises (Bilan Énergétique 2018 de la DGEC). Par ailleurs, l'évolution du fioul lourd est quasi similaire à celle des carburants, sauf pour les années 1985, 1990, 1992, 1995, 1997, 2002 et 2004. En appliquant la méthode de reconstitution des dépenses aux dépenses en produits pétroliers raffinés des secteurs d'activité sur la période 2011-2018, les résultats convergent avec les données de la DGEC sur 2011-2018.

Les données de la DGEC pour les secteurs d'activités sont hors TVA. Pour reconstituer les dépenses TTC, les données de TVA pour le gaz et l'électricité sont tirées d'Eurostat de 1985 à 2010 et de la DGEC pour la période 2011 à 2018. Les données TVA pour les produits pétroliers sont tirées de la DGEC pour 2011-2018. Aucune donnée n'existe avant la période 2011 concernant les produits pétroliers. Donc, les taux de TVA historique sont appliqués sur la période 1985 à 2010 : pour 1985-1994 une TVA de 18,6%, pour 1995-1999 une TVA de 20,6%, pour 2000-2010 une TVA de 19,6%.

2.G. Reparamétrisation des paramètres de distribution des fonctions CES du modèle à la Cantore et Levine (2011)

2.G.1. Les paramètres de distribution du côté de l'entreprise

Sur le modèle de Klump et de La Grandville (2000), et Klump et Saam (2008), Cantore et Levine (2011) proposent la reparamétrisation des paramètres de distribution des fonctions CES comme alternative à la normalisation pour résoudre le problème de « dimension » que posent les fonctions CES. Les paramètres de distribution des fonctions CES n'ont pas de réelle interprétation économique car ils dépendent de variables qui ont des unités de mesure différentes. Par exemple, le paramètre de distribution η_k du composite de la travail-capital⁹² ne peut pas être interprété comme un *factor share*, c'est-à-dire la part du capital dans la valeur ajoutée de l'économie. Le facteur capital est exprimé en million d'euro et le facteur travail en million de personnes employées. Le raisonnement s'applique aussi aux paramètres de distribution des fonctions de consommation de type CES comme le paramètre α_d de la fonction de production des services énergétiques⁹³. Le stock de biens durables est exprimé en milliards d'euro et l'utilisation de l'énergie en million de

⁹² Le composite travail-capital qui combine facteur travail et facteur capital est le suivant :

$$Y_t = \left[\eta_k \cdot (K_t)^{\frac{\sigma_y-1}{\sigma_y}} + \eta_n \cdot (A_t^l \cdot N_t)^{\frac{\sigma_y-1}{\sigma_y}} \right]^{\frac{\sigma_y}{\sigma_y-1}}$$

⁹³ La fonction de production des services énergétiques par le ménage i est la suivante :

$$ES_t^i = \left[\alpha_d \cdot (D_t^i)^{\frac{\sigma_{es}-1}{\sigma_{es}}} + (1 - \alpha_d) \cdot E_t^i \right]^{\frac{\sigma_{es}}{\sigma_{es}-1}}$$

tonne équivalent pétrole (Mtep). Si bien qu'en normalisant à partir d'un point donné du temps (l'état stationnaire), les paramètres deviennent invariants au choix des unités de mesure. Grâce à cette méthode, les paramètres de distribution deviennent des *factor shares* et il est possible de les obtenir plus facilement sans les estimer à partir des données de comptes nationaux, comme souligné par Léon-Ledesma, McAdam et Willman (2010).

En suivant le schéma de, Hall et al. (2001), et Klump, McAdam et Willman (2012)⁹⁴, la fonction de production $Output_t$ est exprimée en déviation de son état stationnaire :

$$\frac{Output_t}{Output} = \left\{ \frac{\eta_y \cdot Y_t^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E_t^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}{\eta_y \cdot Y^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} \right\}^{\frac{\sigma_o}{\sigma_o-1}}$$

$$\rightarrow \frac{Output_t}{Output} = \left\{ \frac{\eta_y \cdot Y_t^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}}{\eta_y \cdot Y^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \frac{\eta_e \cdot E_t^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}{\eta_y \cdot Y^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} \right\}^{\frac{\sigma_o}{\sigma_o-1}}$$

$$\leftrightarrow \frac{Output_t}{Output} = \left[\varpi_y \cdot \left(\frac{Y_t}{Y} \right)^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \varpi_e^f \cdot \left(\frac{E_t^f}{E^f} \right)^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} \right]^{\frac{\sigma_o}{\sigma_o-1}}$$

$$\text{avec } \varpi_e^f = \frac{\eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}{\eta_y \cdot Y^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}$$

Or,

$$\frac{\eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}{\eta_y \cdot Y^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} = \frac{\text{coût total TTC de l'énergie}}{p^y \cdot Y + p^{e,f} \cdot E^f}$$

Car, la demande en énergie de l'entreprise du système non normalisé selon les conditions de premier ordre du modèle (*cf.* annexe 2.H ci-après) est :

$$\frac{p_t^{e,f}}{p_t^o} = \eta_e \cdot \left(\frac{Output_t}{E_t^f} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}}$$

$$\rightarrow \frac{p_t^{e,f}}{p_t^o} \cdot Output_t = \frac{\eta_e \cdot E_t^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}{\eta_y \cdot Y_t^{\frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}} + \eta_e \cdot E_t^f \frac{\sigma_o-1}{\sigma_o}}$$

⁹⁴ Shen et Whalley (2013) normalisent leur fonction CES composé de trois facteurs de production : le capital, le travail et l'énergie, pour estimer les élasticités de substitution de leur fonction de production.

Par conséquent, au point de normalisation, on a :

$$\omega_e^f = \frac{p^{e,f} \cdot E^f}{p^y \cdot Y + p^{e,f} \cdot E^f}$$

Donc, ω_e^f correspond à la part du facteur énergétique dans les coûts totaux de production et peut être obtenu numériquement. Et, pour ω_y on a :

$$\omega_y = \frac{p^y \cdot Y}{p^y \cdot Y + p^{e,f} \cdot E^f}$$

η_y et η_e sont obtenus à partir des *factor share* ω_y et ω_e^f sachant les conditions de premier ordre sur la demande relative du composite « énergie efficace » de l'entreprise et la demande relative du composite travail-capital de l'entreprise (*cf.* annexe 2.H ci-après),

$$\eta_y = \omega_y \cdot \left(\frac{\text{Output}}{Y} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}}$$

$$\eta_e = \omega_e^f \cdot \left(\frac{\text{Output}}{E^f} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}}$$

La démonstration mathématique est identique pour les composites travail-capital et « énergie efficace ». Pour l'imbrication « valeur ajoutée », on a :

$$\omega_k = \frac{\eta_k \cdot K^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}}}{\eta_k \cdot K^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}} + \eta_n \cdot (A^l \cdot N)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}}} = \frac{r \cdot K}{r \cdot K + w \cdot N}$$

$$\rightarrow \eta_k = \omega_k \cdot \left(\frac{Y}{K} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}}$$

$$\rightarrow \eta_n = \omega_n \cdot \left(\frac{Y}{A^l \cdot N} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}}$$

La part du capital dans la valeur ajoutée (le composite travail-capital), ω_k , est calculée selon la méthodologie de Muck, McAdam et Growiec (2018) (*cf.* annexe 2.J).

Pour le composite « énergie efficace », on a les paramètres de distribution suivants :

$$\omega_{el}^f = \frac{\eta_{el} \cdot (A^{el,f} \cdot E^f)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}}}{\eta_{el} \cdot (A^{el,f} \cdot E^f)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} + \eta_{nel} \cdot (A^{nel} \cdot Nel^f)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}}}$$

$$= \frac{(p^{el,f} + TURPE^f + \tau^{el,f}) \cdot E^f}{(p^{el,f} + TURPE^f + \tau^{el,f}) \cdot E^f + (p^{nel,f} + \tau^{nel,f}) \cdot Nel^f}$$

$$\rightarrow \eta_{el} = \varpi_{el}^f \cdot \left(\frac{E^f}{A^{el,f} \cdot El^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}}$$

$$\rightarrow \eta_{nel} = \varpi_{nel}^f \cdot \left(\frac{E^f}{A^{nel} \cdot Nel^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}}$$

2.G.2. Les paramètres de distribution du côté des ménages

Le paramètre de distribution de la fonction de consommation agrégée est reparamétré de la façon suivante :

$$\varpi_x = \frac{\alpha_x \cdot X^{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c}}}{\alpha_x \cdot X^{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c}} + (1 - \alpha_x) \cdot ES^{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c}}} = \frac{p^x \cdot (1 + \tau^c) \cdot X}{p^c \cdot (1 + \tau^c) \cdot C}$$

$$\rightarrow \alpha_x = \varpi_x \cdot \left(\frac{C}{X} \right)^{\frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c}}$$

La démonstration mathématique est identique pour les imbrications intermédiaires,

$$\varpi_d = \frac{\alpha_d \cdot D^{\frac{\sigma_{es} - 1}{\sigma_{es}}}}{\alpha_d \cdot D^{\frac{\sigma_{es} - 1}{\sigma_{es}}} + (1 - \alpha_d) \cdot E_h^{\frac{\sigma_{es} - 1}{\sigma_{es}}}} = \frac{p^d \cdot (1 + \tau^c) \cdot D}{p^{es} \cdot (1 + \tau^c) \cdot ES}$$

$$\rightarrow \alpha_d = \varpi_d \cdot \left(\frac{ES}{D} \right)^{\frac{\sigma_{es} - 1}{\sigma_{es}}}$$

$$\varpi_{el}^h = \frac{\alpha_{el} \cdot (A^{el,h} \cdot El^h)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}}}{\alpha_{el} \cdot (A^{el,h} \cdot El^h)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} + \alpha_{nel} \cdot (A^{nel} \cdot Nel^h)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}}}$$

$$= \frac{(1 + \tau^c) \cdot (p^{el,h} + TURPE^h + \tau^{el,h}) \cdot El^h}{(1 + \tau^c) \cdot (p^{el,h} + TURPE^h + \tau^{el,h}) \cdot El^h + (1 + \tau^c) \cdot (p^{nel,h} + \tau^{nel,h}) \cdot Nel^h}$$

$$\rightarrow \alpha_{el} = \varpi_{el}^h \cdot \left(\frac{El^h}{A^{el,h} \cdot El^h} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}}$$

$$\rightarrow \alpha_{nel} = \varpi_{nel}^h \cdot \left(\frac{El^h}{A^{nel} \cdot Nel^h} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}}$$

2.H. Les conditions de premier ordre du modèle

2.H.1. La demande du bien non-durable du ménage i

$$(1 + \tau^c). \lambda_t^i = \underbrace{C_t^{i-\sigma} \cdot \alpha_x \cdot \frac{C_t^i}{X_t^i}}_{UmX_t^i}$$

2.H.2. Demande d'investissement en capital physique du ménage ricardien

$$1 = q_t^k * \left(1 - AC_t^{ik} - \vartheta \cdot \left(\frac{I_t^{k,R}}{I_{t-1}^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} - 1 \right) * \frac{I_t^{k,R}}{I_{t-1}^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} \right) \\ + \beta \cdot \frac{UmX_{t+1}^R}{UmX_t^R} \cdot q_{t+1}^k \\ * \vartheta \cdot \left(\frac{I_{t+1}^{k,R}}{I_t^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{I_{t+1}^{k,R}}{I_t^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} \right)^2$$

Avec, q_t^k le q de Tobin, la valeur marginale du capital installé par rapport à la consommation. Il représente le prix réel du stock de capital. La condition de premier ordre égalise l'utilité marginale de la consommation (le renoncement à l'investissement en capital) à l'utilité marginale de l'investissement en capital physique. Une valeur supérieure à 1 indique que l'agent investira mais à un volume fini (grâce aux coûts d'ajustement). Au contraire, s'il est inférieur à 1, le taux d'investissement est négatif.

2.H.3. Offre de capital (décision d'épargne/investissement) du ménage ricardien – Équation d'Euler du capital

$$q_t^k = \beta \cdot \frac{UmX_{t+1}^R}{UmX_t^R} \cdot [r_{t+1} \cdot (1 - \tau^k) + (1 - \delta^k) \cdot q_{t+1}^k]$$

Le prix du capital est reflété par sa valeur de location r_{t+1} sur le marché du capital, car il existe un marché de location du capital entre entreprise et ménages.

2.H.4. La demande de biens durables du ménage i

$$\frac{UmX_t^i}{\beta} = UmD_{t+1}^i + UmX_{t+1}^i \cdot (1 - \delta^d) \\ \rightarrow uc_t^d \left(= \frac{1}{\beta} \cdot \frac{UmX_t^i}{UmX_{t+1}^i} - (1 - \delta^d) \right) = \frac{UmD_{t+1}^i}{UmX_{t+1}^i} \\ UmD_{t+1}^i = C_{t+1}^{i-\sigma} \cdot (1 - \alpha_x) \cdot \frac{C_{t+1}^i}{ES_{t+1}^i} \cdot \alpha_d \cdot \left(\frac{ES_{t+1}^i}{D_{t+1}^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_{es}}}$$

Avec, uc_t^d le coût réel d'usage des biens durables, c'est-à-dire la valeur d'usage d'un bien durable qui contribue au bien-être du ménage à l'instant (t). Le coût d'usage correspond au coût d'acquisition d'un bien durable en (t), $\frac{UmX_t^i}{\beta}$, nette des bénéfices que le ménage obtiendrait en vendant ce bien durable en fin de période, $UmX_{t+1}^i \cdot (1 - \delta^d)$. Si ménage vend le bien en fin de période (et décide de dépenser l'argent gagné sur des biens non-durables), il continue à recevoir de l'utilité des services procurés par le bien durable en t.

Selon Diewert (2004), le prix du bien durable à un instant donné du temps est mieux reflété par le coût d'usage que par son prix d'acquisition lorsqu'un modèle étudie les services procurés par ce dernier sur toute sa durée de vie. Le prix d'acquisition correspond au prix du bien durable sur toute sa durée de vie économique. Or, la thèse s'intéresse au bien-être procuré au ménage par les services à un instant donné du temps. Diewert (2004) note que le prix d'acquisition comme valeur unique du bien durable sous-estime le bien-être que retirent les ménages lorsqu'ils utilisent des biens durables acquis avant la date (t) (ou décalent leur décision d'achat de bien durable) par rapport au bien-être des ménages qui acquièrent des biens durables en date (t). En effet, l'approche par le prix d'acquisition va imputer toute la valeur du bien durable à la date de l'achat. Le seul avantage de l'approche par le prix d'acquisition est le traitement symétrique entre les biens durables et les biens non-durables (ce que font les comptes nationaux). Alors, Diewert (2004) propose l'approche par le coût d'usage, c'est-à-dire que l'on cherche à distribuer le prix d'acquisition initial du bien durable sur toute sa durée de vie ou encore le coût d'opportunité de détenir le bien durable au lieu de le vendre.

2.H.5. La demande de services énergétiques du ménage i

$$p_{es,t} = \frac{(1 - \alpha_x)}{\alpha_x} \cdot \frac{X_t^i}{ES_t^i}$$

Par substitution des fonctions de demande (1) et (2) dans la fonction de production des services énergétiques, le coût réel de production des services énergétiques dépend du coût d'usage des biens durables et du prix de détail *hors TVA* du ménage :

$$p_{es,t} = \left[\alpha_d^{\sigma_{es}} \cdot (uc_t^d)^{1-\sigma_{es}} + (1 - \alpha_d)^{\sigma_{es}} \cdot p_t^{e,h^{1-\sigma_{es}}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{es}}}$$

2.H.6. La demande d'énergie du ménage i

$$p_t^{e,h} = \frac{\left(C_{t+1}^i^{-\sigma} \cdot (1 - \alpha_x) \cdot \frac{C_t^i}{ES_t^i} \cdot (1 - \alpha_d) \cdot \left(\frac{ES_t^i}{E_t^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_{es}}} \right)}{UmX_t^i}$$

Selon la demande de services énergétique et la demande d'énergie, on a :

$$\frac{p_t^{e,h}}{p_{es,t}} = (1 - \alpha_d) \cdot \left(\frac{ES_t^i}{E_t^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_{es}}}$$

Alors, le taux marginal de substitution entre l'énergie et les biens durables est :

$$\frac{p_t^{e,h}}{uc_t^d} = \frac{X_t^i}{X_{t+1}^i} \cdot \frac{ES_{t+1}^i}{ES_t^i} \cdot \frac{1 - \alpha_d}{\alpha_d} \cdot \left(\frac{ES_t^i}{ES_{t+1}^i} \cdot \frac{D_{t+1}^i}{E_t^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_{es}}}$$

Il reflète l'arbitrage entre le stock de biens durables et l'utilisation de l'énergie pour la production des services énergétiques. Selon les fonctions de demande de l'électricité et de l'énergie non-électrique (voir équations ci-après), et la fonction d'agrégation de l'énergie efficace, le prix de détail de l'énergie *hors TVA* est le suivant :

$$p_t^{e,h} = \left[\alpha_{el}^{\sigma_e^h} \cdot \left(\frac{p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}}{A_t^{el,h}} \right)^{1-\sigma_e^h} + \alpha_{nel}^{\sigma_e^h} \cdot \left(\frac{p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}}{A_t^{nel}} \right)^{1-\sigma_e^h} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_e^h}}$$

2.H.7. La demande d'électricité du ménage i

$$\frac{p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}}{p_t^{e,h}} = A_t^{el,h} \cdot \alpha_{el} \cdot \left(\frac{E_t^i}{A_t^{el,h} \cdot El_t^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_e^h}}$$

2.H.8. La demande d'énergie non électrique du ménage i

$$\frac{p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}}{p_t^{e,h}} = A_t^{nel} \cdot \alpha_{nel} \cdot \left(\frac{E_t^i}{A_t^{nel} \cdot Nel_t^i} \right)^{\frac{1}{\sigma_e^h}}$$

2.H.9. Règles d'accumulation des stocks des ménages

$$D_{t+1}^R = I_t^{d,R} - (1 - \delta^d) \cdot D_t^R$$

$$D_{t+1}^{NR} = I_t^{d,NR} - (1 - \delta^d) \cdot D_t^{NR}$$

$$K_{t+1}^R = I_t^{k,R} \cdot (1 - AC_t^{ik}) - (1 - \delta^k) \cdot K_t^R$$

$$AC_t^{ik} = \frac{\vartheta}{2} \cdot \left(\frac{I_t^{k,R}}{I_{t-1}^{k,R} \cdot (1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)} - 1 \right)^2$$

2.H.10. La contrainte budgétaire du ménage non-ricardien

$$\begin{aligned} (1 + \tau^c) \cdot [X_t^{NR} + I_t^{d,NR} + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^{NR} + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^{NR}] \\ = (1 - \tau^l) \cdot w_t \cdot h_t^{NR} \cdot L_t^{NR} + TR_t^{NR} + PS_t^{NR} \end{aligned}$$

2.H.11. La contrainte budgétaire du ménage ricardien

$$\begin{aligned} (1 + \tau^c) \cdot [X_t^R + I_t^{d,R} + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^R + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^R] + I_t^{k,R} \\ = (1 - \tau^l) \cdot w_t \cdot h_t^R \cdot L_t^R + (1 - \tau^k) \cdot r_t \cdot K_t^R + TR_t^R + PS_t^R + (1 - \tau^k) \cdot (\Pi_t^R \\ + \Pi_t^{el,R} + \Pi_t^{network,R}) \end{aligned}$$

2.H.12. Agrégation des variables endogènes des ménages

$$C_t = (1 - \omega) \cdot C_t^{NR} + \omega \cdot C_t^R$$

$$X_t = (1 - \omega) \cdot X_t^{NR} + \omega \cdot X_t^R$$

$$ES_t = (1 - \omega) \cdot ES_t^{NR} + \omega \cdot ES_t^R$$

$$D_t = (1 - \omega) \cdot D_t^{NR} + \omega \cdot D_t^R$$

$$I_t^d = (1 - \omega) \cdot I_t^{d,NR} + \omega \cdot I_t^{d,R}$$

$$E_t^h = (1 - \omega) \cdot E_t^{NR} + \omega \cdot E_t^R$$

$$El_t^h = (1 - \omega) \cdot El_t^{NR} + \omega \cdot El_t^R$$

$$Nel_t^h = (1 - \omega) \cdot Nel_t^{NR} + \omega \cdot Nel_t^R$$

$$TR_t = (1 - \omega) \cdot TR_t^{NR} + \omega \cdot TR_t^R$$

$$PS_t = (1 - \omega) \cdot PS_t^{NR} + \omega \cdot PS_t^R$$

$$K_t = \omega \cdot K_t^R$$

$$I_t^k = \omega \cdot I_t^{k,R}$$

$$L_t = (1 - \omega) \cdot L_t^{NR} + \omega \cdot L_t^R$$

2.H.13. Demande du facteur agrégé travail-capital de l'entreprise

$$\frac{p_t^y}{p_t^o} = \eta_y \cdot \left(\frac{Output_t}{Y_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}}$$

2.H.14. Demande d'énergie agrégée de l'entreprise

$$\frac{p_t^{e,f}}{p_t^o} = \eta_e \cdot \left(\frac{Output_{f,t}}{E_t^f} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}}$$

$$p_t^{e,f} = \left[\eta_{el}^{\sigma_{e,f}} \cdot \left(\frac{p_t^{el,f} + TURPE_t^f + \tau_t^{el,f}}{A_t^{el,f}} \right)^{1-\sigma_e^f} + \eta_{nel}^{\sigma_{e,f}} \cdot \left(\frac{p_t^{nel,f} + \tau_t^{nel,f}}{A_t^{nel}} \right)^{1-\sigma_e^f} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_e^f}}$$

2.H.15. Demande de capital de l'entreprise

$$\frac{r_t}{p_t^o} = \eta_y \cdot \left(\frac{Output_t}{Y_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}} \cdot \eta_k \cdot \left(\frac{Y_t}{K_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_y}}$$

2.H.16. Demande de travail de l'entreprise

$$\frac{w_t}{p_t^o} = \eta_y \cdot \left(\frac{Output_t}{Y_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}} \cdot \eta_n \cdot A_t^l \cdot \left(\frac{Y_t}{A_t^l \cdot N_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_y}}$$

2.H.17. Demande d'électricité de l'entreprise

$$\frac{p_t^{el,f} + TURPE_t^f + \tau_t^{el,f}}{p_t^{e,f}} = \eta_{el} \cdot A_t^{el,f} \cdot \left(\frac{E_t^f}{A_t^{el,f} \cdot El_t^f} \right)^{\frac{1}{\sigma_e^f}}$$

2.H.18. Demande d'énergie non électrique de l'entreprise

$$\frac{p_t^{nel,f} + \tau_t^{nel,f}}{p_t^{e,f}} = \eta_{nel} \cdot A_t^{nel} \cdot \left(\frac{E_t^f}{A_t^{nel} \cdot Nel_t^f} \right)^{\frac{1}{\sigma_e^f}}$$

2.H.19. Les tendances de progrès technique

$$A_t^l = (1 + g_t^l)^t \cdot A_{t-1}^l$$

$$L_t = (1 + g_t^n) \cdot L_{t-1}$$

$$A_t^{el} = (1 + g_t^{ael}) \cdot A_{t-1}^{el}$$

$$A_t^{nel} = (1 + g_t^{anel}) \cdot A_{t-1}^{nel}$$

2.H.20. La contrainte budgétaire de l'autorité publique

$$\begin{aligned} G_t + TR_t + sub_t^{el} + PS_t \\ = \tau^c \cdot [X_t + I_t^d + (p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}) \cdot El_t^h + (p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}) \cdot Nel_t^h] \\ + \tau_t^{el,h} \cdot El_t^h + \tau_t^{el,f} \cdot El_t^f + \tau_t^{nel,h} \cdot Nel_t^h + \tau_t^{nel,f} \cdot Nel_t^f + \tau^l \cdot w_t \cdot h_t \cdot L_t \\ + \tau^k \cdot r_t \cdot K_t + \tau^k \cdot (\Pi_t + \Pi_t^{el} + \Pi_t^{network}) \end{aligned}$$

2.H.21. La contrainte de ressource de l'économie

$$\begin{aligned} Output_t + p_t^{el} \cdot \sum_{technology, hours} Y_{j,h,t}^{el} \\ = X_t + I_t^d + p_t^{el,h} \cdot El_t^h + G_t + I_t^k + p_t^{el,f} \cdot El_t^f \\ + \sum_{technology} Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el}) + GridCosts_t \\ + Exp_t \end{aligned}$$

2.I. Calibration du modèle

À partir des conditions de premier ordre du modèle (cf. annexe 2.H *supra*), des élasticités de substitution et de la reparamétrisation des paramètres de distribution des fonctions CES (cf. annexe 2.G *supra*), les paramètres du modèle sont calculés à partir des équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \delta^k &= \frac{I^k}{K} - g^l - g^n - g^l \cdot g^n \\
 \eta_k &= \varpi_k \cdot \left(\frac{Y}{K} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}} \\
 \eta_n &= (1 - \varpi_k) \cdot \left(\frac{Y}{A^l \cdot N} \right)^{\frac{\sigma_y - 1}{\sigma_y}} \\
 \eta_y &= \frac{1 - \eta_e \cdot \left(\frac{E^f}{Output} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}}}{\left(\frac{Y}{Output} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}}} \\
 \eta_e &= \varpi_e^f \cdot \left(\frac{Output}{E^f} \right)^{\frac{\sigma_o - 1}{\sigma_o}} \\
 \eta_{el} &= \varpi_{el}^f \cdot \left(\frac{E^f}{A^{el,f} \cdot El^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} \\
 \eta_{nel} &= \varpi_{nel}^f \cdot \left(\frac{E^f}{A^{nel} \cdot Nel^f} \right)^{\frac{\sigma_e^f - 1}{\sigma_e^f}} \\
 \beta &= \frac{(1 + g^l + g^n + g^l \cdot g^n)^\sigma}{\alpha_y \cdot \left(\frac{O}{Y} \right)^{\frac{1}{\sigma_o}} \cdot \alpha_k \cdot \left(\frac{Y}{K} \right)^{\frac{1}{\sigma_y}} \cdot (1 - \tau^k) + (1 - \delta^k)} \\
 \alpha_d &= \frac{uc^d}{uc^d + p^{e,h} \cdot \left(\frac{E^h}{I^d} \cdot [g^l + g^n + g^l \cdot g^n + \delta^d] \right)^{\frac{1}{\sigma_{es}}}} \\
 \alpha_x &= \frac{(1 - \alpha_d)}{(1 - \alpha_d) + \frac{p^{e,h} \cdot E^h}{X} \cdot \left(\alpha_d \cdot \left[\frac{I^d}{E^h \cdot (g^l + g^n + g^l \cdot g^n + \delta^d)} \right]^{\frac{\sigma_{es} - 1}{\sigma_{es}}} + [1 - \alpha_d] \right)} \\
 \alpha_{el} &= \varpi_{el}^h \cdot \left(\frac{E^h}{A^{el,h} \cdot El^h} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} \\
 \alpha_{nel} &= \varpi_{nel}^h \cdot \left(\frac{E^h}{A^{nel} \cdot Nel^h} \right)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}}
 \end{aligned}$$

ϑ , σ et ω sont fixés à partir de la littérature. La paramètre d'ajustement des investissements en capital est fixé à partir d'une valeur standard dans la littérature. Pour le modèle NAWM-II de la Commission Européenne, Coenen et al. (2018) estiment le paramètre de coût d'ajustement de l'investissement en capital physique à 10.78 en fréquence trimestrielle, soit 2.7 en fréquence annuelle. Le paramètre ω est fixé à partir du taux de d'épargnant en France en 2015 calculé par Eurostat. Le paramètre de substitution intertemporelle de la consommation correspond à la valeur standard retenue par la littérature macroéconomique. Le modèle retient la valeur moyenne standard de 1,50 (*cf.* Thimme [2017]).

2.J. Calcul de la part des revenus du capital dans les revenus totaux de l'économie française

La part du capital dans le revenu total est calculée selon Muck, McAdam et Growiec (2018). Le revenu intérieur net (de la consommation de capital fixe) de l'économie (R) est composé d'un revenu ambigu (RA) et d'un revenu non ambigu (RNA). Le revenu non ambigu se décompose en revenu du travail (RNA_L), correspondant aux compensations des employés telles que mesurés dans les comptes nationaux, et en revenu du capital (RNA_K). Le revenu ambigu (RA) ne peut être distingué en revenu du travail et revenu du capital. Il correspond à la somme des taxes moins des subventions à la production et l'importation (T-S) plus le revenu mixte (RM). L'hypothèse faite est que la part du travail (ϖ_L) et la part du capital (ϖ_K) est la même dans les revenus ambigus (RA) que dans les revenus non ambigus (RNA), c'est-à-dire que les parts calculées correspondent bien à des parts au niveau agrégé. Cela permet d'éviter l'hypothèse courante selon laquelle, en moyenne, les revenus du travail se partagent de manière équivalente entre employés et autoentrepreneurs. Soit, la part du capital dans le revenu non ambigu est égale à :

$$\varpi_{K,RNA} = \frac{RNA_K + CCF}{RNA}$$

Avec $RNA = R - RA$, CCF la consommation de capital fixe, $RNA_K = RNA - RNA_L$. R correspond au revenu intérieur brut net de la consommation de capital fixe, RNA_L correspond aux compensations des employés dans les comptes nationaux, RA correspond à la somme du revenu mixte (des autoentrepreneurs) et des taxes moins les subventions à la production et à l'importation. Les données de revenus du capital et du travail au niveau agrégé font l'objet de l'ajustement suivant :

$$R_K = \overbrace{RNA_K + CCF}^{\text{revenu non ambigu du capital}} + \underbrace{\varpi_{K,RNA} * RA}_{\text{revenu ambigu du capital}}$$

$$R_L = R - R_K$$

Le calcul de la part du capital au niveau agrégé est le suivant : $\varpi_K = \frac{R_K}{R_L + R_K}$

2.K. Bibliographie

- Acemoglu D. (2002). Directed technical change. *The Review of Economic Studies*, 69(4), 781-809.
- Acemoglu, D. (2003). Labor- and Capital-Saving technical change. *Journal of European Economic Association*, 1(1), 1-37.
- Aiyar S., & Dalgaard C.-J. (2009). Accounting for productivity: is it ok to assume that the world is Cobb-Douglas? *Journal of Macroeconomics*, 31(2), 290-303.
- Allan, G., Hanley, N., McGregor, P., Swales, J., & Turner, K. (2007). The impact of increased efficiency in the industrial use of energy: A computable general equilibrium analysis. *Energy Economics*, 29(4), 779-798.
- Allard-Prigent C., Audenis C., Berger K., Carnot N., Duchene S., & Pesin F. (2002). Présentation du modèle Mésange : modèle économétrique de simulation et d'analyse Générale de l'économie. *Direction de la prévision du Ministère de l'Économie des Finances et de l'Industrie*.
- Andolfatto, D. (1996). Business cycles and labor-market search. *The American Economic Review*, 112-132.
- Anthony J. (2010). A class of changing elasticity production functions. *Journal of Economics*, 100(2), 165-183.
- Antràs P. (2004). Is the U.S. aggregate production function Cobb-Douglas? New estimates of the elasticity of substitution. *Contributions to Macroeconomics*, 4(1).
- Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a Bayesian DSGE model. *Renewable Energy*, 120, 60-68.
- Arrow, K. J., Chenery, H. B., Minhas, B. S., & Solow, R. M. (1961). Capital-labor substitution and economic efficiency. *The review of Economics and Statistics*, 225-250.
- Atkeson, A., & Kehoe, P. (1999). Models of energy use: putty-putty versus putty-clay. *The American Economic Review*, 89(4), 1028-1043.
- Barro, R. J. (1990). Government spending in a simple model of endogenous growth. *Journal of political economy*, 98(5, Part 2), S103-S125.
- Barsky R.B., House C.L., & Kimball M.S. (2007). Sticky-price models and durable goods. *American Economic Review*, 97(3), 984-998.
- Becker G.S. (1965). A theory of the allocation of time. *The Economic Journal*, 75(299), 493-517.
- Becker, R., Enders, W., & Lee, J. (2006). A stationarity test in the presence of an unknown number of smooth breaks. *Journal of Time Series Analysis*, 27(3), 381-409.
- Bénassy-Quéré, A., Blanchard, O.J., Boone, L., Cette, G., Criscuolo, C., Epaulard, A., Jean, S., Kyle, M., Ragot, X., Roulet, A., & Thesmar, D. (2019). Productivity and competitiveness: where does France stand in the Euro zone ?. *Conseil National de Productivité*.
- Blanchard O.J. (1997). The Medium Run, *Brookings Papers on Economic Activity*, 2, 89-141.
- Blanchard O.J., & Cohen D. (2017). *Macroéconomie*. Pearson.
- Blazquez, J., Hunt, L., & Manzano, B. (2017). Oil subsidies and renewable energy in Saudi Arabia: a general equilibrium approach. *Energy Journal*, 38, 29-45.
- Böhringer, C., & Rutherford, T. F. (2008). Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics*, 30(2), 574-596.
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E., & Tavoni, M. (2006). WITCH a world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 13-37.
- Brockway P.E., Saunders H., Heun M.K., Foxon T.J., Steinberger J.K., Barrett J.R., & Sorrell S. (2017). Energy rebound as a potential threat to a low-carbon future: findings from a new exergy-based national-level rebound approach. *Energies*, 10(1).
- Broyden C.G. (1970). The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms. *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications*, 6, 76-90.
- Bruniaux J.-M., & Martins J.O. (2012). Carbon leakages: a general equilibrium view. *Economic Theory*, 49(2), 473-495.
- Cantore C., & Levine P. (2012). Getting normalization right. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 36(12), 1931-1949.
- Canzoneri M.B., Cumby R.E., & Diba B.T. (2001). Is the price level determined by the needs of fiscal solvency ?. *American Economic Review*, 91(5), 1221-1238.
- Carlstrom, C., & Fuerst, T. (2006). Oil prices, monetary policy, and counterfactual experiments. *Journal of Money, Credit, and Banking*, 38(7), 1945-1958.
- Caselli F., & Coleman II W.J. (2006). The world technology frontier. *American Economic Review*, 96(3), 499-522.
- Cassou, S. P., & Lansing, K. J. (1998). Optimal fiscal policy, public capital, and the productivity slowdown. *Journal of economic dynamics and control*, 22(6), 911-935.
- Chirinko R.S. (2008). σ : the long and short of it. *Journal of Macroeconomics*, 30(2), 671-686.

- Christiano, L. J., Eichenbaum, M., & Evans, C. L. (2005). Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy. *Journal of political Economy*, 113(1), 1-45.
- Coenen, G., Karadi, P., Schmidt, S. & Warne, A. (2018). "The New Area-Wide Model II: an extended version of the ECB's micro-founded model for forecasting and policy analysis with a financial sector," *Working Paper Series 2200*, European Central Bank.
- Cooley, T. F., & Ogaki, M. (1996). A time series analysis of real wages, consumption and asset returns. *Journal of Applied Econometrics*, 11(2), 119-134.
- Commission de régulation de l'énergie (2018). Financement du soutien aux EnR. <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique/Soutien-a-la-production/Financement-du-soutien-aux-EnR>
- Conseil des prélèvements obligatoires (2019). La fiscalité environnementale au défi de l'urgence climatique.
- De Jong, F. J., & Kumar, T. K. (1972). Some considerations on a class of macro-economic production functions. *De Economist*, 120(2), 134-152.
- Dhawan, R., & Jeske, K. (2008). Energy price shocks and the macroeconomy: the role of consumer durables. *Journal of Money, Credit and Banking*, 40(7), 1357-1377.
- Diewert, W. E. (2004), "Durables and User Costs" in ILO, *Consumer Price Index Manual: Theory and Practice*, chapter 23, ILO/IMF/OECD/UNECE/Eurostat/World Bank.
- Direction du Budget du Ministère de l'Action et des Comptes publics (2019). Annexe au projet de Loi de Finances pour 2019: Évaluations des voies et moyens (Tome I et II). https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance_publicque/files/farandole/ressources/2019/pap/pdf/VM1-2019.pdf
- Dissou, Y., & Karnizova, L. (2016). Emissions cap or emissions tax? A multi-sector business cycle analysis. *Working Paper, University of Ottawa*.
- Duffy J., & Papageorgiou C. (2000). A cross-country empirical investigation of the aggregate production function specification. *Journal of Economic Growth*, 5(1), 87-120.
- Dunn, K. B., & Singleton, K. J. (1986). Modeling the term structure of interest rates under non-separable utility and durability of goods. *Journal of Financial Economics*, 17(1), 27-55.
- Edelstein P., & Kilian L. (2007). The response of business fixed investment to changes in energy prices: a test of some hypotheses about the transmission of energy price shocks. *The B.E. Journal of Macroeconomics*, 7(1), 1-41.
- Edenhofer, O., Bauer, N., & Kriegler, E. (2005). The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. *Ecological Economics*, 54(2-3), 277-292.
- Eichenbaum, M., & Hansen, L. P. (1990). Estimating models with intertemporal substitution using aggregate time series data. *Journal of Business & Economic Statistics*, 8(1), 53-69.
- Fernandez-Villaverde J., & Krueger D. (2011). Consumption and saving over the life cycle: how important are consumer durables? *Macroeconomic Dynamics*, 15(5), 725-770.
- Finn, M. (2000). Perfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *Journal of Money, Credit and Banking*, 32(3), 400-416.
- Fischer, C., & Springborn, M. (2011). Emissions targets and the real business cycle: intensity targets versus caps or taxes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 352-366.
- Flaig G. (1990). Household production and the short- and long-run demand for electricity. *Energy Economics*, 12(2), 116-121.
- Fletcher R. (1970). A New Approach to Variable Metric Algorithms. *Computer Journal*, 13, 317-322.
- Fullerton, D., & Monti, H. (2013). Can pollution tax rebates protect low-wage earners?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 66(3), 539-553.
- Galí, J., López-Salido, J. D., & Vallés, J. (2007). Understanding the effects of government spending on consumption. *Journal of the european economic association*, 5(1), 227-270.
- Gallant, A. R. (1984). The Fourier flexible form. *American Journal of Agricultural Economics*, 66(2), 204-208.
- Gay D.M. (1990). Usage summary for selected optimization routines. *Computing Science Technical Report*, n°153.
- Gerlagh, R., & Van der Zwaan, B. (2003). Gross world product and consumption in a global warming model with endogenous technological change. *Resource and Energy Economics*, 25(1), 35-57.
- Glomm, G., & Ravikumar, B. (1994). Public investment in infrastructure in a simple growth model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18(6), 1173-1187.
- Goldfarb D. (1970). A Family of Variable Metric Updates Derived by Variational Means. *Mathematics of Computation*, 24, 23-26.
- Golosov, M., Hassler, J., & Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.

- Gonand, F., & Jouvet, P.-A. (2015). The “second dividend” and the demographic structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 71-97.
- Gonand, F., Hasanov, F., & Hunt, L. (2019). Estimating the Impact of Energy Price Reform on Saudi Arabian Intergenerational Welfare using the MEGIR-SA Model. *The Energy Journal*, 40(3), 25-47.
- Goulder, L. H. (1995). Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: an intertemporal general equilibrium analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3), 271-297.
- Goulder, L. H., & Schneider, S. H. (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. *Resource and energy economics*, 21(3-4), 211-253.
- Hall, R. (1988). The relation between price and marginal cost in US industry. *Journal of Political Economy*, 96(5), 921-947.
- Halvorsen B., & Larsen B.M. (2001). The flexibility of household electricity demand over time. *Resource and Energy Economics*, 23(1), 1-18.
- Hamilton J.D. (2008). Understanding crude oil prices. *NBER working paper series*, n°14492.
- Hanley, N., McGregor, P. G., Swales, J. K., Turner, K (2006). The impact of energy efficiency improvements on the economy and the environment: A regional computable general equilibrium analysis. *Renew. Energy*, 31(2), 161–171.
- Hansen, J.-P., & Percebois, J. (2011). *Énergie. de Boeck*.
- Hansen, L. P., & Singleton, K. J. (1982). Generalized instrumental variables estimation of nonlinear rational expectations models. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1269-1286.
- Hassler J., Krussel P., & Olovsson C. (2012). Energy-saving technical change. *NBER Working Papers*, n° 18456.
- Henningsen A., & Henningsen G. (2011). Econometric estimation of the “Constant Elasticity of Substitution” function in R: package MicEconCES. *IFRO Working Paper*, n°9.
- Henningsen A., Henningsen G., & van der Werf E. (2018). Capital-labour-energy substitution in a nested CES framework: a replication and update of Kemfert (1998). *Energy Economics*.
- Henriet, F., Maggiar, N., & Schubert, K. (2014). A stylized applied energy-economy model for France. *The Energy Journal*, 35(4).
- Heun M.K., Santos J., Brockway P.E., Pruijm R., Domingos T., & Sakai M. (2017). From theory to econometrics to energy policy: cautionary tales for policymaking using aggregate production functions. *Energies*, 10(2).
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244-264.
- Iacoviello, M. (2005). House prices, borrowing constraints, and monetary policy in the business cycle. *American economic review*, 95(3), 739-764.
- Jones C.I., & Scrimgeour D. (2008). A new proof of Uzawa’s steady-state growth theorem. *The Review of Economics and Statistics*, 90(1), 180-182.
- Judd, K. L. (1996). Approximation, perturbation, and projection methods in economic analysis. *Handbook of computational economics*, 1, 509-585.
- Kaldor (1957). A model of economic growth. *The Economic Journal*, 67(268), 591-624.
- Katayama M., & Kim K.H. (2018). Understanding shocks and the relative price of investment goods. *Review of Economic Dynamics*, 30, 163-178.
- Kilian, L. (2008). The economic effects of energy price shocks. *Journal of Economic Literature*, 46(4), 871-909.
- Kim, I., & Loungani, P. (1992). The role of energy in real business cycle models. *Journal of Monetary Economics*, 29(2), 173-189.
- King, R. G., Plosser, C. I., & Rebelo, S. (1988). Production, Growth and Business Cycles: I. The Basic Neoclassical Model. *Journal of Monetary Economics*, 21, 195–232.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D., & Vecchi M.P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science, New Series*, 220(4598), 671-680.
- Klump R., & Saam M. (2008) Calibration of normalized CES production functions in dynamic models. *Economics Letters*, 99(2), 256-259.
- Klump, R. & de LaGrandville, O. (2000). Economic Growth and the Elasticity of Substitution: Two Theorems and Some Suggestions. *American Economic Review*, 90, 282–291.
- Klump, R. & Papageorgiou, C. (2008). The CES Production Function in the Theory and Empirics of Economic Growth. *Journal of Macroeconomics*, 30(2), 599–600.
- Klump, R., McAdam, P., & Willman, A. (2012). The Normalized CES Production Function: Theory and Empirics. *Journal of Economic Surveys*, 26(5), 769–799.
- Koesler S., & Schymura M. (2012). Substitution elasticities for CGE models. *EcoMod2012*, n°4010.

- Koetse M.J., de Groot H.L.F., & Florax R.J.G.M. (2008). Capital-energy substitution and shifts in factor demand: a meta-analysis. *Energy Economics*, 30(5), 2236-2251.
- Kydland, F., & Prescott, E. (1982). Time to build and aggregate fluctuations. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1345-1370.
- Lalanne G., Pouliquen E., & Simon O. (2009). Prix du pétrole et croissance potentielle à long terme. *Document de Travail de l'Insee*, n° 2009/09.
- Lancaster, K.J. (1966). A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy*, 74(2), 132-157.
- Lawrence R.Z. (2015). Recent declines in labor's share in US income: a preliminary neoclassical account. *NBER Working Paper*, n° 21296.
- Leduc, S., & Sill, K. (2004). A quantitative analysis of oil-price shocks, systematic monetary policy, and economic downturns. *Journal of Monetary Economics*, 51(4), 781-808.
- Leeper E. (1991). Equilibria under 'active' and 'passive' monetary and fiscal policies. *Journal of Monetary Economics*, 27(1), 129-147.
- Leeper E.M., & Walker T.B. (2011). Fiscal limits in advanced economies. *Economic papers: a journal of applied economics and policy*, 30(1).
- León-Ledesma M.A., McAdam P., & Willman A. (2010). Identifying the elasticity of substitution with biased technical change. *American Economic Review*, 100(4), 1330-1357.
- León-Ledesma, M. A., & Satchi, M. (2019). Appropriate technology and balanced growth. *The Review of Economic Studies*, 86(2), 807-835.
- Malikov, E., Sun, K., & Kumbhakar, S. C. (2018). Nonparametric estimates of the clean and dirty energy substitutability. *Economics Letters*, 168, 118-122.
- Mallick D. (2012). The role of elasticity of substitution in economic growth: a cross-country investigation. *Labor economics*, 19(5), 682-694.
- Mankiw G.N. (2016). *Macroéconomie. Éditions de Boeck*.
- Manne, A., Mendelsohn, R., & Richels, R. (1995). MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy Policy*, 23(1), 17-34.
- Manning, A. (1987). An integration of trade union models in a sequential bargaining framework. *The Economic Journal*, 97(385), 121-139.
- Marquardt D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of Soc. Indust. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Marsiliani, L., & Renstrom, T. (2001). Time Inconsistency in Environmental Policy: Tax Earmarking as a Commitment Solution. *The Economic Journal*, 110(462).
- Masten I., & Gnip A.G. (2016). Stress testing the EU fiscal framework. *Journal of Financial Stability*, 26(C), 276-293.
- McDonald, I. M., & Solow, R. M. (1981). Wage bargaining and employment. *The American Economic Review*, 71(5), 896-908.
- Mehra Y.P., & Petersen J. (2005). Oil prices and consumer spending. *FRB Richmond Economic Quarterly*, 91(3), 53-72.
- Mendoza E.G., Razin A., & Tesar L.L. (1994). Effective tax rates in macroeconomics: cross-country estimates of tax rates on factor incomes and consumption *Journal of Monetary Economics*, 34, 297-323.
- Merz, M. (1995). Search in the labor market and the real business cycle. *Journal of monetary Economics*, 36(2), 269-300.
- Ministère de l'Action et des Comptes Publics (2019). Chiffres clés du PLF 2019. https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance_publicque/files/files/documents/actualites/PLF2019/chiffrescles_plf2019.pdf
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (2017). Fiscalité environnementale : un état des lieux.
- Ministère de la transition écologique (2018 et 2019). Bilans énergétiques
- Miyagiwa K., & Papageorgiou C. (2007). Endogenous aggregate elasticity of substitution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 31(9), 2899-2919.
- Monacelli, T. (2009). New Keynesian models, durable goods, and collateral constraints. *Journal of Monetary Economics*, 56(2), 242-254.
- Mortensen, D. T., & Pissarides, C. A. (1994). Job creation and job destruction in the theory of unemployment. *The review of economic studies*, 61(3), 397-415.
- Muück, J. (2017). *Elasticity of substitution between labor and capital: robust evidence from developed economies*. Narodowy Bank Polski. Education & Publishing Department.
- Muscattelli A., Tirelli P., & Trecroci C. (2004). Fiscal and monetary policy interactions: empirical evidence and optimal policy using a structural new Keynesian model. *Journal of Macroeconomics*, 26(2), 257-280.

- Muth R.F. (1966). Household production and consumer demand functions. *Econometrica*, 34(3), 699-708.
- Nakamura H., & Nakamura M. (2008). Constant-elasticity-of-substitution production function. *Macroeconomic Dynamics*, 12(5), 694-701.
- Neiss K.S., & Nelson E. (2003). The real-interest-rate gap as an inflation indicator. *Macroeconomic Dynamics*, 7(2), 239-262.
- Nelder J., & Mead R. (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7(4), 308-331.
- Ni K., & Ni S. (2002). On the dynamic effects of oil price shocks: a study using industry level data. *Journal of Monetary Economics*, 49(4), 823-852.
- Nickell, S. J., & Andrews, M. (1983). Unions, real wages and employment in Britain 1951-79. *Oxford economic papers*, 35, 183-206.
- Ogaki, M., & Park, J. Y. (1997). A cointegration approach to estimating preference parameters. *Journal of Econometrics*, 82(1), 107-134.
- Ogaki M., & Reinhart C. (1998). Measuring intertemporal substitution: the role of durable goods. *Journal of Political Economy*, 106(5), 1078-1098.
- Paltsev S, Reilly JM, Jacoby HD, Eckaus RS, McFarland J Sarofim M, Asadoorian M, Babiker M (2005) The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4. *MIT Joint Program Report 125, August*, 72 p. (<http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGCRpt125.pdf>)
- Papageorgiou C., & Saam M. (2008). Two-level CES production technology in Solow and Diamond growth models. *Scandinavian Journal of Economics*, 110(1), 119-143.
- Papageorgiou C., Saam M., & Schulte P. (2017). Substitution between clean and dirty energy inputs: a macroeconomic perspective. *Review of Economics and Statistics*, 99(2), 281-290.
- Popp, D. (2004). ENTICE : Endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48, 742-768.
- Quigley J.M. (1966). Residential energy standards and the housing market: a regional analysis. *International Regional Science Review*, 9(3), 201-216.
- Raval, D. R. (2019). The micro elasticity of substitution and non-neutral technology. *The RAND Journal of Economics*, 50(1), 147-167.
- Réseau Transport d'Électricité (2018). Bilan Prévisionnel.
- Reynès F., & Yeddir-Tamsamani (2009). Substituabilité des facteurs et rendements d'échelle sectoriels en France : une estimation par une fonction de coût flexible. *Documents de Travail de l'OFCE*, n°37.
- Rotemberg, J., & Woodford, M. (1996). Imperfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *NBER Working Papers*(w5634).
- Rupert P., Rogerson R., & Wright R. (1995). Estimating substitution elasticities in household production models. *Economic Theory*, 6, 179-193.
- Saunders, H.D. (1992). The Khazoom-Brookes postulate and neoclassical growth. *The Energy Journal*, 13(4), 131-148.
- Schlicht, E. (2006). A variant of Uzawa's theorem. *Economics Bulletin*, (6), 1-5.
- Schmitt-Grohé S., & Uribe M. (2007). Optimal simple and implementable monetary and fiscal rules. *Journal of Monetary Economics*, 54(6), 1702-1725.
- Shanno D. F. (1970). Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization. *Mathematics of Computation*, 24, 647-656.
- Shen K., & Whalley J. (2013). Capital-labor-energy substitution in nested CES production functions for China. *NBER Working Paper*, n°19104.
- Sims E., & Wolff J. (2018). The state-dependent effects of tax shocks. *International Economic Review*, 59(3).
- Smets, F., & Wouters, R. (2007). Shocks and frictions in US business cycles: A Bayesian DSGE approach. *American economic review*, 97(3), 586-606.
- Smulders, S., & de Nooij, M. (2003). The impact of energy conservation on technology and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 25(1), 59-79.
- Solow R.M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Stern, D. I. (2012). Interfuel substitution: a meta-analysis. *Journal of Economic Surveys*, 26(2), 307-331.
- Stern D., & Cleveland C.J. (2004). Energy and economic growth. *Rensselaer Working Papers in Economics*, n°0410.
- Stern D.I., & Kander A. (2012). The role of energy in the industrial revolution and modern economic growth. *The Energy Journal*, 33(3).
- Storn R., & Price K. (1997). Differential Evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359.

- Thimme, J. (2017). Intertemporal substitution in consumption: A literature review. *Journal of Economic Surveys*, 31(1), 226-257.
- Torres J.L. (2015). Introduction to DSGE. *Vernon Press*.
- Turner, K., & Hanley, N. (2011). Energy efficiency, rebound effects and the environmental Kuznets Curve. *Energy Economics*, 33(5), 709-720.
- Uzawa, H. (1961). Neutral inventions and the stability of growth equilibrium. *Review of Economics Studies*, 28(2), 117-124.
- Van der Werf (2008). Production functions for climate policy modeling: an empirical analysis. *Energy Economics*, 30(6), 2964-2979.
- Varian, H.R. (2008). Analyse microéconomique. *de Boeck*.
- Wong T.N., & Yip C.K. (2010). Indeterminacy and the elasticity substitution ion one-sector models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(4), 623-635.

PARTIE III. Les effets agrégés de long terme d'une transition électrique sous divers scénarios d'évolution du prix des énergies

La Partie III cherche à évaluer différents canaux de transmission de la transition énergétique sur l'économie française sous diverses versions d'évolution du prix des énergies. L'étude de l'évolution du prix de l'électricité, en plus du prix du baril et du gaz, est importante dans le contexte où l'économie française dépendra relativement plus de l'électricité sur le long terme. En effet, une des conséquences de la transition énergétique est l'électrification de l'économie via le développement du parc de véhicules électriques, l'électrification des équipements de logement ou encore l'électrification des équipements des secteurs d'activité.

La présente partie discute des résultats de simulation de transition bas-carbone dans le secteur de l'électricité selon trois versions d'évolution du prix du gaz et du pétrole (haut, médian et bas) sur la base du modèle HyGEM présenté dans la Partie II. Le chapitre vient alimenter une littérature déjà existante sur l'analyse des politiques environnementales dans un contexte macroéconomique, et présentée dans la Partie I.

Le modèle est simulé selon deux structures d'information. L'une représente un cadre où les agents ont une information parfaite sur l'état de l'économie et connaissent parfaitement l'évolution future des variables exogènes du modèle⁹⁵. L'autre se situe dans un cadre où les agents ne connaissent pas la trajectoire future des variables, et donc ont une information imparfaite sur l'état de l'économie. Les résultats de la Partie III sont simulés sous la première structure d'information.

Le premier chapitre détaille les différents scénarios envisagés. Le deuxième chapitre discute des résultats de simulation des scénarios Ampère et Volt si les agents ont une information parfaite de l'économie. Le troisième chapitre effectue quelques tests de robustesse sur les paramètres sensibles du modèle. Enfin, le quatrième chapitre clôt la partie sur une discussion.

⁹⁵ Pour rappel, les principales variables exogènes sont : l'efficacité électrique, la fiscalité carbone, le prix de l'électricité, le prix du gaz, le prix du pétrole, les coûts annualisés du système électrique, les subventions publiques aux filières électriques subventionnées et les revenus de marché du système électrique.

CHAPITRE 1. LES SCÉNARIOS ÉTUDIÉS

La thèse simule les effets de différents scénarios d'évolution des variables énergétiques exogènes. Les variables exogènes sont le prix de gros du gaz, le prix de gros du pétrole, le prix de gros de l'électricité, les tarifs d'acheminement de l'électricité et du gaz (TURPE et ATRD), la fiscalité énergétique, les subventions publiques aux filières de production d'électricité, les coûts annualisés des filières de production d'électricité, les revenus de marché des filières de production d'électricité, et l'efficacité énergétique des usages électriques.

1. Hypothèses d'évolution des variables exogènes du système électrique

Les deux scénarios de Rte étudiés sont *Volt* et *Ampère*. Ils se différencient notamment par une efficacité électrique différente (*cf.* chapitre 2, section 1) et par une évolution du parc électrique différente. Cela se traduit dans le modèle d'optimisation du système électrique par des subventions publiques au système électrique, des échanges d'électricité transfrontaliers, un prix de l'électricité sur le marché de gros, des revenus de marché et une évolution des coûts fixes du système électrique (obtenues à partir du modèle d'optimisation du système électrique) différents. Et, dans le modèle de croissance dynamique (*HyGEM*), cela se traduit par une efficacité électrique différente et une évolution différente des variables simulées par le modèle d'optimisation du système électrique.

Ensuite, les deux scénarios *Volt* et *Ampère* sont déclinés dans *HyGEM* en trois versions d'évolution du prix des combustibles et du prix de la tonne de CO₂ (baseline, haut et bas). Dans le modèle d'optimisation du système électrique, l'évolution du prix des combustibles et du prix du CO₂ affectent les coûts variables du système électrique et, en conséquence, le prix de l'électricité sur le marché de gros. La **Figure 11** illustre l'échange d'information entre les deux modèles.

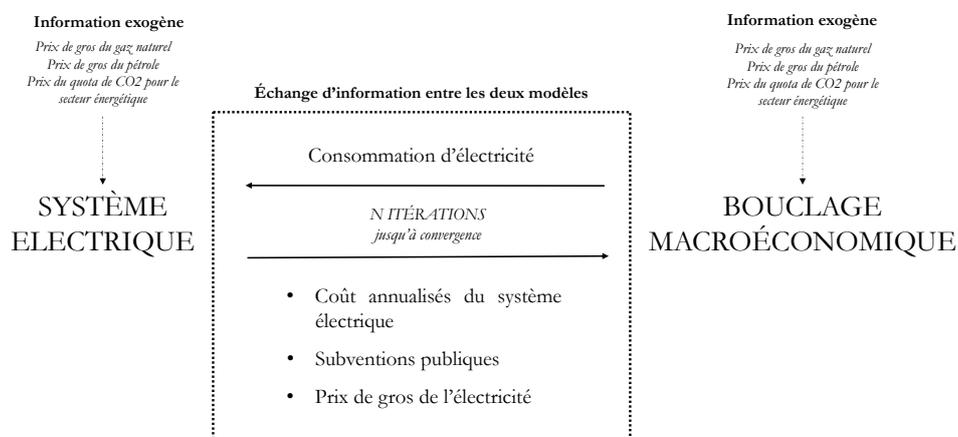


Figure 11 Schématisation de l'échange d'information entre les deux modèles

Les sous-parties suivantes détaillent les trois versions d'évolution considérées pour les prix des combustibles et de la tonne de CO₂.

2. Hypothèses d'évolution du prix hors taxes des énergies et prix du CO₂ sur le marché des quotas

2.1. Prix de détail hors taxes des combustibles et prix du CO₂ sur le marché des quotas

Il existe trois versions d'évolution du prix de gros du gaz naturel et du prix du baril (cf. **Tableau 15 infra**). La baseline (la version médiane) correspond au scénario *Sustainable Development* de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). La baseline fait l'hypothèse, à l'horizon 2035, d'un prix du baril de 61 \$2018, d'un prix du gaz naturel 7.5 \$2018/Mbtu et d'un prix du CO₂ pour l'industrie énergétique de 118 \$2018 la tonne. La version haute correspond au scénario *Stated Policies* de l'AIE qui fait l'hypothèse, à l'horizon 2035, d'un prix du baril de 96 \$2018, d'un prix du gaz naturel 8.4 \$2018/Mbtu et d'un prix CO₂ pour l'industrie énergétique de 38 \$2018 la tonne. La version basse reprend les valeurs pour le prix du gaz naturel et du CO₂ de la baseline, et prend le scénario bas du prix du baril de Saudi Aramco avec un prix de 12 \$2018 le baril à l'horizon 2050⁹⁶, soit un prix de 41 \$2018 le baril à l'horizon 2035.

	Haut	Baseline	Bas
<i>Prix du pétrole</i>	96 \$2018/baril	61 \$2018/baril	41 \$2018/baril
<i>Prix du gaz</i>	8,4 \$2018/Mbtu	7,5 \$2018/Mbtu	7,5 \$2018/Mbtu
<i>Prix du CO₂</i>	38 \$2018/tonne	118 \$2018/tonne	118 \$2018/tonne

Tableau 15 Hypothèses d'évolution du prix du baril, du prix du gaz et du prix du quota de CO₂ à l'horizon 2035 - Source: AIE et Saudi Aramco

Le prix de l'énergie non-électrique est calculé selon une pondération gaz/produits pétroliers⁹⁷ qui correspond à la part de chacun dans la consommation non-électrique totale pour chaque type de consommateur. Par hypothèse, l'évolution du prix des produits raffinés suit celle du prix du baril.

⁹⁶ Il n'existe pas de version basse dans les scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie. Le prix du quota de CO₂ est déjà élevé dans la baseline, c'est pourquoi la version basse est calquée sur la baseline. Le prix du gaz naturel est aussi bas dans la baseline, c'est pourquoi la version basse est calquée sur la baseline.

⁹⁷ Par exemple, le calcul du prix de l'énergie non-électrique hors taxes pour l'entreprise est le suivant :

$$p_t^{nel,f} = p_{t-1}^{nel,f} * \left\{ \begin{array}{l} \underbrace{0,73}_{\text{poids des produits pétroliers}} \cdot (1 + \Delta p_{\text{produits pétroliers}}) + \underbrace{0,27}_{\text{poids du gaz naturel}} \\ * [(1 - \text{part réseau}) \cdot (1 + \Delta p_{\text{gaz}}) + \text{part réseau} \cdot (1 + \Delta \text{ATRD})] \end{array} \right\}$$

La part réseau du prix de détail *bors taxes* du gaz naturel est issue de la base de données Eurostat. L'évolution de l'ATRD (le tarif d'accès aux tiers au réseau de distribution du gaz naturel) suit l'évolution telle que fixée par la CRE jusqu'en 2023, puis une évolution linéaire de 2024 à 2035 correspondant à une évolution moyenne annuelle calculée de l'ATRD6 entre 2019 et 2023 de -0,25%/an. L'évolution de l'ATRT (le tarif d'accès aux tiers au réseau de transport du gaz naturel) n'est pas intégrée dans le modèle car il existe deux types de tarif correspondants à deux opérateurs de réseau différents, ce qui rend le calcul complexe. Les entreprises peuvent être livrées en gaz naturel par deux opérateurs différents : GRT Gaz ou Téréga. Ces opérateurs facturent un ATRT différent. Par manque de données sur le partage Téréga/GRT Gaz dans la fourniture de gaz naturel des secteurs d'activité, le modèle ne prend pas en compte l'évolution de l'ATRT.

L'évolution de l'ATRD considérée après l'année 2020 est affectée par l'incertitude réglementaire qui pèse sur son évolution en France. L'incertitude réglementaire n'est pas déterminante pour les dynamiques du modèle car les trois versions d'évolution du prix des énergie étudiées prennent le même ATRD. Seuls les niveaux changeront.

2.2. Prix de détail de l'électricité

Il existe trois évolutions différentes du prix de gros de l'électricité qui correspondent chacune aux différentes versions d'évolution du prix des produits pétroliers, du prix du gaz naturel et du prix de CO₂ sur le marché des quotas pour l'industrie énergétique. Le prix de gros de l'électricité résulte alors des simulations du modèle d'optimisation du système électrique.

Le prix de détail de l'électricité⁹⁸, *bors taxes*, intègre l'évolution du TURPE. L'évolution du TURPE est celle telle que fixée par la CRE jusqu'en 2020, puis de 2021 à 2035 l'évolution du TURPE suit l'évolution moyenne annuelle du TURPE 5 (2,71% pour le réseau de transport et 2,07% pour le réseau de distribution). Comme pour l'ATRD, l'évolution du TURPE considérée après l'année 2020 est soumise à une incertitude réglementaire en France. Cela n'est pas contraignant car les trois versions d'évolution des prix des énergies considèrent la même évolution du TURPE.

⁹⁸ Pour le ménage, le calcul du prix de détail *bors taxes* de l'électricité est le suivant,

$$p_t^{el,h} = p_{t-1}^{el,h} \cdot [part\ approvisionnement \cdot (1 + \Delta p_{gros\ électricité}) + part\ réseau \cdot (1 + \Delta TURPE_{distribution})]$$

Pour l'entreprise, le calcul du prix de détail *bors taxes* de l'électricité est le suivant,

$$p_t^{el,f} = p_{t-1}^{el,f} \cdot \{part\ approvisionnement \cdot (1 + \Delta p_{gros\ électricité}) + part\ réseau * [1 + poids\ industrie \cdot \Delta TURPE_{transport} + (1 - poids\ industrie) \cdot \Delta TURPE_{distribution}]\}$$

Le paramètre « *poids industrie* » correspond au poids de la consommation d'électricité du secteur de l'industrie dans la consommation d'électricité totale des secteurs d'activité. Cette pondération permet de prendre en compte l'évolution du TURPE pour l'opérateur du réseau de transport d'électricité. En effet, la majeure partie des secteurs d'activité, excepté le secteur industriel, sont fournis en électricité par l'opérateur de distribution d'électricité.

3. Hypothèses d'évolution de la fiscalité énergétique

3.1. Évolution de la fiscalité non-énergétique

La fiscalité énergétique évolue de manière identique dans la baseline, la version basse et la version haute.

Tout d'abord, l'évolution de la taxation des produits pétroliers (TICPE) et la taxation du gaz naturel (TICGN) est gelée jusqu'en 2022 comme prévu par la Loi finance de 2019. Par ailleurs, l'évolution de la TICPE et de la TICGN suit celle de la Loi finance 2018 à partir de 2023. L'évolution de la TICGN suit l'évolution de la composante carbone. L'évolution de la TICPE suit l'évolution de la composante carbone et prend en compte le rattrapage diesel/essence.

L'évolution de la taxation de l'énergie non-électrique prend donc en compte l'évolution de la taxe intérieure de la consommation d'essence, de supercarburant, de gazole, de fioul domestique (pour les ménages), de fioul lourd (pour les secteurs d'activité), et de gaz naturel (cf. **Tableau 16 infra**). Dans le calcul de la taxation de l'énergie non-électrique⁹⁹ pour les deux types de consommateur (ménages et secteurs d'activité), l'évolution de chaque produit pétrolier est pondérée par leur poids respectif dans la consommation totale en énergie non-électrique (données DGEC). La pondération est différente pour les ménages et les entreprises, donc aussi le sera l'évolution de la taxe de l'énergie non-électrique. L'augmentation de la TICPE (hors composante carbone) pour chaque produit énergétique est issue des données Projet Loi Finance. L'évolution de la TICPE hors composante carbone concerne principalement le rattrapage diesel/essence à partir de 2023 pour une durée de 3 ans. La composante carbone évolue de 10,4 euros la tonne de CO₂ à partir de 2023 selon le Projet Loi Finance 2018&2019. Elle passe de 44,6 €/tCO₂ en 2018 à 179,8 €/tCO₂ en 2035.

	2018	2019-2022	2023	2024	2025	2030	2035
<i>Essence (c€/l)</i>	3,2	0	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4
<i>Super (c€/l)</i>	3,3	0	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4
<i>Gazole (c€/l)</i>	6,3	0	5,4	5,3	5,4	2,8	2,8
<i>Fioul domestique (c€/l)</i>	3,7	0	2,8	2,7	2,8	2,8	2,8
<i>Fioul lourd (c€/l)</i>	4,5	0	3,2	3,3	3,2	3,3	3,3
<i>Gaz naturel (€/MWh PCS)</i>	2,6	0	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9

Tableau 16 Évolution de la taxe intérieure sur la consommation de produits énergétiques, y.c. composante carbone – Calculs de l'auteur à partir de données publiques

⁹⁹ La taxe sur l'énergie non-électrique de 2019 à 2035 est fixée selon l'évolution de TICPE de chaque produit pétrolier pondérée par le poids de chaque produit pétrolier dans la consommation totale de produits pétroliers :

$$\tau_t^{nel} = \tau_{t-1}^{nel} + part\ essence * \Delta ticpe_{essence} + part\ supercarburant * \Delta ticpe_{supercarburant} + part\ gazole * \Delta ticpe_{gazole} + part\ fiouldomestique * \Delta ticpe_{fioul\ domestique} + part\ fioullourd * \Delta ticpe_{fioul\ lourd} + part\ gaznaturel * \Delta ticgn_{gaznaturel}$$

3.2. Évolution de la fiscalité électrique

La taxation de l'électricité (TCFE et CSPE) est gelée sur toute la période de simulation. La CSPE est en effet gelée depuis 2016 car elle ne participe plus au développement des énergies renouvelables (cf. partie 3.5 du chapitre 2). La TCFE est principalement indexée sur l'inflation et ne représente que 17,8% des taxes sur l'énergie électrique selon le Projet Loi Finance 2019.¹⁰⁰

¹⁰⁰ L'évolution de la contribution tarifaire d'acheminement (CTA) est laissée de côté par manque de données et par la complexité de son calcul. La CTA ne représente que 10% du total CSPE + CTA +TCFE selon données annexe Tome II projet loi finance 2019, et elle n'est pas vouée à évoluer dans le temps.

CHAPITRE 2. LES RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC INFORMATION PARFAITE

La partie discute des résultats de simulation pour les scénarios envisagés. Ici, les agents de l'économie anticipent l'évolution (transitoire) des variables (exogènes) énergétiques dans le temps. *Les agents ont une information parfaite sur l'état de l'économie à tout horizon temporel. L'évolution des variables énergétiques est perçue comme transitoire par les agents à chaque date car les agents de l'économie savent qu'à chaque date, les variables énergétiques prennent une valeur différente.* Le chapitre 4 comparera cette structure d'information à une structure d'information imparfaite.

La problématique principale est la suivante : *comment, sur le long terme, la transition du système électrique vers un mix décarboné et le changement des comportements de consommation d'électricité affectent le reste de l'économie si les agents anticipent la trajectoire d'évolution des variables énergétiques (exogènes) ?*

1. Les effets de bouclage macroéconomique sur la consommation d'énergie sont importants

Les trajectoires de consommation d'électricité simulées pour Ampère et Volt *avec bouclage macroéconomique* diffèrent sensiblement des trajectoires simulées pour Ampère et Volt *sans bouclage macroéconomique* par RTE dans son Bilan Prévisionnel (cf. **Figure 12 infra**). À l'horizon 2035, la trajectoire du scénario Ampère *sans bouclage macroéconomique* se rapproche plus Ampère bas et Ampère baseline *avec bouclage macroéconomique*. Les écarts de consommation d'électricité par rapport à Ampère *sans bouclage macroéconomique* sont d'environ 10 TWh dans Ampère bas et Ampère baseline, et de 25 TWh dans Ampère haut. Pour Volt, les écarts sont plus importants : 34 TWh pour Volt bas et Volt baseline, et 52 TWh pour Volt haut. Les causes en sont attribuées à trois effets qui sont discutés dans les sous-sections suivantes : l'effet prix, l'effet technologique et l'effet croissance.

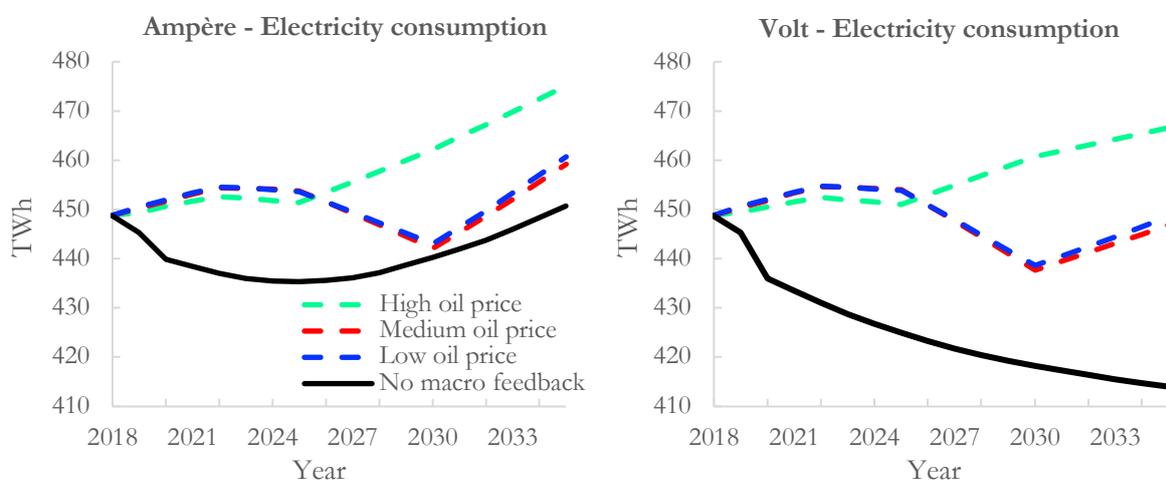


Figure 12 Evolution de la consommation totale d'électricité en TWh

- 1.1. Dans le modèle, les agents de l'économie réagissent sensiblement à l'effet prix dans leurs prises de décision de consommation d'énergie

L'évolution de la demande d'énergie par unité de travail efficace - c.-à-d. redressée des effets de la croissance économique - montre que l'effet prix est important dans des exercices de simulation des trajectoires de consommation d'énergie à long terme.

Dans toutes les versions d'évolution du prix des énergies, l'effet prix est sensible. Pour bien comprendre l'effet prix pour les ménages, le **Tableau 17** illustre la réaction de la consommation d'énergie en unité de travail efficace des agents de l'économie pour le scénario Ampère. Par exemple, en unité de travail efficace, dans Ampère baseline, les ménages diminuent de 23,27% leur consommation d'électricité en 2035 par rapport à 2018 et de 19,86% leur consommation d'énergie non-électrique en 2035 par rapport à 2018. Dans toutes les versions, la consommation d'électricité et la consommation d'énergie non-électrique en unité de travail efficace des agents de l'économie diminue fortement.

		Version	2025	2030	2035
Ménages	Électricité	Haut	-8,41%	-11,43%	-15,00%
		Baseline	-10,90%	-19,95%	-23,27%
		Bas	-12,20%	-21,98%	-26,30%
	Énergie non-électrique	Haut	-13,60%	-23,91%	-32,08%
		Baseline	-5,46%	-12,73%	-19,86%
		Bas	-1,25%	-5,78%	-10,31%
Entreprise	Électricité	Haut	-9,46%	-14,49%	-18,37%
		Baseline	-7,35%	-15,63%	-18,12%
		Bas	-6,70%	-14,24%	-16,05%
	Énergie non-électrique	Haut	-15,54%	-26,77%	-35,98%
		Baseline	-10,21%	-21,43%	-29,72%
		Bas	-7,95%	-17,71%	-24,68%

Tableau 17 Évolution de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère

Pour les ménages, l'effet prix reflète deux composantes : l'effet substitution d'une part et l'effet de revenu d'autre part. L'effet substitution vient modifier le partage entre la consommation d'énergie électrique et la consommation d'énergie non-électrique selon l'évolution relative des efforts technologique et l'évolution relative des prix.

1.1.1. L'effet substitution

- 1.1.1.1. Dans le modèle, sur le long terme, les ménages basent leurs décisions de consommation d'énergie sur le prix relatif des énergies (TTC) davantage que sur l'efficacité énergétique relative quand le prix du baril est relativement plus élevé, et plutôt sur l'efficacité énergétique quand le prix du baril est relativement plus faible

L'effet substitution pour les ménages est mesuré en comparant la trajectoire d'évolution de la consommation d'énergie non-électrique et la trajectoire d'évolution de la consommation

d'électricité (corrigées de la croissance) selon différentes versions d'évolution de prix de l'énergie. Une augmentation relative du prix d'un facteur par rapport à un autre a des effets différents selon la valeur de l'élasticité de substitution inter-énergie. Selon les conditions de premier ordre, la demande relative de l'électricité par rapport à l'énergie non-électrique pour les ménages est la suivante :

$$\frac{El_t^h}{Nel_t^h} = \left[\frac{\alpha_{el}}{\alpha_{nel}} \cdot \frac{p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}}{p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}} \right]^{\sigma_e^h} \cdot \left(\frac{A_t^{el,h}}{A_t^{nel}} \right)^{\sigma_e^h - 1} \quad (63)$$

Pour les deux types de ménage, l'élasticité de substitution inter-énergie est supérieure à 1 dans le modèle. Selon l'équation 63, la demande relative d'électricité devrait diminuer et celle de l'énergie non-électrique devrait augmenter lorsque A_t^{nel} croît plus vite que $A_t^{el,h}$ et lorsque $p_t^{el,h} + TURPE_t^h + \tau_t^{el,h}$ croît plus vite que $p_t^{nel,h} + \tau_t^{nel,h}$.

Dans Ampère haut, l'effet prix (positif) est plus élevé que l'effet technologique (négatif) sur la consommation relative d'électricité des ménages en unité de travail efficace. Les ménages diminuent relativement plus leur consommation d'énergie non-électrique dans Ampère haut en faveur d'une consommation d'électricité relativement plus élevée. En unité de travail efficace, par rapport à 2018, les ménages diminuent leur consommation d'énergie non-électrique de 32% en 2035 et leur consommation d'électricité de 15% en 2035 (cf. **Tableau 17 supra**). Dans Ampère haut, le prix relatif de l'énergie non-électrique augmente à partir de 2022 (cf. **Figure 13 infra**) et l'efficacité électrique relative diminue dans le temps¹⁰¹. Par conséquent, les ménages substituent en faveur de l'électricité dans le temps lorsque le prix de l'énergie non-électrique est relativement plus élevé.

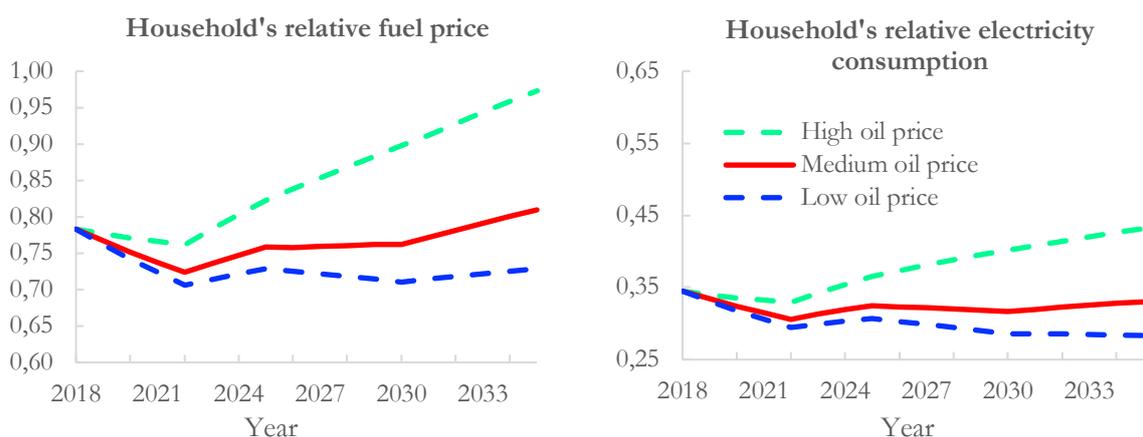


Figure 13 Évolution relative du prix de l'énergie et de la consommation d'énergie pour les ménages en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

¹⁰¹ Dans les trois versions, l'évolution relative de l'efficacité énergétique pour l'électricité par rapport à celle de l'énergie non-électrique est décroissante pour tous les agents de l'économie. Cette hypothèse n'est pas forte car dans la réalité les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique sont concentrés sur les équipements fortement carbonés.

Dans Ampère baseline, l'effet prix (positif) sur la consommation relative d'électricité des ménages sur le long terme domine l'effet technologique (négatif), même si cette relation de dominance est relativement moins forte que dans Ampère haut. Dans Ampère baseline, la consommation relative d'électricité augmente relativement moins sur le long terme car le prix relatif de l'énergie non-électrique est relativement moins élevé. Cette dynamique permet à l'efficacité énergétique d'avoir relativement plus d'effet dans les décisions de consommation relative d'énergie du ménage que dans Ampère haut. Les ménages substituent en faveur de l'énergie non-électrique.

Enfin, dans Ampère bas, l'effet technologique (négatif) sur la consommation relative d'électricité des ménages est plus fort que l'effet prix (positif) sur le long terme. Sur le long terme, la dynamique du prix relatif de l'énergie non-électrique et la dynamique de l'efficacité électrique est identique à Ampère baseline. Les ménages substituent en faveur de l'énergie non-électrique.

1.1.1.2. Dans le modèle, l'évolution du prix de l'énergie non-électrique affecte sensiblement la consommation d'électricité

Les résultats précédents montrent que la substitution de la consommation d'énergie des ménages vers l'électricité est relativement plus forte dans Ampère haut par rapport aux autres versions. Cela vérifie les propriétés d'homogénéité et de symétrie de la demande¹⁰². En effet, empiriquement, la part de l'énergie non-électrique dans les dépenses de consommation des ménages est supérieure à celle de l'électricité. Cela implique que l'élasticité de la demande d'électricité au prix de l'énergie non-électrique est supérieure à l'élasticité de la demande d'énergie non-électrique au prix de l'électricité. Donc, l'effet de la variation du prix de l'énergie non-électrique sur l'utilisation de l'électricité est plus fort que l'effet de la variation du prix de l'électricité sur l'utilisation de l'énergie non-électrique.

1.1.2. Dans le modèle, les ménages réagissent plus à l'effet substitution qu'à l'effet revenu dans leurs prises de décision de consommation d'énergie

En plus de l'effet substitution, l'effet prix reflète aussi un deuxième sous-effet : l'effet de revenu¹⁰³. L'effet revenu correspond à l'effet de la diminution du revenu réel causé par l'augmentation du

¹⁰² Selon les deux propriétés, le système hicksien vérifie l'égalité suivante :

$$s_{el} * \epsilon_{el,nel}^{Hicks} = s_{nel} * \epsilon_{nel,el}^{Hicks}$$

Avec, s_{el} la part de l'électricité dans les dépenses de consommation en énergie, $\epsilon_{el,nel}^H$ l'élasticité de la demande d'électricité au prix de l'énergie non-électrique, s_{nel} la part de l'énergie non-électrique dans les dépenses de consommation en énergie et $\epsilon_{nel,el}^H$ l'élasticité de la demande d'énergie non-électrique au prix de l'électricité.

¹⁰³ L'équation de Slutsky formalise les deux effets au niveau agrégé :

$$\underbrace{\sum_{\text{ménages}} \frac{\partial X_i^{Marshall}}{\partial p_j}}_{\text{effet prix}} = \underbrace{\sum_{\text{ménages}} \frac{\partial X_i^{Hicks}}{\partial p_j}}_{\text{effet substitution}} - \underbrace{\sum_{\text{ménages}} X_j \cdot \frac{\partial X_i}{\partial \text{Revenu}}}_{\text{effet revenu}}$$

coût énergétique sur la consommation des ménages. L'effet revenu est faible dans le modèle car le poids de l'énergie dans les dépenses de consommation totale des ménages est faible. Selon des données de l'OCDE et de la DGEC, l'énergie représente 7% des dépenses totale de consommation des ménages en 2018.

L'effet revenu dépend de deux caractéristiques : le poids respectif des deux types d'énergie dans les dépenses de consommation des ménages et le type de bien qu'est l'énergie (normal ou inférieur). L'énergie non-électrique a un poids plus important que l'électricité dans les dépenses totales en énergie du ménage. Donc, l'effet revenu est plus important en réponse à l'évolution du prix de l'énergie non-électrique. Par ailleurs, l'effet revenu va dépendre de l'élasticité de la demande au revenu et donc du type de bien qu'est l'énergie. La littérature suggère globalement que l'élasticité de la demande d'électricité au revenu est (faiblement) positive¹⁰⁴ et que l'élasticité de la demande des carburants pour le transport au revenu est (fortement) positive¹⁰⁵. Par conséquent, les deux types d'énergie sont des biens dits *normaux*, et l'effet substitution et l'effet revenu vont dans le même sens¹⁰⁶. Sachant que l'élasticité de la demande des carburants est relativement plus importante que celle de la demande d'électricité, l'effet revenu est plus important pour la consommation d'énergie non-électrique que pour la consommation d'électricité. En somme, l'effet revenu diminue (faiblement) la consommation des deux types d'énergie sur le long terme.

1.1.3. Dans le modèle, les ménages non-ricardiens diminuent davantage leur consommation d'énergie que les ménages ricardiens à cause de l'effet revenu

Le **Tableau 18** montre que les ménages non-ricardiens, c'est-à-dire des ménages qui font face à une contrainte de liquidité forte, sont plus sensibles au mouvement des prix des énergies sur le long terme que le ménage ricardien. Dans la modélisation, seule la contrainte budgétaire change dans les caractéristiques des deux ménages hétérogènes. La calibration des paramètres est la même entre les deux types de ménages¹⁰⁷. Par conséquent, l'effet substitution et l'effet technologique sont

Le modèle de la thèse permet d'avoir un effet revenu agrégé (sur chaque type de ménage) car tous les ménages de type ricardien sont identiques et homogènes, pareillement pour les ménages de type non-ricardien. Par conséquent, la dérivée $\frac{\partial X_i}{\partial \text{Revenu}}$ est la même au sein d'un même groupe de ménage. Néanmoins, l'effet entre les deux types de ménages ne sera pas le même car le revenu est généré différemment par les deux ménages hétérogènes.

¹⁰⁴ Fell, Li et Paul (2014) sur des données américaines, et Krishnamurthy et Kristrom (2015) sur données des pays de l'OCDE (dont France) pour l'élasticité de la demande d'électricité au revenu.

¹⁰⁵ Goodwin, Dargay et Hanly (2004) sur des données américaines, Romero-Jordán et al. (2010) sur des données espagnoles, et Douenne (2020) sur des données françaises pour l'élasticité de la demande de fuel (pour le transport) au revenu.

¹⁰⁶ Ce résultat vient de l'équation de Slutsky en termes d'élasticité :

$$\text{Effet total sur le bien } i \text{ d'une variation du prix du bien } j = \text{élasticité de la demande hicksienne du bien } i \text{ par rapport au prix du bien } j - \text{part du bien } j \text{ dans le budget du ménage} * \text{élasticité de la demande du bien } i \text{ au revenu}$$

¹⁰⁷ Dans la réalité, le poids des dépenses de consommation en énergie dans le budget des ménages diffère selon les déciles de revenu et la localisation géographique. Si le modèle avait assumé une calibration différente selon le type de

identiques pour les deux types de ménages. Les écarts de consommation entre les deux types de ménage tiennent donc à l'effet revenu. Par exemple, dans Ampère haut, en unité de travail efficace, le ménage non-ricardien diminue sa consommation d'électricité de 15,34% en 2035 par rapport à 2018 alors que le ménage ricardien diminue la sienne de 14,92% en 2035 par rapport à 2018.

		Version	2025	2030	2035
Ricardien	Électricité	Haut	-8,32%	-11,34%	-14,92%
		Baseline	-10,74%	-19,80%	-23,17%
		Bas	-11,97%	-21,77%	-26,18%
Non-ricardien	Électricité	Haut	-8,79%	-11,83%	-15,34%
		Baseline	-11,60%	-20,60%	-23,70%
		Bas	-13,18%	-22,86%	-26,83%
Ricardien	Énergie non-électrique	Haut	-13,51%	-23,83%	-32,02%
		Baseline	-5,28%	-12,57%	-19,75%
		Bas	-0,99%	-5,52%	-10,16%
Non-ricardien	Énergie non-électrique	Haut	-13,96%	-24,25%	-32,35%
		Baseline	-6,20%	-13,44%	-20,31%
		Bas	-2,34%	-6,84%	-10,95%

Tableau 18 Évolution de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

1.2. Dans le modèle, sur le long terme, l'entreprise base ses décisions de consommation d'énergie sur le prix relatif des énergies (TTC) plutôt que sur l'efficacité énergétique relative, quelle que soit l'évolution du prix des énergies

Quelle que soit la version d'évolution du prix des énergies envisagée, l'effet prix domine l'effet technologique pour l'entreprise. Pour l'entreprise, le prix relatif de l'énergie non-électrique augmente (cf. **Figure 14 infra**) et l'efficacité de l'électricité relative diminue dans le temps. Par unité de travail efficace, elle diminue relativement plus sa consommation d'énergie non-électrique par rapport à sa consommation d'électricité sur le long terme (cf. **Tableau 17 supra**). L'entreprise substitue en faveur de l'électricité sur le long terme.



Figure 14 Évolution relative du prix de l'énergie et de la consommation d'énergie pour l'entreprise en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

ménage, l'ampleur de la diminution de la consommation énergétique du ménage non-ricardien aurait été plus prononcée. L'effet revenu attendu est plus fort. Néanmoins, la dynamique aurait été la même.

- 1.3. Dans le modèle, sur le long terme, l'entreprise est plus sensible aux mouvements des prix des énergies et de la fiscalité carbone que les ménages

L'effet prix, en partie porté par l'évolution de la taxe carbone (cf. le point d'inflexion en 2022 dans la **Figure 13** et **Figure 14 supra**), a un effet plus dépressif sur les entreprises que sur les ménages. En effet, en unité de travail efficace, sur le long terme, l'entreprise diminue relativement plus sa consommation d'énergie non-électrique que les ménages (cf. **Tableau 17 supra**) pour trois raisons. Premièrement, en plus d'un prix de l'énergie non-électrique qui augmente plus rapidement pour l'entreprise que pour les ménages par rapport à 2018 (cf. **Tableau 19 infra**), l'énergie non-électrique représente une part plus importante dans le processus de production de l'entreprise que dans la production de services énergétiques des ménages¹⁰⁸. Deuxièmement, l'énergie étant un facteur complémentaire aux biens durables pour la production de services énergétiques par les ménages, le stock de biens durables existant fonctionne ainsi toujours avec un certain volume d'énergie. La diminution de la consommation d'énergie non-électrique est donc moins importante dans le temps pour le ménage. Troisièmement, le recyclage de la taxation de l'énergie non-électrique par le gouvernement en versements forfaitaires aux ménages permet aussi aux ménages d'atténuer l'effet prix grâce à une augmentation de leur revenu réel dans le temps. Le produit de la taxation de l'énergie non-électrique est presque entièrement redistribué aux ménages par le biais de transferts forfaitaires. L'autre partie des recettes de la taxation de l'énergie non-électrique est redistribuée en subventions aux filières électriques subventionnées. Par ailleurs, la diminution de la consommation d'électricité est plus importante pour les ménages que pour l'entreprise, portée par un prix de détail de l'électricité (TTC) qui augmente relativement plus vite¹⁰⁹.

		Version	2022	2025	2030	2035
Ménages	Électricité	Haut	6,03%	10,40%	15,23%	19,98%
		Baseline	5,99%	10,32%	20,67%	24,52%
		Bas	6,12%	10,56%	20,67%	24,48%
	Énergie non-électrique	Haut	3,13%	15,99%	32,13%	49,11%
		Baseline	-2,02%	6,91%	17,48%	28,75%
		Bas	-4,30%	2,94%	9,50%	15,88%
Entreprise	Électricité	Haut	5,43%	9,93%	14,06%	17,93%
		Baseline	5,38%	9,83%	21,20%	23,81%
		Bas	5,54%	10,13%	21,20%	23,76%
	Énergie non-électrique	Haut	3,08%	18,45%	38,07%	59,00%
		Baseline	-1,79%	9,86%	24,60%	40,01%
		Bas	-3,75%	6,41%	17,53%	28,38%

Tableau 19 Évolution du prix TTC des énergies par rapport à 2018 – Ampère. Le prix de détail de l'électricité (TTC) augmente beaucoup moins rapidement entre 2030-2035 qu'entre 2022 et 2030. La cause en

¹⁰⁸ L'effet total d'une variation du prix du facteur j sur la quantité du facteur i exprimé en termes d'élasticité est :

$$\text{poids du facteur } j * \text{élasticité substitution} + \text{poids du facteur } j * \text{élasticité demande}$$

¹⁰⁹ Le prix de détail de l'électricité augmente plus rapidement pour les ménages que pour les entreprises car la part réseau dans le prix de détail de l'électricité est relativement plus importante. Dans le modèle, la part provisionnement augmente en moyenne moins vite que la part réseau. Cela n'est pas une hypothèse forte sachant que dans la réalité l'augmentation du tarif réglementé de vente de l'électricité réside principalement dans l'évolution du TURPE.

est attribuée à une diminution du prix de l'électricité sur les marchés de gros grâce à l'avènement des énergies renouvelables et à une diminution des moyens de production thermiques. En outre, le prix de gros de l'électricité est relativement plus élevé à l'horizon 2035 dans la version basse et la version base à cause du prix du CO₂ relativement plus élevé. Et, malgré une demande relativement plus élevée dans la version haute, le système de production d'électricité fait appel à relativement plus de nucléaire, d'énergies renouvelables et d'importations. Par conséquent, le prix de gros de l'électricité est relativement plus faible dans la version haute.

- 1.4. Dans le modèle, sur le long terme, les effets croissance viennent atténuer, voire inverser, l'effet conjoint du prix et de l'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie

Pour toutes les versions d'évolution du prix des énergies simulées, l'effet de la croissance sur la consommation d'électricité est fort. Il permet d'inverser la tendance de diminution de la consommation d'électricité en unité de travail efficace des agents par rapport à 2018 (cf. **Figure 15 infra**). L'effet croissance inverse la tendance de diminution de l'électricité dans Ampère haut sur tout l'horizon temporel, et dans Ampère bas et Ampère base à partir de 2030. Ici, le taux de croissance de l'économie est plus élevé que le taux de croissance de l'efficacité électrique, il est donc normal que la demande d'électricité augmente dans le temps dans les trois scénarios¹¹⁰. Par rapport à Ampère base, Ampère haut ajoute 0,90 TWh de consommation d'électricité par an en moyenne, et Ampère bas ajoute 0,09 TWh de consommation d'électricité par an en moyenne.

Par ailleurs, l'effet croissance sur la croissance d'énergie non-électrique est lui aussi important (cf. **Figure 15 infra**). Il permet d'atténuer la diminution de la consommation d'énergie non-électrique en unité de travail efficace dans le temps. Néanmoins, dans Ampère haut et dans Ampère base, l'effet croissance n'est pas assez fort pour inverser la tendance de diminution – où l'effet prix et l'effet technologique dominant – alors qu'il l'est dans Ampère bas. Par rapport à Ampère base, Ampère haut soustrait 0,68 Mtoe de consommation d'électricité par an en moyenne et Ampère bas ajoute 0,50 Mtoe de consommation d'électricité par an en moyenne.

	Version	Ampère
Électricité	Haut	+0,90 TWh/an
	Bas	+0,09 TWh/an
Énergie non-électrique	Haut	-0,68 Mtoe/an
	Bas	+0,50 Mtoe/an

Tableau 20 Écart annuel moyen de la consommation d'énergie par rapport à la base – Ampère

¹¹⁰ Comme décrit en section 6 du chapitre 3 de la Partie II, le taux de croissance de la consommation énergétique est :

$$g_t^{(n)el} = \frac{g^l + g^n + g^l \cdot g^n - g_t^{a(n)el}}{1 + g_t^{a(n)el}}$$

Par conséquent, si le taux d'efficacité (technologique) énergétique est supérieur au taux de croissance de l'économie, la consommation d'énergie devrait baisser dans le temps.

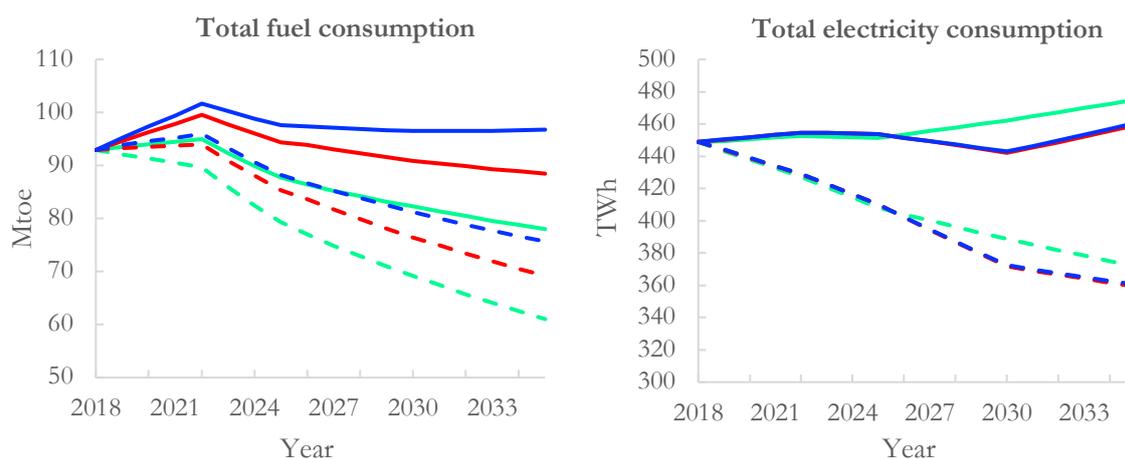


Figure 15 Évolution de la consommation totale d'énergie – Ampère

Légendes :

<i>High oil price with growth</i>	
<i>Low oil price with growth</i>	
<i>Baseline with growth</i>	
<i>High oil price without growth</i>	
<i>Low oil price without growth</i>	
<i>Baseline without growth</i>	

2. Effets agrégés sur les conditions de production de l'entreprise

- 2.1. Dans le modèle, sur le long terme, grâce à un effet d'échelle plus fort que l'effet substitution et une demande agrégée relativement plus élevée, un prix relativement plus élevé de l'énergie (ITC) a un effet moins dépressif sur l'output

Alors que l'utilisation de l'énergie efficace diminue relativement plus dans Ampère haut, l'évolution de l'output et l'évolution du composite travail-capital diminuent relativement moins par rapport aux deux autres versions sur le long terme (cf. **Figure 16 infra**). Il existe deux causes à cela. Premièrement, du côté de l'offre agrégée, sur le long terme, l'évolution du prix (ITC) des énergies se traduit par un effet d'échelle¹¹¹ assez important pour dominer l'effet de substitution entre les facteurs de production. Dans Ampère haut, le coût marginal de production augmente sur le long terme. En conséquence, la production diminue et la demande pour les deux facteurs de production agrégés baisse (cf. **Figure 16 infra**). Sachant que les deux facteurs de production agrégés sont imparfaitement substituables, l'effet d'échelle l'emporte sur l'effet substitution. Alors que dans Ampère bas, sur le long terme, le coût unitaire énergétique diminue, l'utilisation de l'énergie efficace

¹¹¹ En plus de l'effet substitution (à production constante), l'effet prix se décompose en un deuxième effet pour l'entreprise : l'effet d'échelle. L'effet d'échelle mesure la sensibilité de l'échelle de la production à la variation du prix d'un facteur de production. L'effet d'échelle rend les facteurs de production complémentaires ; contrairement à l'effet substitution qui, dans le modèle, les rend substituables. Surtout, l'énergie efficace est pour l'entreprise un facteur de production normal. Lorsque le prix d'un facteur de production normal augmente, l'entreprise diminue sa production et sa demande pour tous les facteurs de production.

par l'entreprise augmente, et la production et le composite travail-capital s'ajustent relativement plus à la baisse. Dans ce cas, l'effet substitution l'emporte sur l'effet d'échelle. Deuxièmement, *du côté de la demande agrégée*, la demande en biens et de services des ménages adressée à l'entreprise (cf. **Tableau 21 infra**) est relativement plus élevée dans Ampère haut, ce qui amorti l'effet négatif du prix de l'énergie sur la production de l'entreprise.

	Non-durable goods	Durable goods	Capital goods	Export goods
Haut	0,047%	-0,062%	-0,021%	0,087%
Baseline	0,099%	-0,143%	-0,031%	0,069%
Bas	0,137%	-0,231%	-0,042%	0,053%

Tableau 21 Taux de croissance annuel moyen des variables sélectionnées - *Ampère*

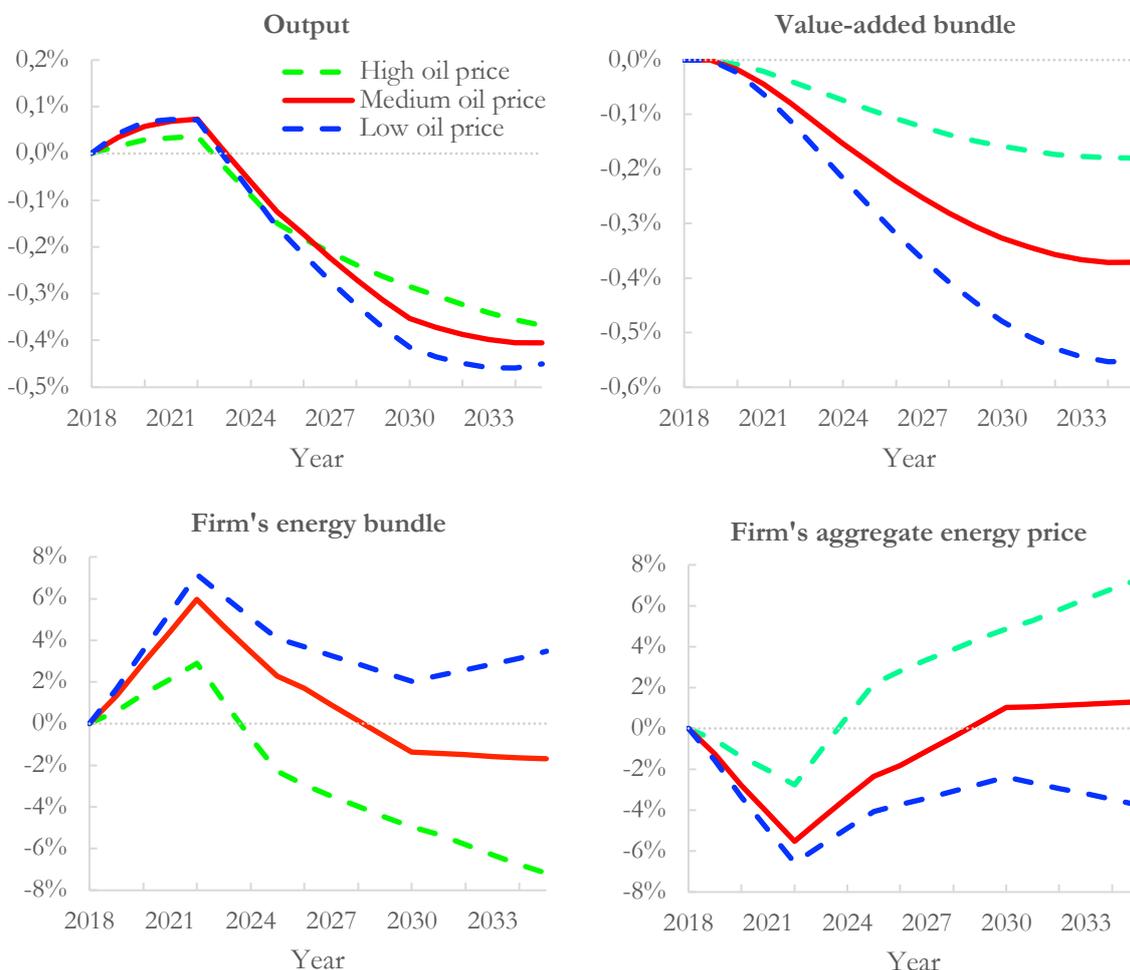


Figure 16 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – *Ampère*

2.2. Dans le modèle, sur le long terme, l'évolution de la fiscalité carbone pèse sur la production de l'entreprise

Dans les trois versions, sur le long terme, l'effet dépressif de l'évolution du prix des énergies (TTC) sur l'output est dû principalement au dégel de l'évolution de la fiscalité carbone à partir de 2023.

Sur le court terme, le prix relatif de l'énergie non-électrique diminue grâce au gel de la fiscalité carbone (cf. **Figure 14 supra**). L'output et le facteur énergétique augmentent, et le facteur travail-capital diminue. Ici, l'effet substitution est plus fort que l'effet d'échelle. À partir de 2023, le prix relatif de l'énergie non-électrique augmente à cause du dégel de la fiscalité carbone. Alors, l'entreprise diminue sa production réelle de biens et services sous la pression de la composante carbone. Par conséquent, l'évolution de la fiscalité carbone change sensiblement les dynamiques du côté de l'entreprise.

2.3. Toutefois, dans le modèle, l'effet de la variation des prix des énergies (TTC) sur la production de l'entreprise est faible

L'effet des chocs de prix de l'énergie (TTC) sur la production, l'utilisation du facteur capital et travail, et les coûts de production sont relativement faibles en niveau (cf. **Figure 17 infra**). Au pire, en 2035, l'output diminue d'environ 0.45% par rapport à 2018 dans Ampère bas, et au mieux l'output diminue de 0.38% par rapport à 2018 dans Ampère haut. L'effet de cette diminution de l'offre de l'économie sur la croissance n'est donc pas significatif. Ce résultat est intuitif car l'ampleur de l'effet d'échelle et l'effet substitution dépendent de la part du facteur de production dans le processus de production dont le prix bouge¹¹². Or, le poids de l'énergie dans les coûts totaux de production des secteurs d'activité est faible au niveau agrégé. Selon des données de l'OCDE et de la DGEC, l'énergie représente environ 2,6% des coûts totaux de production des secteurs d'activité en 2018 selon les données de la DGEC.

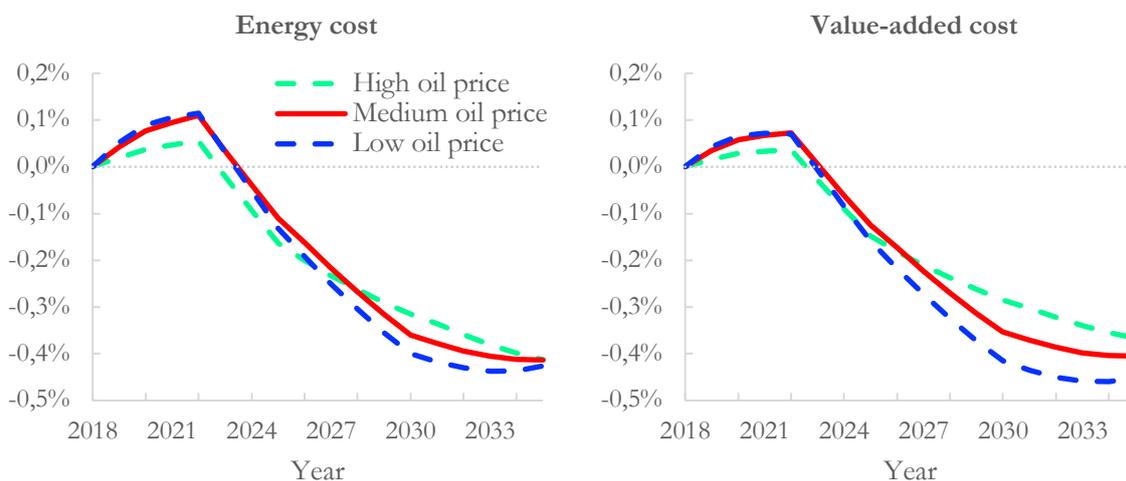


Figure 17 Évolution des coûts de production de l'entreprise en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

¹¹² L'effet total d'une variation du prix du facteur j sur la quantité du facteur i exprimé en matière d'élasticité est :
*part du bien j * élasticité de substitution + part du bien j * élasticité de la demande*

3. Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages

Pour ne pas avoir des changements trop brusques de leur utilité, les agents vont réallouer leur portefeuille de consommation et d'actifs en réponse aux variations du prix des énergies (TTC) et en réponse aux variations des coûts annualisés du système électrique sur le long terme. Les sous-sections suivantes en donnent les conséquences sur les agrégats de consommation et d'investissement.

- 3.1. Dans le modèle, avant la mise en œuvre du dégel de la taxe carbone, l'effet de l'annonce de l'augmentation de la taxe carbone sur l'investissement du ménage ricardien est sensible

Pour se prémunir face à la hausse future de la taxe carbone, le ménage ricardien diffère son plan d'épargne. En effet, le ménage ricardien anticipe que l'entreprise diminue sa demande du facteur capital dans le temps en réponse à l'évolution du prix des énergies. Alors, pour minimiser les coûts d'ajustement du capital, le ménage diminue dès la période d'intérim, avant la date de mise en œuvre de l'augmentation de la taxe carbone, son investissement en capital physique jusqu'à 2024 (*cf. Figure 18 infra*). Cette diminution de l'épargne augmente sa consommation en biens et services, notamment ses achats de biens durables. L'investissement en capital diminue relativement moins dans Ampère haut car la demande du facteur capital diminue relativement moins sur le long terme. Passé cette date, le ménage reprend son plan d'épargne au détriment de ses achats en biens durables (*cf. sous-sections infra*).

- 3.2. Dans le modèle, sur le long terme, par unité de travail efficace, le ménage ricardien absorbe les pics de prix des énergies en augmentant l'investissement en capital physique (hors secteur électrique) et en diminuant l'investissement en biens durables

Pour le ménage ricardien, l'offre de capital est en concurrence directe avec l'investissement en biens durables pour la production de services énergétiques de logement et de transport. Grâce à leur durabilité respective, les deux types actifs peuvent être revendus dans le futur. Alors des mécanismes de rééquilibrage intertemporel du portefeuille d'actifs par le ménage ricardien s'enclenchent. Les équations d'Euler permettent de savoir comment le ménage décide de rééquilibrer son portefeuille d'actifs. En combinant l'équation d'Euler des biens durables et l'équation d'Euler du capital physique (*cf. annexe 2.H de la Partie II*), on obtient la relation suivante

$$\frac{UmX_{R,t+1}}{q_{k,t}} [r_{t+1} \cdot (1 - \tau_k) + (1 - \delta_k) \cdot q_{k,t+1}] = UmD_{R,t+1} + UmX_{R,t+1} \cdot (1 - \delta_d) \quad (64)$$

Pour rééquilibrer son portefeuille d'actifs à l'arrivée de nouvelles informations sur l'évolution des variables exogènes, le ménage ricardien cherche à égaliser le retour sur le capital physique au retour sur les biens durables. L'évolution du prix réel du capital (*cf.* le graphique « capital user cost » dans la **Figure 18** *infra*) est portée par les dynamiques de la valeur attendue du taux de location futur du capital, r_{t+1} , et du prix réel futur du capital, $q_{k,t+1}$.

L'équation 64 dans une version simplifiée donne :

$$\frac{r_{t+1}}{q_{k,t}} \cdot (1 - \tau_k) + (1 - \delta_k) \cdot \frac{q_{k,t+1}}{q_{k,t}} - (1 - \delta_d) = uc_{d,t} \quad (65)$$

D'après l'équation 65, le coût d'usage des biens durables, $uc_{d,t}$, évolue en sens inverse du prix (actuel) réel du capital, $q_{k,t}$, de manière à rééquilibrer le portefeuille d'actifs du ménage ricardien, ce qui est vérifié dans le modèle.

À partir de l'année 2025, dans les trois versions d'évolution du prix des énergies, le ménage ricardien va préférer investir dans le capital physique plutôt que d'investir dans les biens durables (*cf.* **Figure 18** *infra*). Les dynamiques du coût d'usage des deux actifs se transmettent dans les décisions d'investissement des ménages¹¹³. Dans Ampère haut, le ménage ricardien sait que le coût d'usage du bien durable diminue après 2024 pour un certain temps¹¹⁴. En anticipation, il va donc relativement plus investir dans les biens durables jusqu'à 2024 pour augmenter son stock de biens durables durant la période où le coût d'usage du bien durable est le plus faible (entre 2024 et 2031). Aussi, sur la phase d'avant mise en œuvre du dégel de la taxe carbone, le ménage ricardien augmente fortement son investissement en biens durables en réponse à la diminution de l'investissement en

¹¹³ Le coût d'usage des biens durables est plus volatile que le coût d'usage du capital. Le résultat est intuitif pour plusieurs raisons :

- L'énergie représente un poids plus important des dépenses de consommation du ménage que des coûts de production de l'entreprise ;
- La durabilité des biens durables est plus faible que celle des biens de capital. Le ménage renouvelle plus souvent son stock de biens durables que l'entreprise renouvelle son stock de capital ;
- Dans le modèle, l'énergie est en lien direct avec le stock de biens durables dans la fonction de production des services énergétiques, ES_t , alors que le capital est en lien indirect avec l'énergie via le composite travail-capital, Y_t ;
- Comme le soulignent Pindyck et Rotemberg (1984), la taille des coûts d'ajustement du capital influence la manière dont la demande d'énergie et des autres facteurs de production réagissent à des changements dans le prix des énergies. Dans le modèle, l'investissement en capital physique est soumis à des coûts d'ajustement sur le long terme qui viennent freiner le processus d'ajustement ;
- Le stock de capital physique pèse plus que le stock de biens durables dans le portefeuille d'actifs du ménage ricardien. Par conséquent, pour réarranger son portefeuille d'actifs, il suffit d'une petite variation du coût d'usage du capital pour ajuster le niveau des biens en capital à la baisse ou à la hausse. Inversement, il faut une variation plus importante du coût d'usage des biens durables pour ajuster le niveau des biens durables à la baisse ou à la hausse. Par exemple, si le ménage ricardien souhaite plus investir en capital, pour réarranger son portefeuille d'actifs en faveur des biens de capital, il va lui falloir ajuster relativement plus à la baisse ses achats en biens durables en réponse à une petite variation à la hausse des biens de capital.

¹¹⁴ La diminution du coût d'usage du bien durable indique que le coût d'opportunité de détenir le bien durable au lieu de le vendre diminue. Donc, le ménage va préférer détenir des biens durables sur la période en question.

capital. En effet, le ménage anticipe la diminution de la demande de capital de l'entreprise après la mise en œuvre du dégel de la taxe carbone sur le long terme. Il va diminuer son investissement en capital dès l'annonce de l'évolution de la taxe carbone, en 2019, sans attendre la date de mise en application du dégel de la fiscalité carbone, en 2023, pour limiter les coûts d'ajustement du capital.

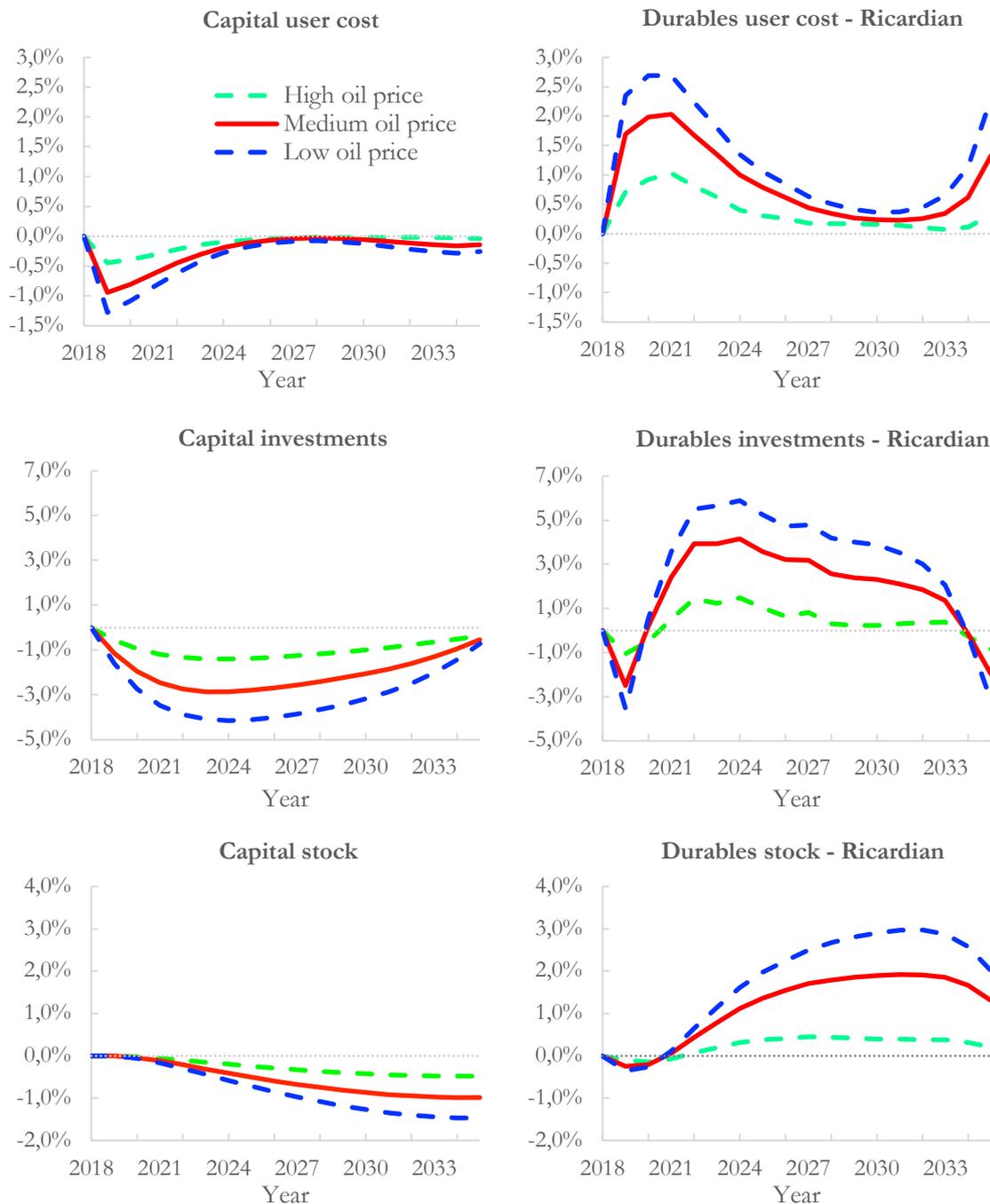


Figure 18 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère

- 3.3. Dans le modèle, sur le long terme, un prix des énergies relativement plus élevé affecte négativement la production de services énergétiques par le ménage ricardien malgré une efficacité énergétique accrue

Lorsque le prix des énergies (ITC) augmente relativement plus sur le long terme, la production de services énergétiques diminue relativement plus (cf. **Figure 19 infra**) malgré des équipements de plus en plus efficaces énergétiquement. Les dynamiques de long terme de l'énergie efficace et des biens durables vont influencer la production de services énergétiques. En effet, la variation du prix des énergie affecte directement le coût d'opération des biens durables, c'est-à-dire le prix des services énergétiques, pour la production des services énergétiques (cf. **Figure 19 infra**). Lorsque le prix des énergies augmente relativement plus, sur le long terme, le stock de biens durables et l'énergie efficace diminuent, et le prix des services énergétiques augmente. Cela a pour conséquence de diminuer les services énergétiques en unité de travail efficace sur le long terme. Ici, l'effet substitution sur la production des services énergétiques est plus fort que l'effet technologique.

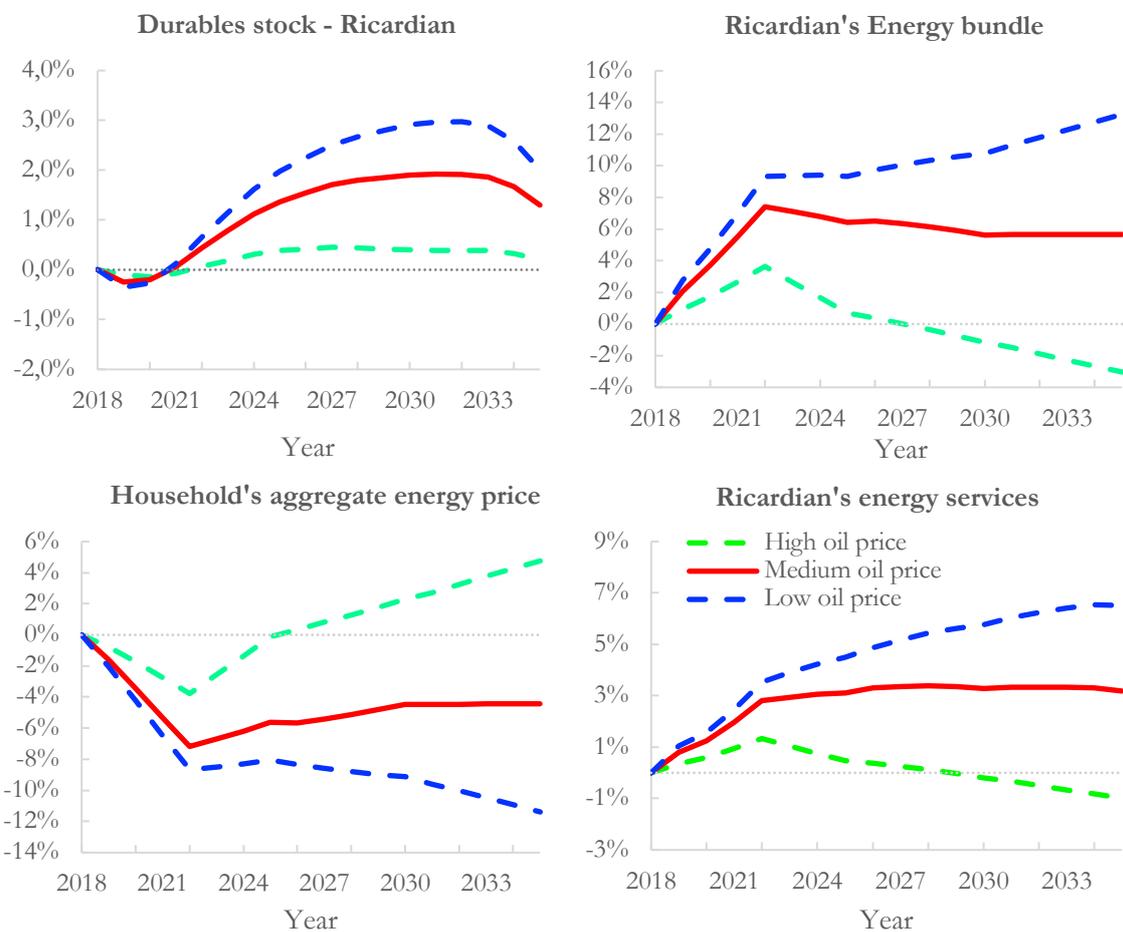


Figure 19 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

Dans Ampère bas, le ménage ricardien va produire de plus en plus de services énergétiques dans le temps grâce à l'augmentation conjointe du stock de biens durables et de l'énergie agrégée. Dans Ampère baseline, malgré une diminution de l'utilisation de l'énergie efficace sur le long terme, les services énergétiques en unité de travail efficace augmentent sur le long terme, portés par l'augmentation du stock de biens durables et l'augmentation de l'efficacité énergétique. L'efficacité

énergétique va permettre au ménage de produire autant, voire plus, de services énergétiques avec moins d'énergie. La diminution du stock de biens durables entre 2033 et 2035 affecte peu les services énergétiques dans Ampère bas et Ampère baseline grâce à une énergie efficace accrue.

- 3.4. Dans le modèle, en réponse aux mouvements du prix des énergies (ITC), l'investissement en biens durables du ménage contraint par ses liquidités est relativement plus affecté que celui du ménage non-contraint par ses liquidités

Malgré une réponse de l'énergie efficace proche de celle du ménage ricardien¹¹⁵, dans les trois versions d'évolution du prix des énergies, sur le long terme, l'investissement en biens durables du ménage non-ricardien diminue relativement plus que celui du ménage ricardien (*cf. Figure 20 infra*). À l'horizon 2035, l'investissement en biens durables du ménage non-ricardien chute de 6,5% par rapport à 2018 dans Ampère bas, alors que celui du ménage ricardien chute de 3,2% par rapport à 2018 dans Ampère bas. Sachant que le coût d'usage des biens durables augmente dans le temps, le ménage non-ricardien va relativement plus diminuer son investissement en biens durables pour diminuer sur le long terme les coûts associés à l'utilisation des biens durables. En réponse à un choc de prix des énergies, le ménage non-ricardien n'a d'autres choix que de diminuer sa consommation de biens durables, alors que le ménage ricardien peut diminuer en réponse son investissement en capital physique (son épargne) sans diminuer sa consommation de biens durables. En effet, le ménage non-ricardien ne possède pas d'actif « tampon » comme le ménage ricardien. Grâce à son portefeuille d'actifs, le ménage ricardien garde un niveau d'investissement en biens durables soutenu et au-dessus de son niveau initial en 2018 jusqu'en 2033. Tandis que le ménage non-ricardien diminue plus rapidement son investissement en biens durables et atteint des niveaux en-dessous de son état initial en 2018 dès l'année 2030 dans Ampère bas et Ampère baseline, et dès 2019 dans Ampère haut. Donc, la réponse de son investissement en biens durables aux divers chocs est relativement plus sensible que celle du ménage ricardien.

¹¹⁵ Le ménage ricardien correspond au ménage qui peut arbitrer dans le temps entre consommation future et consommation présente grâce à son portefeuille d'actifs, donc à l'accès aux marchés financiers. Tandis que le ménage non-ricardien ne peut pas optimiser car il n'a pas accès aux marchés financiers à travers l'offre de capital physique.

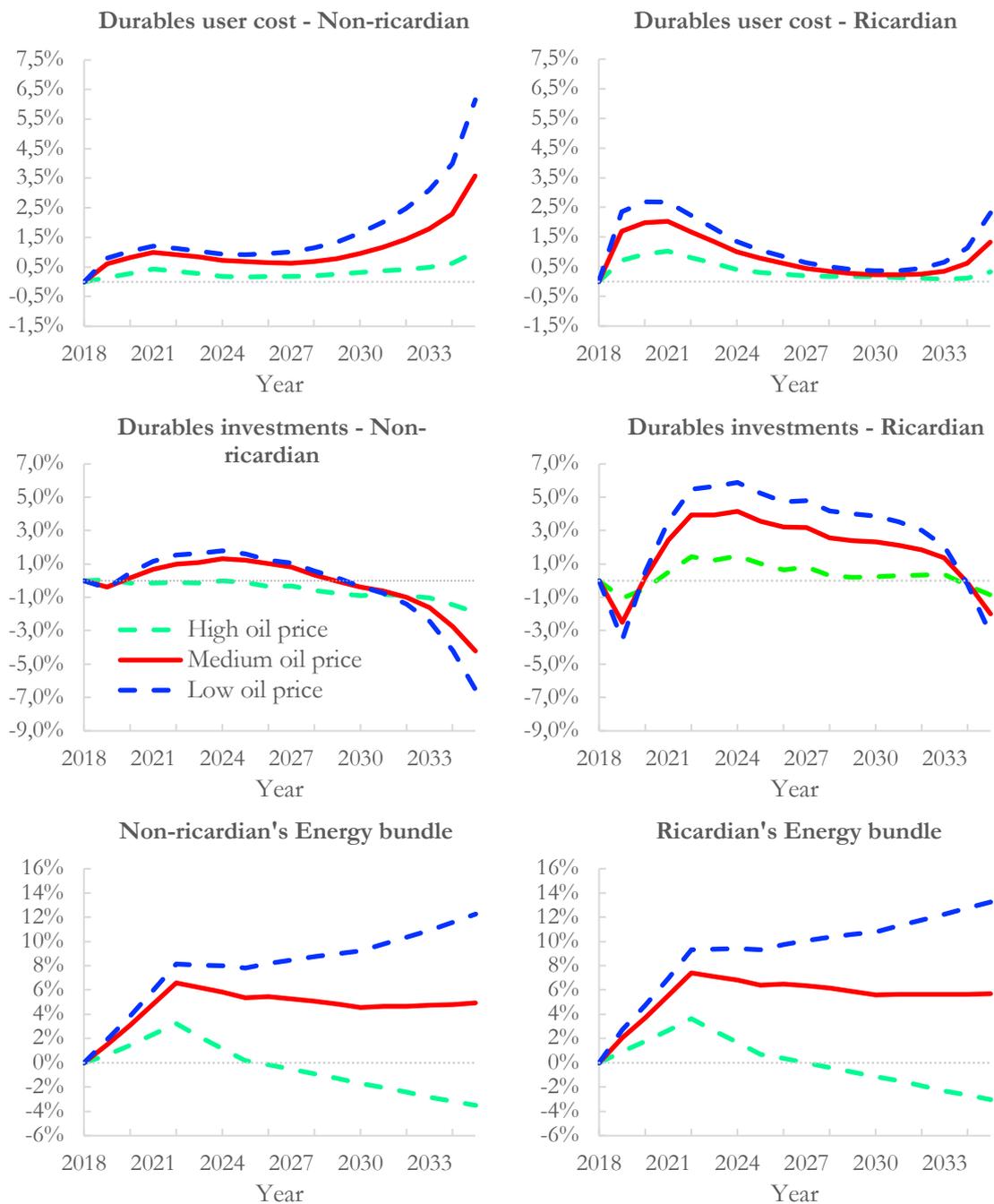


Figure 20 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

3.5. Dans le modèle, sur le long terme, un prix des énergies relativement plus élevé affecte relativement plus la production de services énergétiques du ménage non-ricardien

Les résultats de la section précédente ont pour conséquence que le ménage non-ricardien diminue relativement plus son stock de biens durables et sa production de services énergétiques sur le long terme (*cf. Figure 21 infra*). Le stock de biens durables du ménage non-ricardien diminue dès l'année 2028 dans Ampère bas et Ampère baseline, alors que celui du ménage ricardien diminue à partir de 2034. En conséquence, à l'horizon 2035, un prix des énergies relativement plus élevé diminue de

1,7% la production de services énergétiques du ménage non-ricardien par rapport à 2018. En comparaison, celle du ménage ricardien diminue de 1% en 2035 par rapport à 2018. En conséquence, le ménage substitue en faveur des biens non-durables¹¹⁶ (cf. section 3.7).

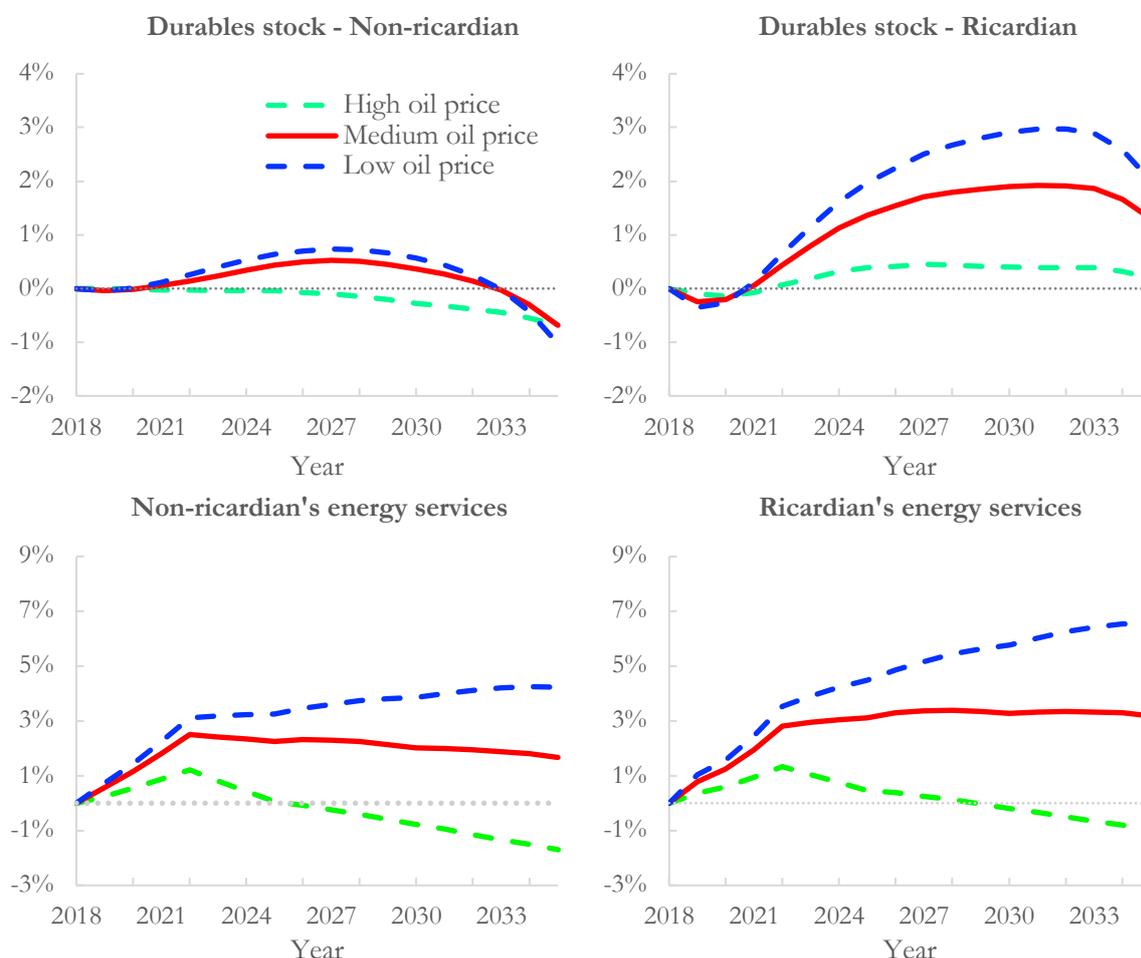


Figure 21 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

3.6. Dans le modèle, les consommations brutes d'électricité et d'énergie non-électrique du ménage en unité de travail efficace diminuent lorsque le prix des énergies est relativement plus élevé, mais les services énergétiques en unité de travail efficace augmentent grâce aux gains d'efficacité énergétique

Les agents de l'économie peuvent diminuer leur consommation d'électricité grâce au changement technologique. En effet, grâce à une efficacité énergétique accrue dans le temps, ils peuvent obtenir une même unité de service énergétique en utilisant moins d'énergie ou obtenir plus d'unité de services énergétiques en consommant autant d'énergie qu'avant.

¹¹⁶ Les ménages ont un panier de biens de consommation, C_t^i , composé de biens non-durables, X_t^i , et de services énergétiques, ES_t^i , selon la fonction mathématique suivante :

$$C_t^i = \left[\alpha_x \cdot X_t^i \frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c} + (1 - \alpha_x) \cdot ES_t^i \frac{\sigma_c - 1}{\sigma_c} \right]^{\frac{\sigma_c}{\sigma_c - 1}}$$

Pour les ménages, la réaction de l'énergie efficace¹¹⁷ par unité de travail efficace, E_t^i , sur le long terme est positive dans Ampère bas et dans Ampère baseline sur le long terme (cf. **Figure 22 infra**), alors que les demandes brutes d'énergie non-électrique, Nel_t^i , et d'électricité, El_t^i , par unité de travail efficace diminuent sur le long terme (cf. **Tableau 17 supra**). Grâce à l'efficacité énergétique - A_t^{nel} et $A_t^{el,h}$ sont supérieurs à 1 et croissent dans le temps - les ménages peuvent obtenir plus de services énergétiques en augmentant l'utilisation de l'énergie efficace pour la production de services énergétiques. Dans Ampère haut, l'efficacité énergétique n'est pas suffisante pour atténuer l'effet de l'augmentation du prix des énergies (TTC) sur l'utilisation de l'énergie efficace et la production de services énergétiques.

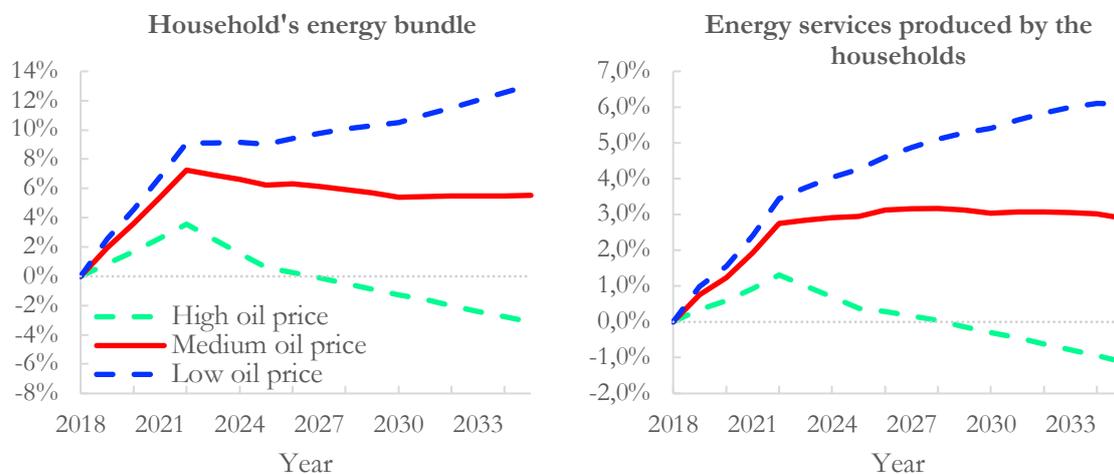


Figure 22 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère

3.7. Dans le modèle, les pics de prix des énergies sont absorbés en partie par les ménages par une substitution entre les services rendus par la consommation conjointe d'énergie efficace et de biens durables, et les biens de consommation non-durables

Dans Ampère haut, pour les deux types de ménages, et dans Ampère baseline, pour le ménage non-ricardien, le pic de prix des énergies est absorbé en partie par une substitution entre les services énergétiques et la consommation de biens non-durables (cf. **Figure 23 infra**). Cela vérifie l'hypothèse de substituabilité imparfaite entre les services énergétiques et les biens non-durables posée dans le modèle. La diminution des services énergétiques augmente la consommation de biens non-durables grâce à l'effet substitution. Malgré l'augmentation du revenu réel grâce au mécanisme de redistribution (cf. section 4.2 *infra*), les ménages diminuent leur production de services énergétiques

¹¹⁷ Pour rappel, les services énergétiques sont produits à partir de la fonction suivante :

$$E_t^i = \left[\alpha_{el} \cdot (A_t^{el,h} \cdot El_t^i)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} + \alpha_{nel} \cdot (A_t^{nel} \cdot Nel_t^i)^{\frac{\sigma_e^h - 1}{\sigma_e^h}} \right]^{\frac{\sigma_e^h}{\sigma_e^h - 1}}$$

en faveur d'une consommation en biens non-durables plus élevée. Alors que dans Ampère bas, pour les deux types de ménage, l'effet revenu domine l'effet substitution. Malgré l'augmentation des services énergétiques sur le long terme, les ménages augmentent aussi leur consommation de biens non-durables. Le résultat est dû à l'augmentation du revenu réel des ménages grâce (i) au mécanisme de redistribution du gouvernement, qui est relativement plus élevé dans Ampère bas (cf. **Figure 24** *infra*) et (ii) à la diminution du prix de l'énergie sur le long terme.

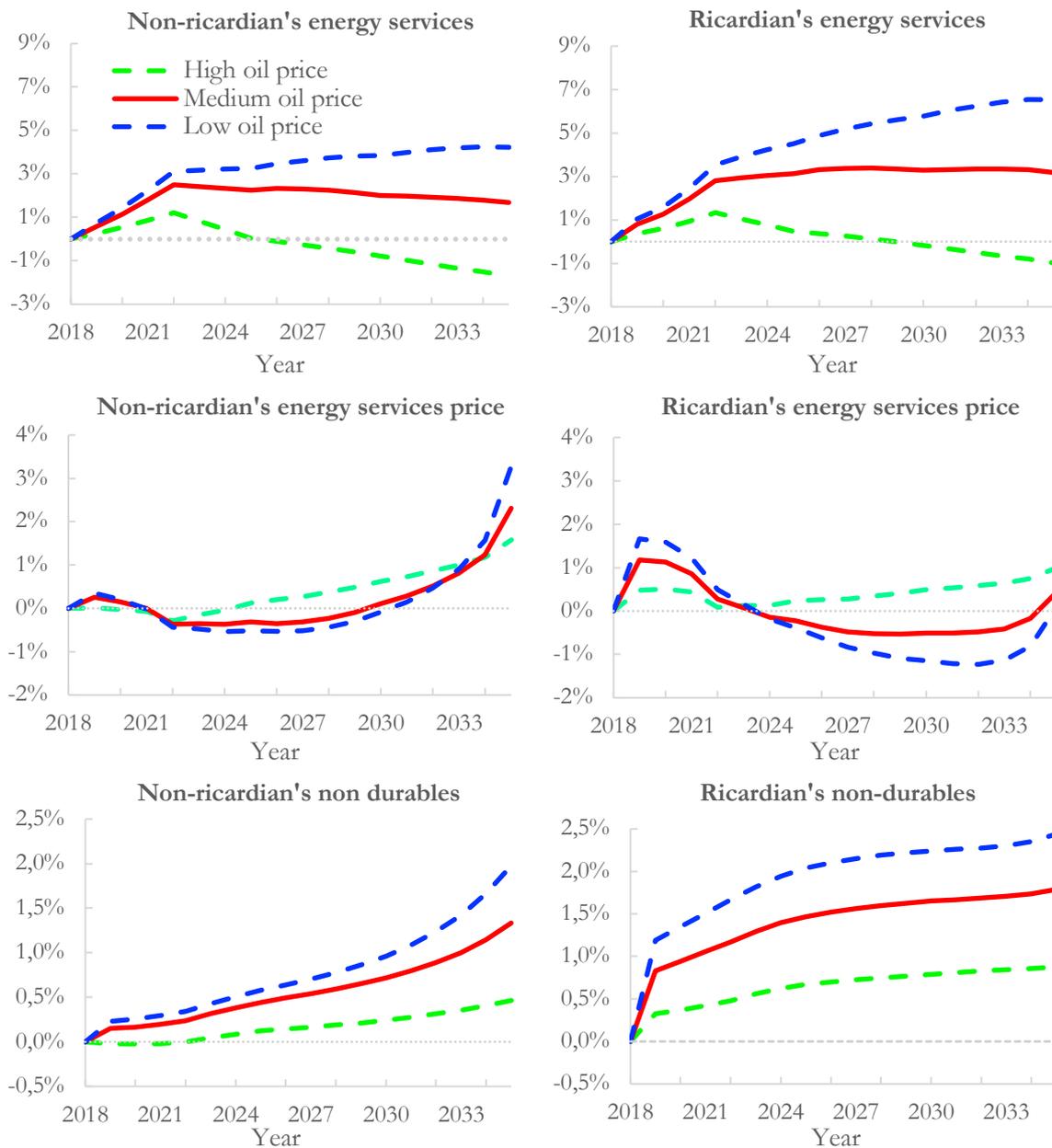


Figure 23 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018¹¹⁸ – Ampère

¹¹⁸ Le prix des services énergétiques « rebique » en fin de période à cause du coût d'usage des biens durables (cf. section 3.3 et 3.4 *supra*).

3.8. Dans le modèle, la consommation de biens non-durables des ménages est « lissée » sur le long terme

La dynamique de la consommation des biens non-durables est « lissée » dans le temps pour les deux ménages (*cf. Figure 23 supra*) grâce au mécanisme de redistribution que met en place le gouvernement. L'investissement des biens durables (et les services énergétiques) en unité de travail efficace fluctue plus que la consommation de biens non-durables, ce qui reflète les comportements de lissage des ménages supposés ici *forward-looking*. Les deux types de ménage prennent en compte le revenu présent et futur dans leurs prises de décision, d'autant plus qu'ils ont une connaissance de l'évolution de leur revenu futur sur tout l'horizon temporel. Or, dans le modèle, leur revenu réel en unité de travail efficace évolue dans le temps grâce au mécanisme de redistribution croissant (*cf. Figure 24 infra*). Les ménages préfèrent étendre sur le temps l'effet d'un changement dans leur revenu réel sur la consommation de biens non-durables plutôt que de modifier leur profil consommation de manière abrupte¹¹⁹.

3.8.1. Dans le modèle, le portefeuille d'actifs du ménage ricardien et le mécanisme de redistribution amortissent l'effet de l'évolution du prix des énergies sur la consommation en biens non-durables

Pour le ménage ricardien, à partir de 2020¹²⁰, la réponse des biens non-durables est beaucoup plus lisse que la réponse des biens durables (*cf. Figure 20 et Figure 23 supra*). En effet, le ménage ricardien va pouvoir lisser sa consommation de biens non-durables dans le temps grâce à son portefeuille d'actifs. Malgré une diminution du salaire réelle¹²¹, jusqu'en 2025, la consommation de biens non-durables augmente fortement. Sur le court terme, le ménage ricardien désinvestit en capital (désépargne) pour pouvoir investir relativement plus dans les biens durables. Cela lui permet d'amortir l'effet de l'évolution de la fiscalité carbone sur les services énergétiques en augmentant le stock de biens durables dans le temps. Par ailleurs à partir de 2026, le gain d'épargne ne freine pas le ménage ricardien dans sa consommation de biens non-durables grâce à des transferts budgétaires de la part du gouvernement de plus en plus élevés (*cf. Figure 24 infra*). En revanche, à partir de

¹¹⁹ Les données agrégées empiriques confirment ce résultat du modèle. Par exemple, Hall (1978) montre que la consommation de biens non-durables suit un processus autorégressif d'ordre 1, décrivant un ajustement lisse en réponse à un changement dans le revenu. Et, Attanasio (1999) montre que les dépenses en biens durables sont plus volatiles que les dépenses en biens non-durables car le ménage préfère toujours un profil de consommation sans changement abrupt plutôt qu'un profil de consommation fluctuant.

¹²⁰ L'année 2019 est la seule année où l'évolution des variables énergétiques exogènes est non-anticipée par les agents de l'économie. Ils apprennent en 2019, l'année qui suit l'année de base de simulation (2018), la trajectoire future des variables énergétiques exogènes. Cette contrainte est imposée pour des soucis calculatoires. C'est pourquoi sur les figures, l'année 2019 est une année où les variables endogènes sautent de manière abrupte.

¹²¹ L'augmentation du prix des énergies (ITC) de l'entreprise dans Ampère haut augmente les coûts de production de l'entreprise, et donc diminue le salaire réel. Dans le modèle, l'entreprise ne peut pas ajuster son prix de vente. Donc, elle ajuste la quantité de facteurs de production qu'elle adresse aux ménages en réponse à la variation du prix des énergies. Or, l'offre et la demande de travail sont fixes, donc c'est le salaire nominal qui prend tout l'ajustement.

2024, la consommation de biens non-durables du ménage ricardien augmente moins fortement car le ménage commence à épargner de nouveau en anticipation de l'augmentation de la fiscalité carbone sur le long terme. Par conséquent, grâce aux arbitrages de court terme, le ménage ricardien lisse sa consommation au moment de la mise en application du dégel de la taxe carbone, et ce, jusqu'à la fin de de l'horizon d'étude.

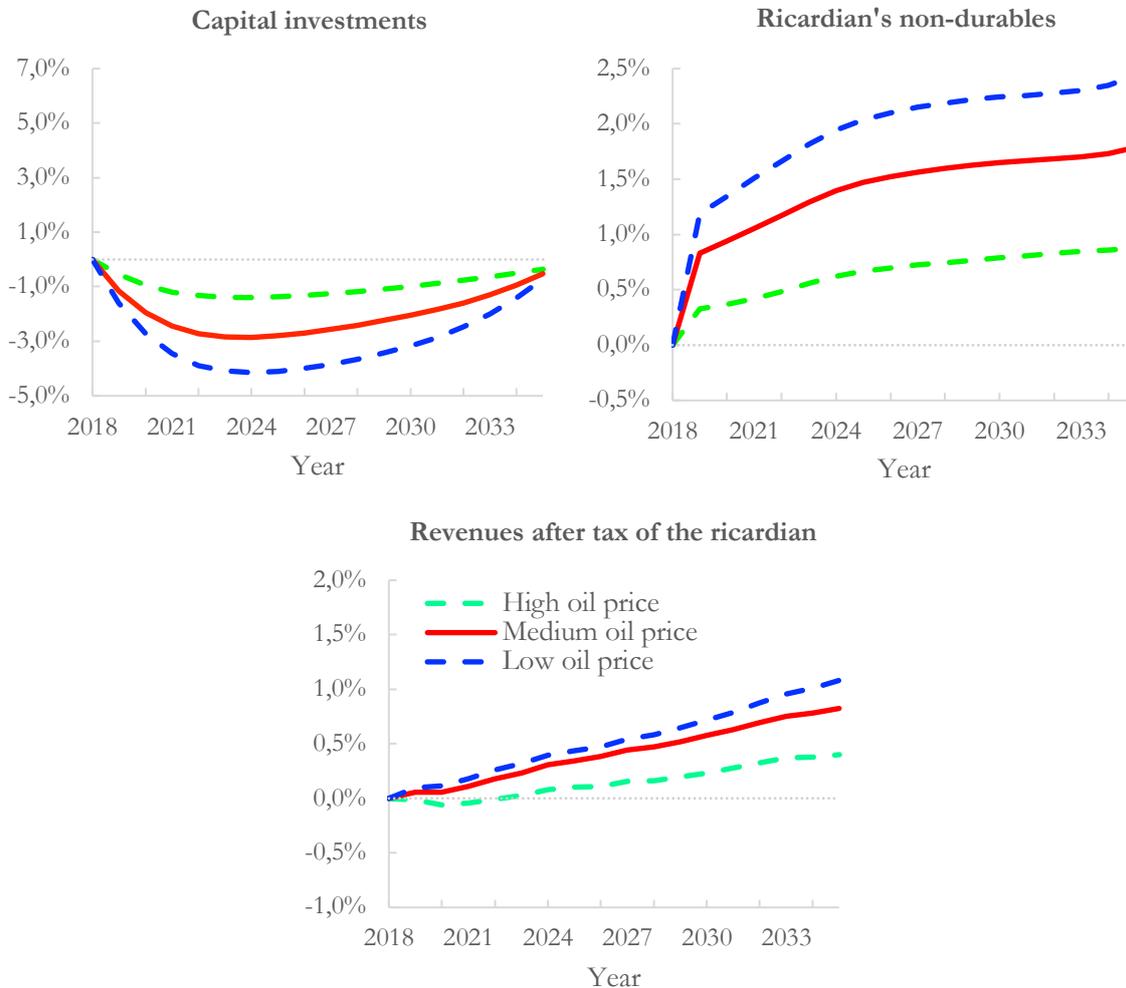


Figure 24 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

3.8.2. Dans le modèle, le mécanisme de redistribution et les biens durables permettent d'amortir des chocs subis par le ménage non-ricardien

À partir de 2023, la consommation de biens non-durables du ménage non-ricardien est « lissée » dans le temps grâce au mécanisme de redistribution et aux biens durables (cf. Figure 25 infra). Malgré une diminution du salaire réelle sur le long terme, la diminution de l'investissement en biens durables, la diminution de la production des services énergétiques dans Ampère haut et Ampère baseline, et l'augmentation des transferts budgétaires augmentent la consommation en bien non-durables du ménage non-ricardien. Néanmoins, le rôle de « tampon » aux chocs joué par les biens

durables est faible pour le ménage non-ricardien comparé à celui joué par les biens de capital pour le ménage ricardien. Les biens durables pour le ménage non-ricardien ne sont pas un substitut parfait à l'accès aux marchés financiers à cause de cette substituabilité imparfaite entre les services énergétiques et les biens non-durables. Par conséquent, il leur est difficile d'amortir un choc de prix des énergies sur la seule base d'un ajustement des biens durables. Par conséquent, dans Ampère haut et Ampère baseline, le ménage non-ricardien augmente sa consommation de biens non-durables grâce au mécanisme de substitution entre les biens non-durables et la production de services énergétiques, et grâce au mécanisme de redistribution du gouvernement. Dans Ampère bas, malgré une augmentation de la production de services énergétiques dans le temps, la consommation de biens non-durables augmente principalement grâce au mécanisme de redistribution mis en place par le gouvernement.

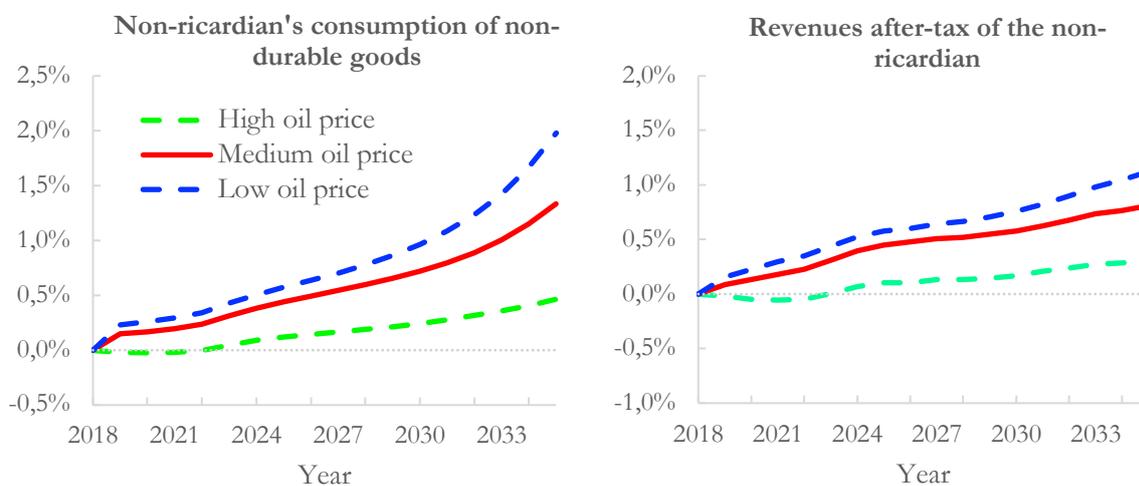


Figure 25 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

3.9. Dans le modèle, en réponse à l'évolution du prix des énergies et du mécanisme de redistribution, malgré une augmentation du bien-être des ménages sur le long terme, le mécanisme de redistribution ne parvient pas à supprimer totalement le caractère régressif de la fiscalité carbone

Le bien-être¹²² des ménages augmente quelle que soit l'évolution choisie du prix des énergies, mais relativement plus dans Ampère bas (cf. **Tableau 22** *infra*). Ce résultat est principalement attribué au mécanisme de redistribution que met en place le gouvernement et aux divers arbitrages faits par les ménages au cours du temps. En unité de travail efficace, les deux types de ménages augmentent leur consommation agrégée dans le temps (cf. **Figure 26** *infra*). Dans Ampère bas, à l'horizon 2035,

¹²² Le gain de bien-être est mesuré, dans le **Tableau 22**, en comparant l'équivalent en consommation d'état stationnaire (*steady-state consumption equivalent*) de l'utilité du ménage entre deux dates. L'équivalent en consommation d'état stationnaire en (t) correspond au pourcentage de la consommation d'état stationnaire (le niveau de la consommation en 2018) nécessaire pour atteindre le niveau d'utilité en (t).

le ménage ricardien augmente sa consommation agrégée en unité de travail efficace de 3% par rapport à 2018, et le ménage non-ricardien augmente sa consommation agrégée en unité de travail efficace de 2,3% par rapport à 2018. Et, dans Ampère haut, le ménage ricardien augmente sa consommation agrégée en unité de travail efficace de 0,8% par rapport à 2018 et le ménage non-ricardien augmente sa consommation agrégée en unité de travail efficace de 0,1% par rapport à 2018.

Malgré une augmentation du bien-être sur le long terme pour les deux types de ménage, le ménage ricardien gagne relativement plus en bien-être que le ménage non-ricardien grâce à son portefeuille d'actifs. Dans Ampère haut, le ménage ricardien gagne 0,0013 points de pourcentage de plus de bien-être que le ménage non-ricardien. Les écarts de bien-être entre les deux types de ménages sont accentués dans la version où le prix des énergies augmente relativement moins sur le long terme. L'effet régressif de la fiscalité carbone est donc atténué mais pas supprimé.

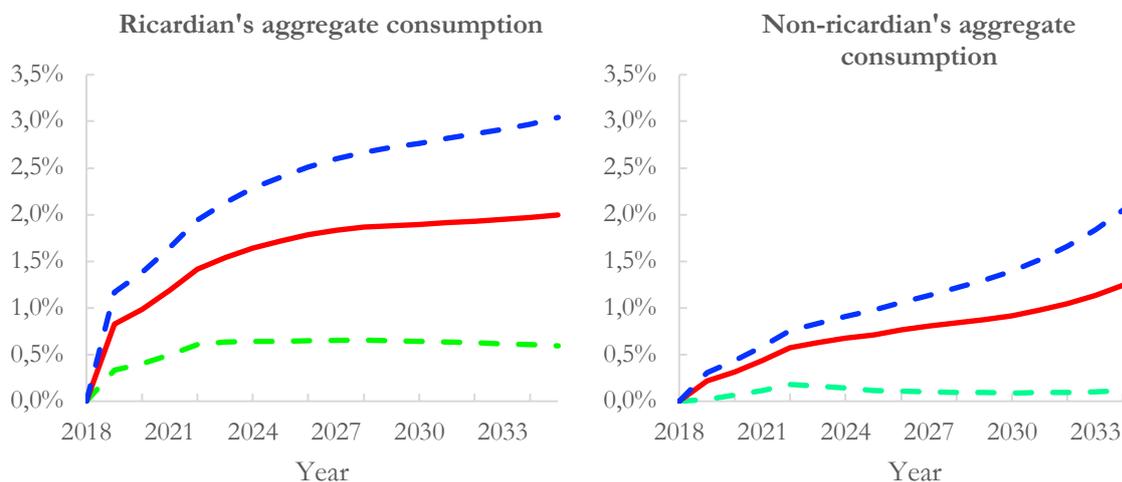


Figure 26 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

	Haut	Baseline	Bas
Ricardien	0,0017%	0,0056%	0,0085%
Non-ricardien	0,0004%	0,0042%	0,0069%

Tableau 22 Gains de bien-être des ménages en 2035 par rapport à 2018 – Ampère

4. Effets agrégés sur les finances publiques

4.1. Dans le modèle, l'électrification de l'économie n'érode pas les recettes fiscales provenant des produits pétroliers

L'évolution de la composante carbone augmente considérablement les recettes fiscales des produits énergétiques (cf. **Tableau 23** *infra*). Par rapport à 2018, dans Ampère bas, en unité de travail efficace, les recettes fiscales des produits énergétiques augmentent de 68% environ en 2035. Au pire, elles augmentent de 33% environ en unité de travail efficace dans Ampère haut. On aurait pu s'attendre

à ce que l'électrification de l'économie diminue les recettes fiscales des produits pétroliers du gouvernement grâce à une augmentation de l'utilisation de l'électricité et une diminution de l'utilisation des produits pétroliers dans le temps. Ce n'est pas le cas, et ce malgré la diminution des recettes de la taxation de l'électricité en unité de travail efficace. La diminution de la consommation d'énergie non-électrique dans Ampère haut et Ampère baseline érode la base d'imposition des produits pétroliers. L'augmentation de la fiscalité carbone est assez forte pour que la diminution de la consommation des produits pétroliers sur le long terme n'affecte pas négativement les recettes fiscales des produits pétroliers.

Pour l'électricité, l'évolution du prix des énergies et gel de la CSPE érode la base taxable de l'électricité et diminue les recettes fiscales de l'électricité *en unité de travail efficace*. Néanmoins, si l'on ajoute la tendance de croissance de l'économie, les recettes fiscales de l'électricité augmentent dans le temps.

	Version	2025	2030	2035
Électricité	Haut	-8,93%	-12,93%	-16,65%
	Baseline	-9,16%	-17,84%	-20,75%
	Bas	-9,51%	-18,19%	-21,29%
Énergie non-électrique	Haut	11,04%	23,82%	33,20%
	Baseline	20,18%	38,35%	52,70%
	Bas	24,66%	47,66%	68,06%
TVA	Haut	0,55%	0,60%	0,63%
	Baseline	1,30%	1,37%	1,23%
	Bas	1,81%	1,89%	1,61%
Capital/Dividendes	Haut	0,19%	0,51%	0,77%
	Baseline	0,29%	0,79%	1,06%
	Bas	0,35%	0,89%	1,20%
Revenus du travail	Haut	-0,21%	-0,39%	-0,48%
	Baseline	-0,25%	-0,56%	-0,64%
	Bas	-0,33%	-0,72%	-0,81%

Tableau 23 Évolution des recettes fiscales par unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

4.2. Dans le modèle, l'électrification de l'économie et l'évolution du prix des énergies augmentent les recettes fiscales hors énergie du gouvernement

La base taxable de la TVA augmente sur le long terme. En 2035, dans Ampère bas, les recettes fiscales de la TVA augmentent de 1,61% par rapport à 2018. Alors que dans Ampère haut, elles n'augmentent que de 0,63% (*cf. Tableau 23 supra*). L'augmentation de la consommation agrégée

augmente la base taxable de la TVA par unité de travail efficace, et ce surtout grâce à la dynamique des biens non-durables qui représentent plus de 80% des dépenses de consommation.

La taxation sur les revenus du capital en unité de travail efficace augmente grâce à l'augmentation des dividendes distribuées par le système électrique. Dans Ampère bas et Ampère baseline, les revenus de marché du secteur électrique sont relativement plus élevés grâce à un prix de gros de l'électricité relativement plus élevé et des coûts du combustible relativement plus faibles (*cf. Figure 27 infra*).

Les revenus de la taxation des revenus du travail diminuent légèrement sur le long terme à cause de la diminution du salaire réel par unité de travail efficace. La diminution est relativement plus forte dans Ampère bas car la demande du facteur travail et la demande du facteur capital diminuent relativement plus (*cf. figure « value added bundle » dans Figure 16 supra*). À offre fixe de travail, le salaire réel fait l'ajustement.

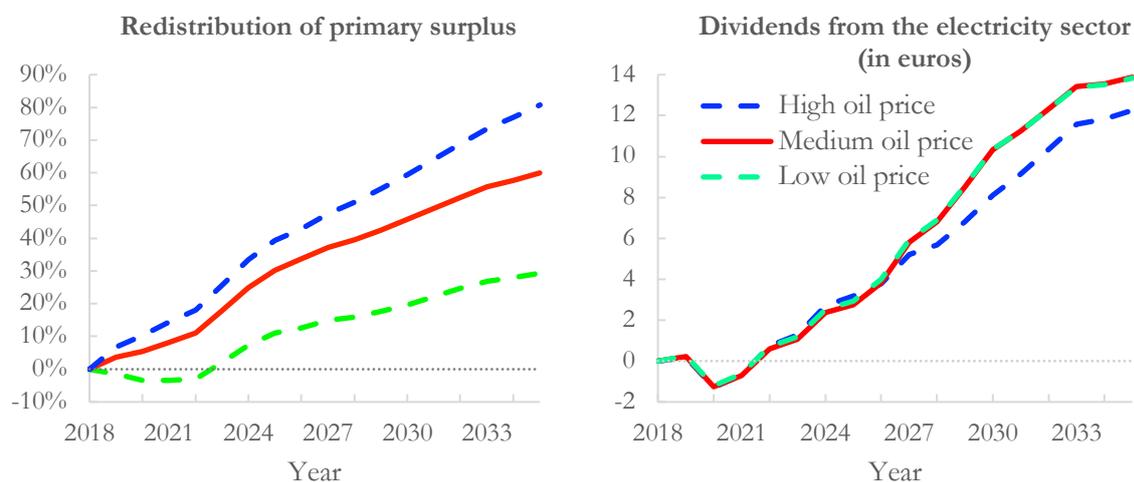


Figure 27 Réponses dynamiques des variables sélectionnées en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

- 4.3. Dans le modèle, l'électrification de l'économie et l'évolution du prix des énergies augmentent les recettes fiscales totales en unité de travail efficace, permettant au gouvernement de davantage redistribuer vers les ménages

Au total, toutes les recettes fiscales en unité de travail efficace, hors recettes fiscales de l'électricité, sont relativement plus élevées dans la version où le prix des énergies diminue dans le temps. Cette version d'évolution du prix des énergies correspond à une consommation relativement plus élevée d'énergie non-électrique et de biens non-durables. Par rapport à Ampère baseline, Ampère bas ajoute 0.0254 p.p. par an au taux de croissance annuel moyen des recettes fiscales totales par unité de travail efficace, et Ampère haut soustrait 0.035 p.p. par an au taux de croissance annuel moyen

des recettes fiscales totales par unité de travail efficace. En ajoutant la tendance de croissance, les résultats précédents sont quasi-identiques.

Le surplus de recettes va être redistribué, selon le modèle, vers les ménages et vers les filières électriques subventionnées. En 2018, le surplus primaire de l'autorité publique en unité de travail efficace représente 1,1% de l'offre agrégée en unité de travail efficace. Dans Ampère haut, le surplus primaire en unité de travail efficace croît dans le temps pour s'établir à 1,4% de l'offre agrégée en unité de travail efficace en 2035. Dans Ampère baseline, le surplus primaire en unité de travail efficace s'établit à 1,8% de l'offre agrégée en unité de travail efficace en 2035. Et, dans Ampère bas, le surplus primaire en unité de travail efficace s'établit à 2,0% de l'offre agrégée en unité de travail efficace en 2035. En taux de croissance annuel moyen, le surplus primaire en unité de travail efficace croît de 1,5%/an dans Ampère haut, de 2,8%/an dans Ampère baseline et de 3,5%/an dans Ampère bas.

5. Dans le modèle, l'effet de long terme sur le PIB par tête de l'évolution des investissements dans le système électrique et du prix des énergies est légèrement négatif

L'offre agrégée en unité de travail efficace¹²³ est décroissant sur le long terme (cf. **Figure 28 infra**). La tendance s'enclenche à partir de 2022, date à laquelle la composante carbone commence à évoluer. En taux de croissance annuel moyen, cela se traduit par une perte de 0.022 p.p. par an dans Ampère haut, une perte de 0.019 p.p. par an dans Ampère baseline et une perte de 0.021 p.p. par an dans Ampère bas. Sur le long terme, du côté de la demande agrégée, l'effet dépressif est dû à la baisse des investissements dans le système électrique, la baisse de l'investissement en capital physique par rapport à 2018, la baisse des dépenses *hors taxes* (y.c. coût de réseau) en électricité et la baisse de l'investissement en biens durables dans les trois versions (cf. **Tableau 24 infra**). L'augmentation de la consommation de biens non-durables et des exportations¹²⁴ viennent atténuer

¹²³ Pour rappel, l'offre agrégée est égale à la demande agrégée selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 & Output_t + p_t^{el} \cdot \sum_{techno, hours} Y_{j,h,t}^{el} \\
 & = X_t + I_t^d + p_t^{el,h} \cdot El_t^h + G_t + I_t^k + p_t^{el,f} \cdot El_t^f + \sum_{techno} Costs(capex_{j,t}^{el}, o\&m_{j,t}^{el}, fuels_{j,t}^{el}, CO2_{j,t}^{el}) \\
 & \quad + GridCosts_t + Exp_t
 \end{aligned}$$

¹²⁴ Dans le modèle, les exportations correspondent aux dépenses *hors taxes* d'importation d'énergie non-électrique. Les exportations bougent de sorte à avoir une balance commerciale nulle.

la diminution de l'offre agrégée. Du côté de l'offre agrégée, l'output et les revenus de marché du système électrique diminuent dans le temps¹²⁵ (cf. **Figure 29 infra**).

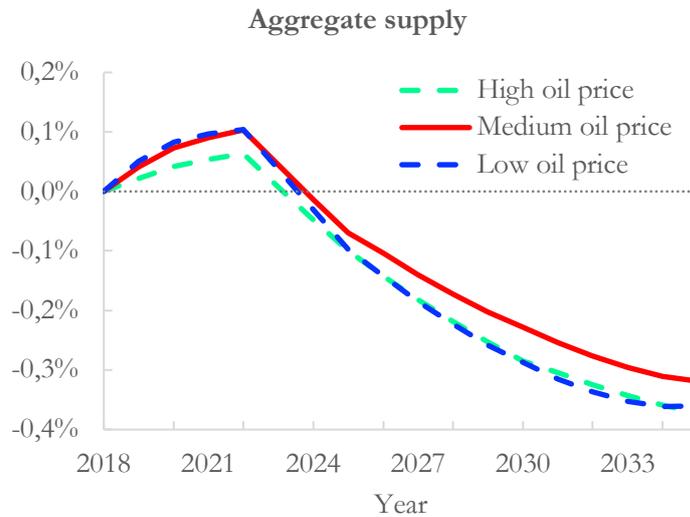


Figure 28 Réponse dynamique de l'offre agrégée en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

	Non-durables	Inv. durables	Inv. capital	Électricité au prix de détail hors taxes	Coûts annualisés du système électrique	Importations énergie non-électrique
Haut	0,047%	-0,062%	-0,021%	-0,058%	-1,268%	0,087%
Baseline	0,099%	-0,143%	-0,031%	-0,084%	-1,177%	0,069%
Bas	0,137%	-0,231%	-0,042%	-0,116%	-1,160%	0,053%

Tableau 24 Taux de croissance annuel moyen des variables en unité de travail efficace - Ampère

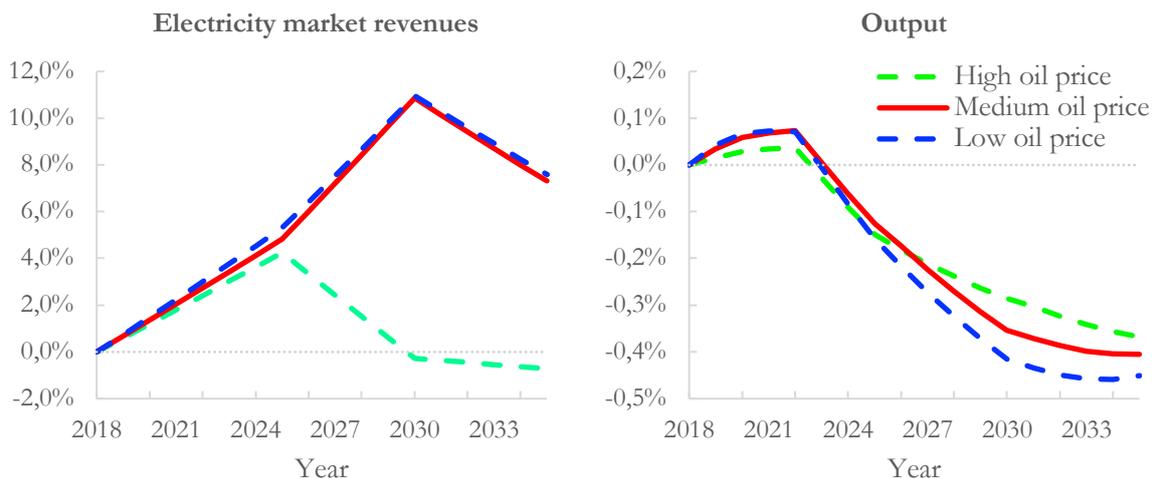


Figure 29 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

¹²⁵ La **Figure 29** peut interpellier. En réalité, les revenus de marché du système électrique augmentent dans le temps dans les trois versions. C'est en exprimant ces revenus en unité de travail efficace que la dynamique change.

6. Dans le modèle, une maîtrise de la demande d'énergie et des transferts d'usage relativement moins poussés, et un mix de production plus nucléarisé permettent une décarbonation plus intense de l'économie mais au prix d'une sensibilité plus forte de l'économie aux variations du prix du baril et de la fiscalité carbone

La présente sous-section regarde si les résultats ne changent pas sensiblement lorsque la trajectoire d'efficacité électrique et d'évolution du mix électrique change. Le deuxième scénario simulé dans le cadre de la thèse est le scénario Volt du Bilan Prévisionnel 2017 de Rte. Le scénario est caractérisé par des efforts de maîtrise de la demande d'énergie et de transferts d'usage relativement plus poussés, et un bouquet électrique relativement plus nucléarisé par rapport à Ampère.

Les différences d'évolution des variables endogènes au modèle *HyGEM* entre les scénarios Ampère et Volt sont dues aux différences dans le prix de gros de l'électricité, les coûts annualisés du système électrique, les subventions aux filières électriques subventionnées, les revenus de marché de l'électricité et les efforts d'efficacité énergétique dans le modèle de croissance dynamique (*cf. Tableau 25 infra*). Le prix de gros de l'électricité est relativement plus élevé sur le long terme dans le scénario Volt, malgré une demande d'électricité relativement plus faible. La cause en est attribuée à un mix de production composé de moins d'énergies renouvelables sur le long terme et plus de nucléaire. Par ailleurs, les coûts annualisés et les subventions dans le système électrique sont relativement plus faibles dans Volt car le mix de production est relativement moins vert. Et, le taux d'efficacité électrique pour les ménages est relativement plus élevé¹²⁶, et le taux d'efficacité électrique pour l'entreprise est relativement plus faible.

	Haut	Baseline	Bas
Subventions aux filières électriques subventionnées	-1,041	-1,583	-1,562
Revenus de marché du système électrique	0,369	0,571	0,564
Coûts annualisés du système électrique	-0,597	-0,559	-0,551
Prix de détail de l'électricité <i>hors taxes</i> pour les ménages	0,183	0,244	0,239
Prix de détail de l'électricité <i>hors taxes</i> pour l'entreprise	0,234	0,311	0,306
Efficacité électrique des ménages	0,315	0,315	0,315
Efficacité électrique de l'entreprise	-0,072	-0,072	-0,072

Tableau 25 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage

Une électrification plus poussée de l'économie et un « verdissement » du mix de production, comme c'est le cas pour le scénario Ampère, permettent à l'économie d'être

¹²⁶ Malgré des efforts de maîtrise de la demande d'énergie relativement plus élevés, le taux d'efficacité électrique pour le secteur résidentiel dans le modèle est relativement plus faible dans Ampère que dans Volt, car Ampère est caractérisé par une intensité des transferts d'usage relativement plus élevée dans le logement et le transport résidentiel. Dans le modèle, le taux d'efficacité électrique comprend la maîtrise de la demande d'énergie et les transferts d'usage.

plus résiliente aux variations du prix des énergies *toutes taxes comprises*, mais au prix d'une décarbonation relativement plus faible.

Par rapport à Ampère, la consommation d'électricité dans Volt avec bouclage macroéconomique est plus basse d'environ 8,5 TWh à l'horizon 2035 dans la version haute, de 12,3 TWh dans la baseline et de 12,2 TWh dans la version basse. Cela est dû à un développement relativement moins poussé du parc de véhicules électriques et à des transferts d'usage dans le logement résidentiel relativement moins élevés dans le scénario Volt. Tandis que dans les trois versions du scénario Volt, la consommation d'énergie non-électrique est relativement plus basse dans le temps (*cf. Tableau 26 infra*). Par conséquent, l'économie verdit relativement plus dans le scénario Volt par rapport au scénario Ampère.

	Haut	Baseline	Bas
Consommation d'électricité (y.c. effet croissance)	-0,107	-0,160	-0,158
Consommation d'énergie non-électrique (y.c. effet croissance)	-0,041	-0,044	-0,044

Tableau 26 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage

Au niveau de la réaction des grands agrégats de l'économie, les dynamiques sont les mêmes que pour Ampère. Donc, les résultats discutés pour Ampère demeurent valables pour Volt. Néanmoins, les niveaux changent (*cf. Tableau 27 infra*). Au total, la diminution de l'investissement en capital physique causée par l'augmentation de la consommation en biens non-durables, la diminution de l'investissement en biens durables, la diminution de l'investissement dans le système de production d'électricité et de la consommation d'électricité affectent l'offre agrégée relativement plus à la baisse sur le long terme dans le scénario Volt. Malgré des coûts annualisés dans le système électrique et des revenus de marchés plus élevé, la consommation de biens non-durables augmente au détriment de l'investissement en biens durables et de l'investissement en capital physique. La cause en est attribuée à un prix de l'électricité (TTC) relativement plus élevé et à un taux d'efficacité électrique relativement plus élevée sur le long terme. Par conséquent, les agents de l'économie consomment relativement moins d'énergie dans le scénario Volt. Cela se traduit pour l'entreprise par une demande en capital relativement plus faible sur le long terme et pour le ménage par une diminution de la production de services énergétiques. Par ailleurs, les recettes fiscales du gouvernement sont plus faibles à cause d'une consommation d'énergie relativement plus faible¹²⁷.

¹²⁷ Toutefois, l'augmentation des recettes fiscales de la TVA et des revenus du capital atténuent cet effet.

	Haut	Baseline	Bas
Consommation totale d'électricité	-0,107	-0,160	-0,158
Consommation totale d'énergie non-électrique	-0,041	-0,044	-0,044
Investissements en biens durables du ménage ricardien	-0,005	-0,008	-0,006
Investissements en biens durables du ménage non-ricardien	-0,037	-0,044	-0,042
Consommation en biens non-durables du ménage ricardien	0,013	0,016	0,015
Consommation en biens non-durables du ménage non-ricardien	0,003	0,004	0,003
Stock de capital physique de l'économie (hors système électrique)	-0,010	-0,012	-0,011
Output	-0,006	-0,008	-0,008
Surplus primaire	0,155	0,173	0,148
Stock de biens durables du ménage ricardien	0,010	0,010	0,010
Stock de biens durables du ménage non-ricardien	-0,010	-0,014	-0,013
Investissement en capital physique de l'économie (hors système électrique)	-0,008	-0,009	-0,009
Offre agrégée	-0,002	-0,001	-0,001
Recettes fiscales de la TVA	0,008	0,010	0,010
Recettes fiscales de l'électricité	-0,101	-0,154	-0,152
Recettes fiscales de l'énergie non-électrique	-0,037	-0,035	-0,035
Subventions publiques aux filières électriques subventionnées	-1,041	-1,583	-1,562
Revenus de marché du système électrique	0,369	0,571	0,564
Coûts totaux annualisés du système électrique	-0,597	-0,559	-0,551
Prix de gros de l'électricité	0,003	0,004	0,004

Tableau 27 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage

Enfin, le bien-être des ménages est relativement plus élevé dans le scénario Volt grâce à une substitution en faveur des biens non-durables plus importante et une redistribution de la taxe carbone relativement plus élevée (*cf. Tableau 28 infra*). Le caractère régressif de la fiscalité environnementale est plus prononcé dans le scénario Volt que dans le scénario Ampère. En effet, les écarts de gain de bien-être entre les deux ménages sont plus importants dans le scénario Volt.

		Haut	Baseline	Bas
Ampère	Ricardien	0,0017%	0,0056%	0,0085%
	Non-ricardien	0,0004%	0,0042%	0,0069%
	Écart en p.p.	0,0013	0,0014	0,0016
Volt	Ricardien	0,0024%	0,0065%	0,0093%
	Non-ricardien	0,0007%	0,0044%	0,0071%
	Écart en p.p.	0,0017	0,0021	0,0022

Tableau 28 Gains de bien-être en 2035 par rapport à 2018

Comme tout modèle, les résultats sont sensibles à la paramétrisation. Particulièrement, la valeur des élasticités de substitution rend les résultats sensibles. Avant d'émettre des conclusions générales, il faut s'assurer que les résultats sont robustes. Cela veut dire qu'il faut s'assurer qu'en modifiant la valeur des élasticités de substitution, les dynamiques du modèle ne changent pas sensiblement. Le chapitre suivant réalise des tests de robustesse sur les élasticités clés du modèle.

CHAPITRE 3. TESTS DE ROBUSTESSE SUR LE MODÈLE À INFORMATION PARFAITE

L'exercice de robustesse permet de tester la sensibilité des résultats à quelques paramètres clés. Les paramètres les plus sensibles du modèle sont : l'élasticité de substitution inter-énergies des ménages, l'élasticité de substitution inter-énergies de l'entreprise, l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace, et l'élasticité de substitution entre le facteur de production « énergie efficace », qui agrège l'électricité et l'énergie non-électrique, et le facteur de production travail-capital, qui agrège le facteur capital et le facteur travail. L'analyse de sensibilité est faite sur le scénario *Ampère* dans la version *baseline*.

L'élasticité de substitution intertemporelle, et l'élasticité de substitution entre les biens non-durables et les services énergétiques, ne sont pas testées car les valeurs fixées à partir de la littérature sont communément admises. L'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail n'est pas testée car la valeur estimée dans le chapitre 4 de la Partie II se trouve dans l'intervalle des valeurs estimées dans la littérature existante. Les paramètres de distribution ne requièrent pas non plus de tests de robustesse car ils sont fixés sur les conditions de premier ordre du modèle et les données sur les grands ratios des comptes nationaux.

1. La reparamétrisation du modèle

1.1. La reparamétrisation des élasticités de substitution inter-énergies

Comme discuté dans le chapitre 4 de la Partie II, la littérature sur l'estimation économétrique des élasticité inter-énergies pour les ménages d'une part, et les entreprises d'autre part, est quasi-inexistante. En effet, la majeure partie de la littérature calibre de façon arbitraire ces élasticités. Par conséquent, l'estimation faite de ces deux élasticités ne peut être confrontée à des valeurs déjà existantes dans la littérature. Les deux types d'énergie utilisés par les ménages sont imparfaitement substituables dans les simulations initiales. Le test de robustesse sur l'élasticité supposera que les deux types d'énergie sont imparfaitement complémentaires pour les ménages. Les deux types d'énergie utilisés par l'entreprise pour la production sont imparfaitement complémentaires dans les simulations initiales. Le test de robustesse supposera que les deux types d'énergie sont imparfaitement substituables pour l'entreprise (*cf. Tableau 29 infra*).

1.2. La reparamétrisation de l'élasticité entre les biens durables et l'énergie efficace

Pour l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace, il existe deux études robustes : Dhawan et Jeske (2008) pour les États-Unis, et Henriët, Schubert et Maggiar (2014) pour

la France. Tous deux trouvent une élasticité plus faible que les estimations du chapitre 4 de la Partie II. C'est pourquoi, une élasticité de substitution plus faible entre les biens durables et l'énergie efficace est testée (cf. **Tableau 29** *infra*).

1.3. La reparamétrisation de l'élasticité entre le composite travail-capital et le composite énergie efficace

Pour l'élasticité de substitution entre les deux facteurs de production agrégés, il existe quelques études robustes qui convergent, entre autres : Paltsev et al. (2005), Bosetti et al. (2006), Bohringer et Rutherford (2008), van der Werf (2008). Les études précédentes convergent vers une élasticité plus faible que celle estimée dans le cadre de la thèse. L'exercice de robustesse teste une élasticité de substitution entre les deux facteurs de production agrégés de 0,4 contre 1,0064 dans le modèle.

	Benchmark	Nouvelle valeur
Élasticité de substitution inter-énergies du ménage - $\sigma_{e,h}$	1.4560	0.7500
Élasticité de substitution inter-énergies de l'entreprise - $\sigma_{e,f}$	0.5130	1.2500
Élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace - σ_{es}	0.7500	0.4500
Élasticité de substitution entre le composite travail-capital et le composite « énergie efficace » - σ_o	1.0064	0.4000

Tableau 29 Reparamétrisation des élasticités de substitution pour l'exercice de robustesse

2. Les résultats des tests de robustesses

Les **Figure 30**, **Figure 31**, **Figure 32** présentent la réponse dynamique des variables endogènes pour chaque test de robustesse et le modèle benchmark (*Ampère baseline*). Les sous-sections suivantes synthétisent les résultats des tests de robustesse.

2.1. Test sur les élasticités de substitution inter-énergies

En unité de travail efficace, les dynamiques ne sont pas sensibles aux élasticités de substitution inter-énergies. Par conséquent, les interprétations du chapitre 2 de la Partie III demeurent valables. Néanmoins, les niveaux changent plus ou moins.

En écart par rapport au modèle benchmark, la reparamétrisation de l'élasticité inter-énergie de l'entreprise va affecter surtout la consommation d'énergie de l'entreprise et ainsi les recettes fiscales énergétiques du gouvernement. Notamment, l'entreprise consomme relativement moins de l'électricité et consommation davantage de l'énergie non-électrique lorsque les deux types d'énergies sont considérées comme substituables. Par rapport au model benchmark, croissance incluse, la consommation d'électricité totale est plus basse d'environ 5 TWh en 2035 et la

consommation d'énergie non-électrique est plus basse d'environ 0,8 Mtep en 2035. D'ailleurs, la diminution de la consommation d'électricité permet à Ampère avec bouclage macroéconomique de se rapprocher sur le long terme de la trajectoire Ampère sans bouclage macroéconomique telle que simulée par Rte (cf. **Figure 32** *infra*). Par ailleurs, le prix de gros de l'électricité diminue, ce qui diminue les revenus de marché du système de production d'électricité et les subventions aux filières subventionnées simulées par le modèle d'optimisation du système électrique.

En écart par rapport au modèle benchmark, la reparamétrisation de l'élasticité inter-énergie des ménages affecte surtout le niveau de la consommation en énergie des ménages, des recettes fiscales de la consommation d'énergie non-électrique, du prix de gros de l'électricité, des revenus de marché du système électrique et des subventions aux filières subventionnées. Ici, les ménages considèrent l'énergie électrique et l'énergie non-électrique comme complémentaires. Par rapport au modèle benchmark, croissance incluse, cela augmente la consommation d'électricité totale d'environ 10,4 TWh en 2035 et diminue la consommation d'énergie non-électrique totale d'environ 2,4 Mtep en 2035. La trajectoire de consommation Ampère avec bouclage macroéconomique simulée dévie relativement plus de la trajectoire Ampère sans bouclage macroéconomique telle que simulée par Rte (cf. **Figure 32** *infra*). Par ailleurs, les recettes fiscales de la consommation d'énergie non-électrique diminuent et les recettes fiscales de la consommation d'électricité augmentent (cf. **Figure 31** *infra*). Sachant que la fiscalité de l'énergie non-électrique pèse plus dans les recettes totales que la fiscalité de l'électricité, le surplus primaire diminue. Enfin, le prix de gros de l'électricité augmente, ce qui augmente les revenus de marché du système de production d'électricité et diminue les subventions aux filières subventionnées.

Au total, le modèle est relativement plus sensible *en niveau* aux variations de l'élasticité inter-énergie du ménage qu'aux variations de l'élasticité inter-énergie de l'entreprise.

2.2. Tests sur l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace

En unité de travail efficace, les dynamiques du modèle ne sont pas très sensibles à l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace pour la production de services énergétiques. Par conséquent, les interprétations du chapitre 2 de la Partie III demeurent valables.

La reparamétrisation de l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace des ménages affecte relativement moins les variables énergétiques que les élasticité inter-énergie. Si les ménages considèrent les biens durables comme relativement moins substituables à l'énergie, leur consommation en électricité et leur consommation en énergie non-électrique diminuent légèrement

plus dans le temps. Par rapport au modèle benchmark, la consommation d'électricité est plus basse d'environ 1,1 TWh en 2035 et la consommation d'énergie non-électrique est plus basse d'environ 0,4 Mtep en 2035. En revanche, en niveau, elle affecte relativement plus la consommation des ménages et donc leur épargne. Les variables les plus affectées sont l'investissement en biens durables, la consommation de biens non-durables, l'investissement en capital, le stock de biens durables et la production de services énergétiques par les ménages.

2.3. Tests sur l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique d'une part, et le facteur capital et le facteur travail d'autre part

En unité de travail efficace, les dynamiques du modèle ne sont pas très sensibles à l'élasticité de substitution des deux facteurs de production agrégés. Par conséquent, les interprétations du chapitre 2 de la Partie III demeurent valables.

Dans l'ensemble, la reparamétrisation de l'élasticité de substitution entre les deux facteurs de production agrégés affecte relativement moins les variables énergétiques que les élasticités inter-énergies. Par rapport au modèle benchmark, la consommation d'électricité est plus basse d'environ 1,9 TWh en 2035 et la consommation d'énergie non-électrique est plus basse d'environ 0,4 Mtep en 2035. Les variables les plus affectées par la variation de l'élasticité sur le court-moyen terme sont la consommation d'électricité et la consommation d'énergie non-électrique de l'entreprise, et l'output (*cf. Figure 30 infra*). L'entreprise ajuste relativement plus à la baisse son output sur le court-moyen terme uniquement. Sur le long terme, l'effet sur les niveaux est peu significatif si bien que le modèle est peu sensible aux variations de l'élasticité de substitution entre les facteurs de production agrégés.

2.4. Tests de robustesse, croissance et décarbonation de l'économie

La reparamétrisation de l'élasticité inter-énergie du ménage a un effet relativement plus favorable sur la croissance et la décarbonation de l'économie. En effet, l'offre agrégée diminue relativement moins, l'électrification de l'économie est plus forte et la consommation d'énergie non-électrique de l'économie est plus faible. Au contraire, la reparamétrisation de l'élasticité inter-énergie de l'entreprise est moins bénéfique pour la croissance et la décarbonation de l'économie. L'offre agrégée diminue relativement plus sur le long terme, l'électrification de l'économie est relativement moins poussée et la consommation d'énergie non-électrique de l'économie est relativement plus élevée sur le long terme. La reparamétrisation de l'élasticité entre les biens durables et l'énergie efficace, et de l'élasticité entre les deux facteurs de production agrégés ont relativement moins d'effet sur la croissance et la décarbonation de l'économie. En niveau, les trajectoires de l'offre

agrégée, de la consommation d'électricité et de la consommation d'énergie non-électrique de l'économie sont proches du modèle benchmark sur le long terme.

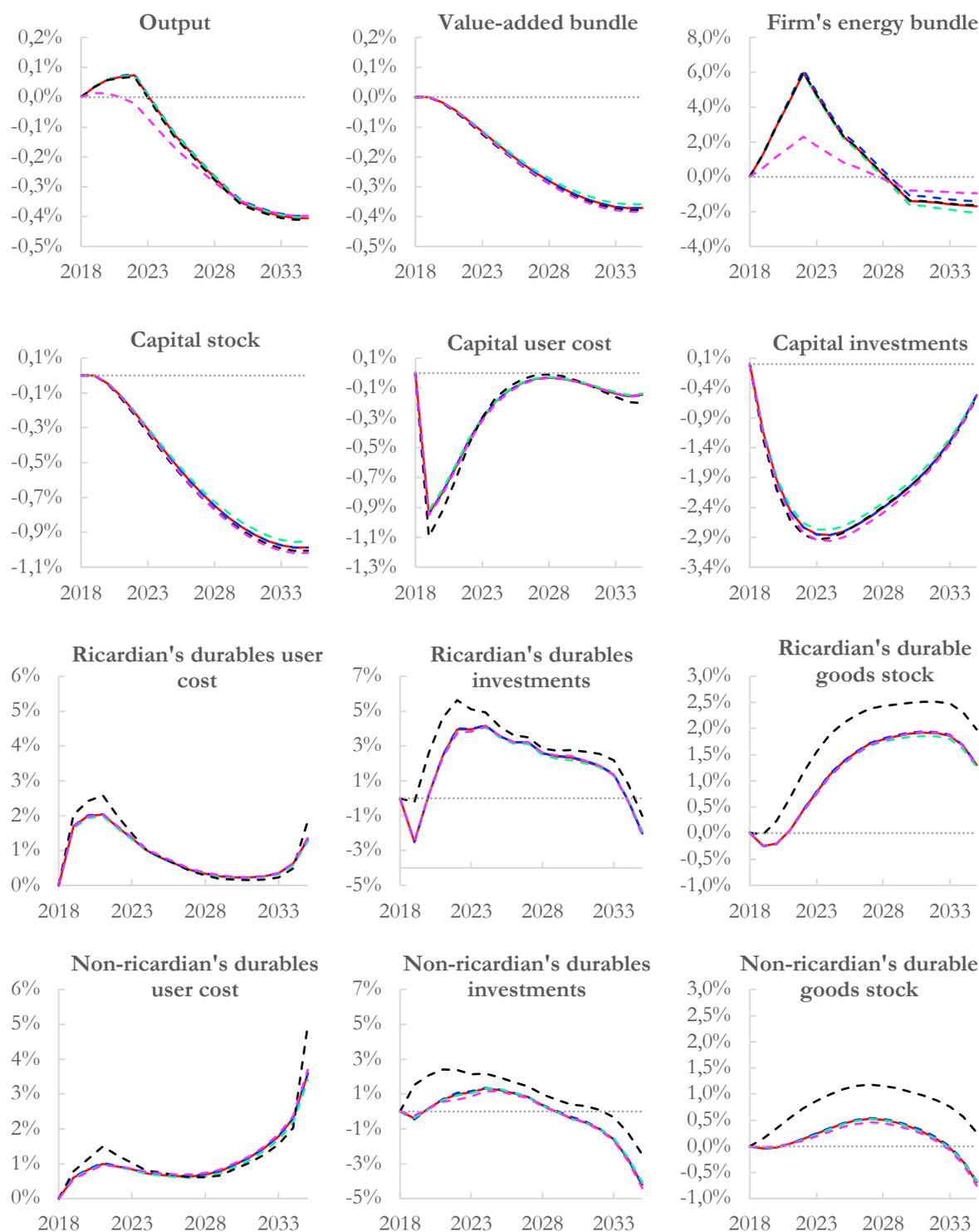


Figure 30 Réponses dynamiques des variables en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère baseline

Légendes :

<i>Benchmark model</i>	—
<i>Households' inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,h}$</i>	- - -
<i>Firm's inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,f}$</i>	- - -
<i>Substitution elasticity between durable goods and energy - σ_{es}</i>	- - -
<i>Substitution elasticity between the capital-labor aggregate and energy - σ_o</i>	- - -

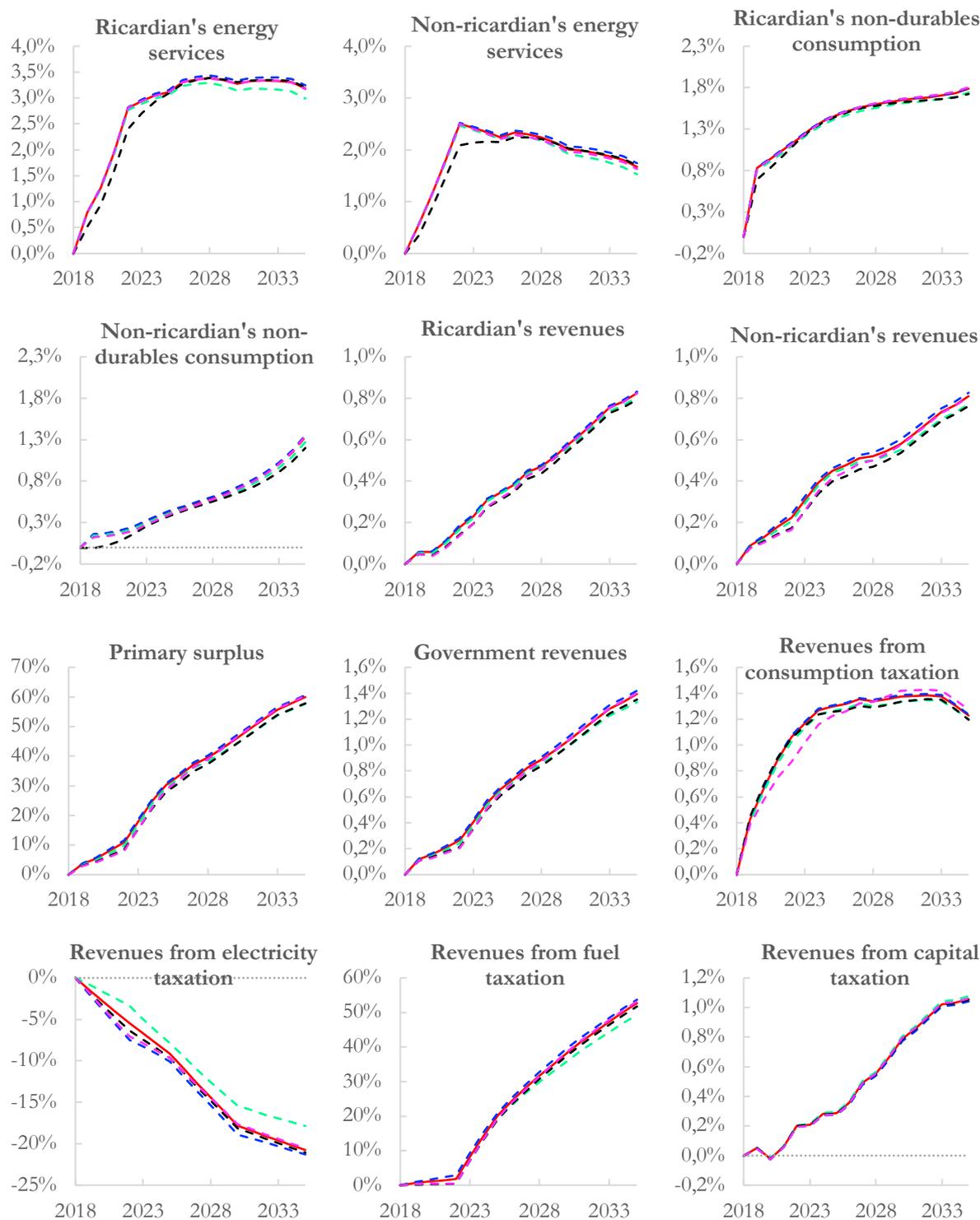


Figure 31 Réponses dynamiques des variables en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère baseline

Légendes :

Benchmark model	—
Households' inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,h}$	- - -
Firm's inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,f}$	- - -
Substitution elasticity between durable goods and energy - σ_{eS}	- - -
Substitution elasticity between the capital-labor aggregate and energy - σ_o	- - -

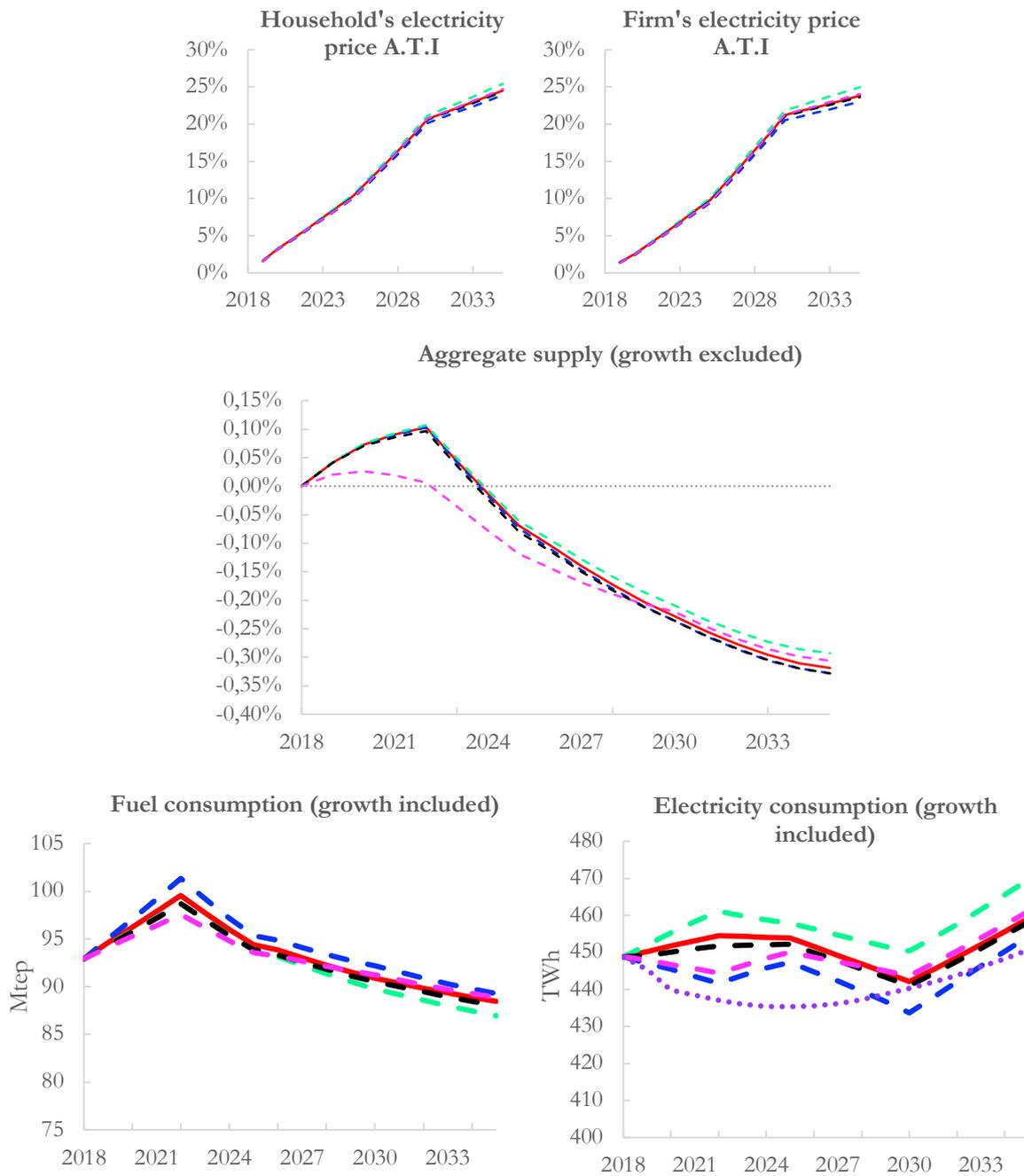


Figure 32 Réponses dynamiques des variables par rapport à 2018 – Ampère baseline

Légendes :

Benchmark model with macro feedback	—
Benchmark model without macro feedback	⋯
Households' inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,h}$	- - -
Firm's inter-energy substitution elasticity - $\sigma_{e,f}$	- - -
Substitution elasticity between durable goods and energy - σ_{es}	- - -
Substitution elasticity between the capital-labor aggregate and energy - σ_o	- - -

CHAPITRE 4. DISCUSSION

Le dernier chapitre tire les principaux enseignements de la Partie III. Les investissements dans le verdissement du mix de production énergétique, les efforts de maîtrise de la demande d'énergie, les transferts d'usage et une évolution relativement plus élevée du prix de détail des énergies permettent à l'économie de diminuer sa consommation d'énergie carbonée au profit d'une électrification plus forte sans léser le bien-être des ménages et sans diminuer fortement le taux de croissance de l'économie. Les biens durables jouent un rôle important dans l'amortissement des chocs de prix des énergies. Néanmoins, si la France veut atteindre son objectif *facteur 6* d'ici 2050, les efforts d'efficacité énergétique doivent être plus importants, notamment dans le secteur résidentiel, et la fiscalité carbone plus élevée. Les réévaluations de la fiscalité carbone devraient prendre en compte l'évolution du prix des hydrocarbures sur le long terme. Le modèle montre que le recyclage de la fiscalité carbone par des transferts budgétaires augmente le bien-être des ménages au prix d'un effet faiblement dépressif sur la production des entreprises. Par conséquent, une augmentation de la fiscalité carbone plus élevée que celle fixée dans le Projet Loi Finance 2018, un mécanisme de redistribution adéquate vers les ménages, via des transferts budgétaires par exemple, et vers les entreprises, via une diminution des cotisations patronales des entreprises intensives en énergie par exemple, permettraient de plus infléchir les comportements de consommation d'énergie non-électrique des agents sur le long terme.

1. Sous certaines conditions, la transition électrique n'affecte pas sensiblement la croissance sur le long terme et permet de décarboner l'économie

Les résultats du chapitre 2 montrent que les conditions pour diminuer suffisamment la consommation d'énergie non-électrique dans le temps sans léser la croissance de l'économie sont davantage réunies lorsque le prix de l'énergie est relativement plus élevé. Dans le scénario Ampère haut, un prix des énergies relativement plus élevé et une efficacité énergétique de plus en plus forte incitent des décisions d'électrification de l'économie de la part des agents. Aussi, l'augmentation de la fiscalité carbone permet d'augmenter les subventions aux filières électriques subventionnées, et donc de diminuer la part de l'électricité carbonée dans le mix de production. Le mix de production d'électricité est relativement plus vert sur le long terme dans les deux scénarios avec 40% de nucléaire et 55% d'énergies renouvelables dans Ampère, et 50% de nucléaire et 45% d'énergies renouvelables dans Volt. Par ailleurs, le taux de croissance annuel moyen de l'offre agrégé ne perd que 0,02 points de pourcentage par an sur l'horizon d'étude. L'effet sur la croissance n'est pas massif.

Les effets faibles sur la croissance sont relativement intuitifs pour trois raisons. Premièrement, l'énergie représente une part contenue dans l'économie (3% du PIB français) comme le souligne Kilian (2008). Dès Kim et Loungani (1992), la littérature conclut que la majeure partie des fluctuations de l'output est expliquée par les chocs de progrès technique et que les chocs énergétiques ont un effet contenu sur l'output. Deuxièmement, les nouvelles technologies de production d'électricité sur le passé récent ne sont pas en soi des technologies d'emploi général (*General Purpose Technologies*). Il est donc normal que l'investissement dans ces technologies n'affecte pas sensiblement la croissance à long terme. Troisièmement, un mécanisme de redistribution adéquat et les mécanismes de substitution permettent de limiter l'effet d'une hausse du prix des énergies sur l'économie. Dans le modèle, grâce au mécanisme de redistribution et des mécanismes de substitution, la consommation (principalement de biens non-durables) n'est pas pénalisée par l'augmentation du prix des énergies ce qui permet d'amortir l'effet sur l'output.

Dans la littérature, Henriët, Maggiar et Schubert (2014) trouvent des résultats proches. Les auteurs développent un modèle de croissance dynamique pour l'économie française pour étudier l'effet de chocs énergétiques sur l'économie française. L'énergie est intégrée au modèle à travers la production de services énergétiques par le ménage, et la production des biens et services de l'économie par l'entreprise. Néanmoins, leur variable « énergie » ne prend en compte que les combustibles fossiles. L'électricité est laissée volontairement de côté. Lorsque les auteurs appliquent une taxe carbone à 100 € la tonne à l'horizon 2030¹²⁸, ils trouvent que la consommation d'énergie diminue de 25% en 40 ans (horizon 2050). Si l'on prend en compte les possibilités de substitution inter-énergie, dans Ampère haut, la consommation d'énergie non-électrique diminue de 29% en 32 ans (horizon 2050), et de 34% en 40 ans (horizon 2058)¹²⁹. Par ailleurs, les auteurs argumentent que l'effet de la taxe carbone est plus important sur la consommation en énergie des entreprises que sur la consommation en énergie des ménages, ce qui est le cas dans les résultats de du chapitre 2. Pareillement, ils trouvent un effet faiblement dépressif sur l'output. L'output diminue de 0,90% en 40 ans par rapport à 2010. Néanmoins, les effets sur le bien-être des ménages sont différents. Ce point est discuté dans la sous-section 4.3. Enfin, les auteurs simulent un choc du prix du pétrole sur l'économie. Ils trouvent que l'output diminue de 0,79% en 40 ans et la consommation d'énergie diminue de 26% en 40 ans.

En somme, un prix relatif de l'énergie non-électrique relativement plus élevé est relativement plus favorable à la croissance et à la décarbonation de l'économie qu'un prix relatif de l'énergie non-

¹²⁸ Dans le modèle de la thèse, la taxe carbone atteint 127,8 €2018 la tonne de CO₂ à l'horizon 2030.

¹²⁹ Le calcul de la consommation d'énergie non-électrique pour l'horizon 2050 et l'horizon 2058 suppose une tendance linéaire de décroissance de l'énergie non-électrique à partir de 2036 sur la base du taux de croissance annuel moyen de la consommation de l'énergie non-électrique entre 2018 et 2035.

électrique relativement plus faible. Malgré la faible diminution du taux de croissance de l'économie, la France arrive à découpler ses émissions de la croissance. Dans les versions haut et médian, le découplage est absolu sur le long terme, c'est-à-dire que les émissions diminuent et la croissance augmente dans le temps. Dans la version basse, le découplage est relatif, c'est-à-dire que les émissions croissent moins vite que la croissance de l'économie¹³⁰. Néanmoins, ce résultat d'apparence intuitive est en réalité à prendre avec précaution pour deux raisons qui sont développées dans les sous-sections suivantes.

1.1. Prix relatif des énergies et évolution du parc électrique français

Dans le modèle, les investissements dans le parc électrique ne sont pas influencés par la trajectoire du prix des énergies. L'évolution du parc électrique est contrainte par la loi. Si le parc électrique devait être soumis à des règles de marché, alors les investissements dans les capacités de production seraient guidés par des objectifs de rentabilité plutôt que des contraintes politiques. Atalla et al. (2017) expliquent qu'aux États-Unis, où le mix de production est guidé par les règles de marché, les prix relatifs des énergies dominant la détermination du mix électrique, alors qu'en Europe, les politiques énergétiques façonnent le mix électrique. Dans le modèle d'optimisation du système électrique, le prix des énergies n'influencent donc que les décisions de production via le coût marginal de production et non les décisions d'investissement dans les technologies de production d'électricité.

Dans le cas où le parc électrique était mis en concurrence, un prix relativement plus élevé de l'énergie non-électrique dirigerait les investissements vers des capacités de production carbonées grâce à un retour sur investissement relativement plus élevé. Inversement, dans un environnement où le prix de l'énergie non-électrique serait plus faible, et sachant que le coût des énergies renouvelables a diminué drastiquement, les investissements se dirigeraient vers les capacités décarbonés. L'année 2020 est représentative de cet argument. Dans le World Energy Investment 2019, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) note que la profitabilité des investissements carbonés diminuent dans le temps à cause de la volatilité trop forte du prix du baril et de sa tendance de décroissance sur le long terme. Plus récemment, le World Energy Investment 2020 (IEA, 2021) note que le contexte épidémique et la chute du prix du pétrole ont causé une diminution relativement plus forte des investissements dans l'industrie des hydrocarbures par rapport à l'industrie des énergies renouvelables. L'électricité est vue par les investisseurs comme une source d'énergie relativement plus stable.

¹³⁰ L'économie française croît au taux de 1,45% par an en moyenne, alors que le taux de croissance annuel moyen de l'énergie non-électrique est de 0,23 %.

Toutefois, la littérature n'a, pour le moment, pas établi de lien indiscutable et général entre l'évolution du prix du baril et les investissements dans les technologies bas-carbone. Bondia, Ghosh et Kanjilal (2016) montrent que l'augmentation du prix des énergies incite les investisseurs à se tourner vers des investissements verts. Shah, Hiles et Morley (2018) montrent qu'il existe une relation forte entre l'évolution du prix du baril et l'investissement dans les énergies renouvelables pour la Norvège et les États-Unis, et une relation inexistante pour le Royaume-Uni. La relation est inexistante pour le Royaume-Uni car les investissements dans les énergies renouvelables sont guidés par des décisions politiques, alors que dans les deux autres pays, ils sont guidés par les forces du marché. Corbet, Goodell et Günay (2020) montrent qu'il y a eu des effets de déversement positif vers le marché des énergies renouvelables américain suite à la diminution du prix du baril durant l'année 2020. En revanche, Kumar, Managi et Matsuda (2012) montrent que l'augmentation du prix du pétrole affecte négativement les énergies renouvelables.

En somme, si l'on devait reproduire les simulations de la Partie III pour un pays où le parc électrique était soumis à la concurrence, il faudrait une boucle de rétroaction entre l'évolution du prix de l'énergie non-électrique et les investissements dans le parc électrique.

1.2. L'hypothèse d'efficacité énergétique dans le modèle trouve des limites

1.2.1. Investissements dans l'efficacité énergétique et croissance de l'économie

L'évolution de l'efficacité énergétique¹³¹ pour les équipements électriques et les équipements non-électriques dans le modèle n'est pas endogène dans le modèle. D'après le Bilan Prévisionnel 2017 de RTE, les investissements dans l'efficacité énergétique et les transferts d'usage dans Ampère et Volt sont importants. Or, les investissements ont un effet direct sur la demande agrégée de l'économie et le taux de croissance de l'économie.

Par conséquent, l'effet attendu de l'évolution du prix des énergies sur le taux de croissance de l'économie est en réalité moins dépressif, voire bénéfique, par rapport aux résultats de simulation du chapitre 2. Par exemple, Sievers et al. (2019) étudient les effets sur la valeur ajoutée des politiques de transition énergétique (efficacité énergétique et développement des énergies renouvelables) à l'horizon 2030 en Allemagne via un modèle hybride¹³². Grâce à des investissements plus poussés

¹³¹ Pour rappel, la définition de l'efficacité énergétique dans le modèle inclut les transferts d'usage dans le logement et le transport.

¹³² Le modèle hybride de Sievers et al. (2019) consiste à un bouclage macroéconomique, un modèle microéconomique pour le système électrique, un modèle de demande d'énergie pour le secteur des transports et un modèle de demande d'énergie pour le logement. Il existe dans leur modèle un *one-way soft link* des sous-modèles en équilibre partiel vers le modèle macroéconomique. Il n'existe donc pas de boucle de rétroaction du modèle macroéconomique vers les modèles en équilibre partiel, comme c'est le cas dans la thèse.

dans le logement, le transport et le secteur électrique, à l'horizon 2030, l'effet sur le PIB est positif. Les auteurs notent que la majeure partie de l'effet positif provient du secteur du logement et du transport. Ils concluent que la transition du secteur électrique vers la production d'électricité à partir d'énergie renouvelable a un effet relativement plus faible sur la croissance par rapport à l'efficacité énergétique.

Pour des recherches futures, il serait intéressant d'intégrer au modèle de la thèse des sous-modèles d'investissement en équilibre partiel dans le logement, dans le transport et dans les secteurs d'activité. Les trois sous-modèles seraient directement liés à l'investissement dans les biens durables pour le logement et le transport, et à l'investissement dans le capital physique pour les secteurs d'activité. On s'attend à ce que les décisions de substitution entre un capital carboné et un capital moins carboné, c.à.d. plus électrifié, engendrent plus d'investissement dans le capital (et plus de coûts d'ajustement). Tandis que pour les décisions d'investissement dans des biens durables décarbonés, l'effet est *a priori* plus ambigu. En effet, dans la réalité, les ménages renouvellent généralement leur parc de biens durables en fonction du taux de renouvellement plutôt que par souci environnemental (*cf.* Decker et Menrad [2015]). Sachant que sur le marché des biens et services, l'offre d'équipements durables est de plus en plus décarbonée, les ménages n'ont d'autres choix que d'investir dans des biens durables verdis. Ce point est d'autant plus vrai pour les équipements électroménagers dont l'offre devient de plus en plus décarbonée et pour les équipements de transport avec le retrait sur le marché automobile des voitures fortement émettrices de gaz à effet de serre sur le long terme. Néanmoins, l'on peut gager que les investissements en biens durables décarbonés des ménages seront importants sur le long terme même si la décision de renouvellement de leurs équipements durables n'est pas systématiquement guidée par les efforts croissants d'efficacité énergétique.

1.2.2. Investissements dans l'efficacité énergétique et prix relatif des énergies

En plus de son effet sur le parc de production d'électricité, le prix relatif des énergies affecte aussi les décisions d'investissement des agents dans l'efficacité énergétique et les nouveaux d'usage, ce qui n'est pas pris en compte dans la thèse. L'on s'attend à ce qu'un prix relatif de l'énergie non-électrique relativement plus élevé, par ex. à cause d'une augmentation de la fiscalité carbone, affecte positivement les investissements dans l'électrification des usages de l'économie et dans les efforts d'efficacité énergétique. Les investissements, par exemple dans les voitures électriques, sont directement influencés par le prix relatif entre l'électricité et l'énergie non-électrique. Dans la littérature, Rapson (2014) montre, à partir d'un modèle dynamique d'optimisation de la demande des climatiseurs aux États-Unis, que les ménages sont *forward-looking* lorsqu'ils prennent des

décisions d'investissement dans l'efficacité énergétique des climatiseurs. Ils valorisent positivement le flux d'économie dans le futur, en prenant en compte le prix de l'électricité et les économies d'énergie que peuvent leur apporter les investissements. En particulier, lorsque le prix de l'électricité *toutes taxes comprises* augmente, les ménages diminuent l'utilisation du climatiseur. Et, l'augmentation de l'efficacité énergétique augmente l'achat des climatiseurs. Sahari (2019) montre, via un modèle économétrique, que les consommateurs finlandais sont sensibles au coût énergétique lorsqu'ils prennent des décisions d'investissement dans des technologies énergétiques, particulièrement de chauffage, sur le long terme. Par exemple, il montre qu'augmenter le prix de l'électricité de 1 centime le kWh réduit la probabilité de choisir un chauffage électrique de six points de pourcentage en moyenne. Antonietti et Fontini (2019) suggèrent, sur données de panel, qu'il existe une relation de long terme entre le prix des énergies et l'efficacité énergétique. Néanmoins, Jacobsen (2015) montre, à partir de données de panel, que le prix de l'électricité n'influence pas significativement l'achat d'équipements durables à haute efficacité énergétique.

Pour des recherches futures, il serait alors intéressant d'étudier l'effet du prix relatif des énergies sur les investissements dans l'efficacité énergétique et les nouveaux usages dans les équipements durables. L'idée serait d'établir un *soft link* entre le secteur du transport, du logement et des équipements de capital avec le modèle macroéconomique pour voir comment les agents établissent leurs décisions d'investissement sur la base du prix relatif des énergies. Et, le modèle d'optimisation du système électrique sera lié aussi bien au modèle macroéconomique qu'aux modèles d'investissement dans les trois secteurs en équilibre partiel.

2. Pour atteindre l'objectif du *facteur 6* à l'horizon 2050, les réévaluations de la fiscalité carbone doivent prendre en compte l'évolution du prix des hydrocarbures sur le long terme et l'électrification de l'économie doit être plus forte

Selon la loi énergie-climat, il est inscrit que, pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, la consommation d'énergies fossiles doit diminuer de 40 % en 2030 par rapport à 2012. À l'horizon 2050, l'objectif du *facteur 6* n'est atteint dans aucune des trois versions de simulation du modèle. Si l'on ajoute la diminution de la consommation d'énergies fossiles¹³³ du secteur électrique, au mieux,

¹³³ La diminution de la consommation du secteur électrique à l'horizon 2030 grâce aux politiques de décarbonation du mix électrique est la suivante. Dans les deux scénarios, la capacité installée des centrale TAC fioul passe de 1400 MW à 1035 MW (données RTE), sachant que consommation totale de fioul des centrales gaz pour la production d'électricité est de 1,12 Mtep (données DGEC), elles consomment 0,24 Mtep en moins de gaz environ à l'horizon 2030. Dans les deux scénarios, les centrales charbon sont totalement déclassées dans les deux scénarios à l'horizon 2022, ce qui correspond à une diminution de 1,4 Mtep de consommation de charbon à l'horizon 2030. Enfin, dans le scénario Volt seulement, il y a un déclassement des centrales de cogénération gaz avec une diminution de 53% de la capacité installée

dans Ampère haut et Volt Haut, à l'horizon 2030, la consommation d'énergie non-électrique baisse respectivement de 15% et de 16,8% par rapport à 2012.

Tout d'abord, comme concluent Henriët, Maggiar et Schubert (2014), les gains d'efficacité énergétique ne sont pas assez forts si la France souhaite suffisamment diminuer ses émissions. Les résultats montrent que la croissance de l'efficacité énergétique n'est pas assez suffisante pour contrer l'effet de la croissance sur la consommation d'énergie, notamment dans le secteur résidentiel. La consommation d'énergie non-électrique des ménages diminue relativement moins que celle de l'entreprise à cause du mécanisme de redistribution, ce d'autant plus dans la version où le prix de gros de l'énergie non-électrique diminue dans le temps. Dans la version basse et la baseline, les ménages substituent plus en faveur de l'énergie non-électrique. L'effet de la fiscalité carbone sur les décisions de consommation d'énergie non-électrique des ménages est relativement plus faible que l'effet attendu. Par conséquent, l'efficacité énergétique joue un rôle important d'inflexion des comportements de consommation d'énergie non-électrique du côté des ménages. Les efforts de maîtrise de la demande d'énergie doivent être relativement plus intensifs dans le secteur résidentiel que dans le secteur non-résidentiel. D'ailleurs, Le Quéré et al. (2019) montrent que la diminution de l'utilisation de l'énergie dans le temps est corrélée avec la mise en place de politiques favorisant les efforts d'efficacité énergétique.

Par ailleurs, la fiscalité carbone, telle que fixée par le Projet Loi Finance 2018 et 2019, n'est pas assez dissuasive pour découpler les émissions de la croissance quand le prix des hydrocarbures diminue dans le temps. Lorsque le prix de l'énergie non-électrique *hors taxes* est relativement plus faible¹³⁴, l'augmentation de la taxe carbone sur le long terme ne permet pas d'infléchir sensiblement le comportement des agents en matière de consommation d'énergie non-électrique. Dans Ampère bas, la consommation d'énergie non-électrique augmente de 4% en 2035 par rapport à 2018. *La fiscalité carbone n'est dissuasive que si le prix de gros (hors taxes) des hydrocarbures est déjà élevé* : si le prix de l'énergie diminue dans le temps et que la fiscalité carbone n'augmente pas assez, l'effet initial attendu sur la consommation d'énergie non-électrique de la fiscalité environnementale n'est pas obtenu. Les résultats de simulation montrent que l'effet prix sur les décisions des agents en matière de consommation d'énergie est important. Les agents basent leurs décisions de consommation d'énergie relativement plus sur le prix relatif des énergies plutôt que sur les gains d'efficacité

soit 1,32 Mtep de consommation de gaz en moins). Dans Ampère, la consommation d'énergies fossiles est de 1,64 Mtep en 2030 approximativement et de 2,96 Mtep pour Volt.

¹³⁴ Le prix de l'énergie non-électrique (TTC) augmente relativement moins dans Ampère bas que dans les autres versions et le prix de gros de l'électricité augmente relativement plus dans Ampère bas. Au total, le prix relatif de l'énergie non-électrique diminue dans le temps pour les ménages, et le prix relatif de l'énergie non-électrique augmente relativement moins pour l'entreprise.

énergétique. L'augmentation de la fiscalité carbone permet bien d'infléchir les décisions de consommation d'énergie des agents de l'économie à condition que le prix des énergies hors taxes soit initialement élevé.

Plusieurs études convergent avec ces résultats. Le Rapport Quinet (2019) et la SNBC (2020), via des simulations des modèles Imacim et Three-ME, concluent que sous les politiques de transition énergétique existantes, l'objectif de neutralité carbone sera difficilement atteint. Le rapport propose de doubler la taxe carbone à l'horizon 2030 en la fixant à 250€ la tonne de CO₂ et conclut que la moitié de la diminution des émissions de gaz à effet de serre se feront grâce aux politiques d'efficacité énergétique et de transferts d'usage dans le secteur du bâtiment et du transport. La SNBC (2020) montre que le moteur principal de la transition énergétique est l'effet relatif du prix des énergies sur la consommation et l'investissement des agents de l'économie. Par conséquent, ils concluent que l'effet prix est un signal très important à prendre en considération si la France veut atteindre ses objectifs climatiques sur le long terme.

Après avoir atteint son niveau le plus bas début 2015, le prix du pétrole a atteint des niveaux haut sur l'année 2018, date à laquelle l'évolution de la taxe carbone fut réévaluée. Par conséquent, les politiques devraient prendre en compte l'évolution du prix des hydrocarbures lorsqu'ils réévaluent l'évolution de la taxe carbone dans le temps. Dans la littérature, Roach (2021) montre que la taxation carbone doit évoluer positivement avec le volume d'énergie consommé et négativement avec le prix des énergies dans le temps. Comme le concluent De Miguel et Manzano (2006) et Heutel (2012), Roach (2021) montre que la taxation carbone doit être procyclique. En effet, si le prix de gros des énergies augmente suffisamment, la consommation des énergies diminue mécaniquement sans besoin d'avoir recours à une augmentation de la fiscalité carbone.

En somme, pour obtenir un effet assez dissuasif sur la consommation d'énergie carbonée des agents, il faudrait garder un niveau de prix de l'énergie non-électrique toutes taxes comprises suffisamment élevé, du moins sur le court-moyen terme, jusqu'à ce que l'électrification des usages prenne le dessus sur le long terme. La sous-section suivante montre qu'avec un prix de l'énergie non-électrique toutes taxes comprises relativement plus élevé et un mécanisme de redistribution approprié, les ménages ne sont pas lésés - au contraire, leur bien-être augmente sur le long terme.

3. L'importance des biens durables dans l'explication de l'effet des chocs de prix des énergies sur le long terme

Dans la lignée de Pindyck et Rotemberg (1984), Hamilton (1983), Lee et Ni (2002), Dhawan et Jeske (2008), et Killian (2008), l'intégration de différentes classes de biens de consommation dans

un modèle affecte significativement les dynamiques agrégées lorsque l'économie est perturbée par des chocs de prix des énergies.

Hamilton (1983), Pindyck et Rotemberg (1984) et Kilian (2008) montrent que l'augmentation du coût d'opération des biens durables¹³⁵ diminue la demande pour les biens durables, particulièrement des véhicules, et donc l'investissement total dans l'économie. Lee et Ni (2002) montrent que les effets d'un choc de prix des énergies sur l'économie ne vient pas que de l'effet du choc du prix des énergies sur les coûts de production des entreprises, mais vient aussi des décisions d'achat de biens durables qui sont retardés dans le temps à cause des effets d'anticipation. Les auteurs montrent que l'augmentation du prix du pétrole a eu un effet important sur l'industrie du métal via la diminution de la demande de biens durables. Rapson (2014) et Sahari (2019) montrent, à partir de modèles en équilibre partiel, que les ménages sont sensibles à l'évolution du prix de l'électricité et des standards d'efficacité énergétiques dans leurs décisions d'achat de climatiseurs et de chauffage. Dhawan et Jeske (2008) montrent que l'effet des chocs du prix du pétrole sur l'output est faible lorsque le modèle établit un lien entre les biens durables et l'énergie dans la modélisation du comportement des ménages. Comme dans le modèle, le résultat est attribué à la possibilité pour le ménage (ricardien) de rééquilibrer son portefeuille d'actif dans le temps. Le ménage diminue relativement plus son investissement en biens durables plutôt que son investissement en capital sur le long terme. L'effet dépressif sur l'offre agrégée est atténué grâce à un investissement dans les biens de capital relativement moins affecté. Les écarts en niveau entre le scénario Volt et le scénario Ampère montrent que les variations de prix de l'électricité et de l'efficacité électrique se transmettent directement dans les choix d'investissement en biens durables des ménages, ce qui affecte positivement ou négativement le PIB sur le long terme.

4. Fiscalité carbone et efficacité économique : quelles sont les conditions ?

4.1. Les résultats montrent que l'effet d'annonce du dégel de la taxe carbone peut être positif

Les agents prennent connaissance du dégel de la taxe carbone quatre ans avant sa mise en œuvre effective. Dans Ampère baseline et Ampère bas, du côté de la demande agrégée, les ménages augmentent leur investissement en biens durables, diminuent leur investissement en capital et augmentent leur consommation d'énergie non-électrique jusqu'à l'année de mise en œuvre du dégel (2023). Ainsi, la production de services énergétiques augmentent relativement plus vite sur la période. Néanmoins, l'effet de préannonce du choc fiscal sur le comportement du ménage ricardien est plus important que sur le comportement du ménage non-ricardien. Le ménage ricardien peut

¹³⁵ Dans le modèle le coût d'opération des biens durables correspond au prix du service énergétique et ne doit pas être confondu avec le coût d'usage du bien durable.

plus facilement se prémunir à l'avance contre les effets adverses du choc fiscal sur le long terme grâce à l'épargne. Du côté de l'offre agrégée, l'entreprise augmente sa production et sa consommation d'énergie non-électrique jusqu'à la date où le choc perturbe l'économie. Par conséquent, l'effet de préannonce du choc fiscal sur le comportement des agents est sensible, et l'augmentation de la consommation d'énergie non-électrique totale dans Ampère baseline et Ampère bas soulève le problème du « green paradox » (Smulders, Tsur et Zemel [2012]).

Dans la littérature, les effets de préannonces des taxes carbonees sont étudiés notamment par Smulders, Tsur et Zemel (2012) et Chan (2020). Smulders, Tsur et Zemel (2012) étudient les effets d'annonce des politiques climatiques sur une économie. Ils montrent que les annonces faites à l'avance d'une augmentation de la taxe carbone augmentent la consommation d'énergie sur la phase d'avant mise en œuvre, comme c'est le cas dans les résultats de la thèse pour les trois versions. Les auteurs avancent que les ménages augmentent leur investissement en capital durant la période d'intérim pour atténuer l'effet de l'augmentation de la taxe carbone sur la production en augmentant le stock de capital disponible. Néanmoins, contrairement à ces auteurs, dans les simulations du chapitre 2, le ménage ricardien augmente son investissement en biens durables plutôt que son investissement en capital. Les résultats du chapitre 2 du côté des ménages diffèrent car, dans le modèle, le fruit de la taxe carbone est redistribué aux ménages sous la forme de transferts budgétaires. Et, Smulders, Tsur et Zemel (2012) ne modélisent ni les biens durables ni les services énergétiques dans leur modèle.

Enfin, Chan (2020) conclut que l'effet d'une augmentation de la taxe carbone sur les agrégats sont moins dépressifs si l'augmentation n'est pas annoncée à l'avance, ce qui est le cas dans la thèse. En réponse à l'augmentation de la taxe carbone, comme chez Chan (2020), afin de minimiser les coûts d'ajustement de l'investissement en capital, dans la version d'information parfaite, les ménages désinvestissent significativement en capital physique dans la phase d'avant mise en œuvre de la taxe carbone parce qu'ils prévoient que l'évolution de la taxe carbone réduira la demande de capital de l'entreprise à long terme. La baisse de la demande en capital induit une baisse du prix du capital, ce qui, en fin de compte, fait grimper le coût d'utilisation des biens durables pendant la période de d'avant mise en œuvre. Après la période d'avant mise en œuvre, le ménage ricardien reprend son plan d'épargne et recommence à investir dans le capital physique au dépend de ses achats en ses biens durables. Ces compromis ont un impact négatif sur l'output à long terme. Contrairement à Smulders, Tsur et Zemel (2012) et aux résultats de la thèse, les émissions de CO₂ dans Chan (2020) diminuent durant la phase d'avant mise en œuvre de la taxe carbone grâce à une demande de capital plus faible de la part des entreprises.

- 4.2. Dans le modèle, le bien-être des ménages s'améliore sur le long terme à condition que le gouvernement redistribue le supplément de recettes lié à la taxe carbone

L'évolution de la fiscalité carbone mise en place par le gouvernement à partir de 2023 génère un surplus de recettes budgétaires dans les trois versions de simulation du modèle. Ce surplus de recettes est redistribué en partie, et de manière homogène, aux deux types ménages via des transferts budgétaires. L'autre partie sert à financer l'augmentation des subventions publiques aux filières de production d'électricité subventionnées. Le mécanisme de redistribution vers les ménages compense au-delà du coût carbone initial supporté par les ménages. En effet, cette compensation comprend, entre autres, les recettes issues du coût carbone supporté par l'entreprise. C'est pourquoi la consommation agrégée des ménages augmente dans le temps.

Grâce au mécanisme de redistribution, les ménages gardent un niveau de consommation soutenu sur le long terme. En unité de travail efficace, la consommation agrégée des ménages augmente de 0,5% en 2035 par rapport à 2018 dans Ampère haut, de 1,9% en 2035 par rapport à 2018 dans Ampère baseline et de 2,9% en 2035 par rapport à 2018 dans Ampère bas. Malgré une augmentation identique de la fiscalité carbone sur le long terme dans les trois versions, le gain de bien-être est relativement plus élevé quand le prix de gros des hydrocarbures diminue sur le long terme grâce à des recettes fiscales énergétiques relativement plus élevées. Comme chez Combet et Méjean (2017)¹³⁶, les transferts budgétaires amortissent l'effet des chocs de prix des énergies sur la consommation des ménages. En effet, dans le modèle, l'augmentation du coût marginal de production de l'entreprise sur le long terme diminue le salaire réel dans le temps. En revanche, l'effet conjoint de la perte de salaire réel et de l'augmentation du coût unitaire des services énergétiques sur les dépenses de consommation des ménages est contrebalancé par des transferts budgétaires directs de la part du gouvernement. Toutefois, le mécanisme de redistribution n'est pas assez fort pour renverser la tendance de diminution l'investissement en capital physique sur le long terme (*cf.* résultat suivant).

Le mécanisme de redistribution profite aux deux types de ménages dans le modèle. La consommation agrégée et le bien-être des ménages augmente sur long terme malgré l'augmentation de la fiscalité environnementale. Le mécanisme permet donc de diminuer le caractère régressif de la taxe carbone sur la consommation des ménages, même si le ménage ricardien y gagne relativement plus grâce à la possibilité d'arbitrer entre consommation et épargne. Néanmoins, il ne permet de pas de rendre la politique fiscale progressive. Ce résultat est assez convergent avec

¹³⁶ Combet et Méjean (2017) étudient les différents mécanismes de recyclage de la taxe carbone sur une économie en utilisant le modèle d'équilibre général dynamique Imaclim.

d'autres travaux de recherche. Klenert et Mattauch (2016) montrent analytiquement ce résultat. Combet et Méjean (2017) montrent que le recyclage de la taxe carbone par le biais de transferts budgétaires diminue les inégalités mais au prix d'un taux de croissance plus faible, comme c'est le cas dans le modèle. Douenne (2019), sur la base de simulations en équilibre partiel, montre qu'une redistribution à partir de transferts budgétaires homogènes est préférable en France car cela rendrait la taxe carbone progressive. Goulder et al. (2019) montrent que des transferts budgétaires ont un effet positif et progressif sur le bien-être des ménages, et permettent d'atténuer les effets adverses de la fiscalité carbone (par exemple, l'augmentation du prix à la consommation) sur les ménages. Roach (2021) montrent que les transferts budgétaires atténuent l'effet négatif d'une augmentation de la taxe carbone sur le bien-être des ménages et qu'ils sont préférés à une diminution de la taxation des revenus du travail comme mécanisme de redistribution.

4.3. Mais les conditions de production de l'entreprise se détériorent sur le long terme

En comparaison, l'augmentation de la fiscalité carbone a un effet défavorable sur les entreprises. En effet, le mécanisme de redistribution du gouvernement ne bénéficie qu'aux ménages. L'évolution de la fiscalité carbone pèse relativement plus sur la consommation en énergie de l'entreprise et *in fine* sur sa production. Dans Ampère haut, où l'augmentation du prix de l'énergie non-électrique (ITC) est portée conjointement par l'augmentation du prix de gros de l'énergie non-électrique et de la fiscalité carbone, l'output en 2035 diminue de 0,37% par rapport à 2018 et le taux de croissance annuel moyen de l'économie perd 0.022 points de pourcentage. Dans Ampère bas, où l'augmentation du prix de l'énergie non-électrique (ITC) est portée uniquement par l'évolution de la composante carbone, l'output diminue de 0,36% en 2035 par rapport à 2018 et le taux de croissance annuel moyen perd 0.021 points de pourcentage.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont montré l'effet dépressif de l'évolution du prix du baril sur l'output ; entre autres, Hamilton (1983), Kim et Loungani (1992), Rotemberg et Woodford (1998), Finn (2000), et Kilian (2008 et 2009). L'effet dépressif de l'évolution de la taxe carbone sur l'output est discuté par, entre autres, Jorgenson et Wilcoxon (1993), Goulder (1995), De Miguel et Manzano (2006), Combet et Méjean (2017), Goulder et Hafstead (2017), et Antosiewicz et al. (2020). Jorgenson et Wilcoxon (1993), via un modèle à équilibre général dynamique, montrent qu'au niveau agrégé, la manière dont les revenus sont recyclés affectera différemment l'économie. Par exemple, lorsqu'ils redistribuent le produit de la taxation carbone aux ménages par des transferts budgétaires, le taux de croissance annuel moyen diminue de 0,02 points de pourcentage - ce qui est comparable aux résultats trouvés dans le chapitre 2. Pareillement, Goulder (1995) regarde, via un modèle à équilibre général dynamique, différents mécanismes de recyclage des taxes énergétiques. Il montre

que le résultat est meilleur sur le PIB lorsque le surplus de revenu de la taxation de l'énergie est utilisé pour diminuer les taxes qui causent des distorsions dans l'économie. L'effet sur le PIB est plus dépressif mais toujours contenu (entre -0,5% et -0,1% sur le long terme) si le mécanisme de redistribution consiste à des transferts forfaitaires vers les ménages. De Miguel et Manzano (2006) montrent analytiquement, via un modèle DSGE, qu'il ne vaut mieux pas taxer les entreprises sur leur consommation d'énergie sur le long terme à cause du potentiel effet dépressif sur leur production. Goulder and Hafstead (2017), via un modèle à équilibre général dynamique, concluent qu'augmenter de 5% la taxe carbone annuellement à partir de 2020 diminue le PIB de 1% en 2035. Sur données françaises, Combet et Méjean (2017) argumentent que les transferts budgétaires ont un effet, certes positif sur le bien-être et la consommation des ménages, mais négatif sur le PIB en lien avec des investissements plus faibles et des coûts de production relativement plus élevés. Enfin, Antosiewicz et al. (2020), via un modèle DSGE, montrent que lorsque la taxe carbone est redistribuée à partir de transferts budgétaires les distorsions causées sont plus fortes pour l'entreprise que pour les ménages.

En somme, l'effet de l'évolution du prix des énergies (TTC) sur la compétitivité des entreprises est défavorable. Il faut noter que, dans le modèle, le prix de l'output est normalisé à 1 sur toute la période d'étude : ce sont les facteurs de production et l'output qui s'ajustent de manière à avoir une inflation nulle. Par conséquent, dans cette thèse, l'entreprise ne récupère pas le surplus de la taxation. Il serait intéressant, dans des recherches futures, de laisser varier le prix de l'output en fonction de l'évolution du coût unitaire de production comme chez Pindyck et Rotemberg (1984), Goulder et al. (2019), et Chan (2020). En réponse à l'augmentation des coûts de production, le prix de vente des biens et services bougerait à la hausse, ce qui affecterait directement la demande des ménages. Diamond et Mirrlees (1971) montrent, qu'en l'absence de profits, l'augmentation de la taxation sur les biens intermédiaires de production, comme c'est le cas pour l'énergie, doit être intégrée dans le calcul du prix de vente des biens finaux pour éviter l'inefficience de la production. Annicchiarico et Di Dio (2015) soulèvent aussi l'importance des rigidités nominales et réelles dans l'étude des politiques environnementales.

4.4. Futures recherches sur les mécanismes de recyclage de la taxe carbone

Il existe d'autres manières de redistribuer les revenus en provenance des taxes environnementales pour réduire les distorsions dans le système fiscal, par exemple, en diminuant certaines taxes. Goulder (1995 et 1998) argumente que le coût de la taxe environnementale est plus faible quand on redistribue en diminuant d'autres taxes de nature distortive plutôt que des transferts budgétaires. D'autres auteurs préconisent aussi une diminution des taxes de nature distortives comme Jorgenson

et Wilcoxon (1993), Bovenberg et de Mooij (1994), Schneider (1997), Bohringer et Rutherford (2008), Bento et Jacobsen (2007), Labandeira et al. (2009), ou encore Karydas et Zhang (2019). Sur la France, Chiroleu-Assouline et Fodha (2014), et Aubert et Chiroleu-Assouline (2019), suggèrent une diminution de la taxe sur les revenus du travail. Toutefois, Jacobs et de Mooij (2015) montrent que le recyclage des recettes environnementales à partir d'une diminution de la taxe sur les revenus du travail n'est pas supérieur, en matière de coûts et de bien-être, à un recyclage à partir des transferts budgétaires.

Par ailleurs, les résultats précédents montrent que l'effet de la fiscalité carbone pèse sur l'entreprise. Il serait intéressant d'étudier un mécanisme de redistribution où une partie du recyclage des taxes environnementales diminuent les cotisations patronales. Dans la littérature, Kosonen (2012), Gonand et Jouvét (2015), Combet et Méjean (2017), Goulder et al. (2019), et Antosiewicz et al. (2020), proposent un recyclage hybride avec des transferts budgétaires et une diminution des taxes qui pèsent sur les coûts de production des entreprises.

5. La prise en compte de l'électricité dans l'étude des chocs énergétiques est importante

La majeure partie de la littérature ne prend pas en compte les possibilités de substitution qui existent entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour la production des services énergétiques. Les résultats montrent que ces possibilités de substitution sont fortes sur le long terme. Les variations de prix de l'électricité et de l'efficacité électrique se transmettent directement dans les arbitrages de consommation d'énergie des agents de l'économie, et dans les choix d'investissement en capital physique et en biens durables, ce qui affecte positivement ou négativement le PIB sur le long terme.

Et, les résultats montrent qu'un taux d'efficacité électrique relativement plus élevé et un mix de production relativement plus nucléarisé, comme c'est le cas pour le scénario Volt, ont un effet positif sur la décarbonation de l'économie mais au prix d'une sensibilité plus forte de l'économie aux variations du prix du baril et de la fiscalité carbone. Les différences d'évolution de la consommation d'énergie non-électrique entre les scénarios Ampère et Volt sont principalement dues aux différences dans le prix de gros de l'électricité qui découlent directement des choix d'investissement dans le mix de production d'électricité.

6. La temporalité des chocs énergétiques

Jusqu'à présent, la thèse considère que les agents de l'économie possèdent une vision parfaite sur l'avenir et anticipent l'évolution des variables exogènes jusqu'à la fin de l'horizon d'étude. Dans ce cadre, les chocs qui perturbent l'économie sont perçus comme transitoires et anticipés. Néanmoins, cette hypothèse, très utilisée dans la littérature macroéconomique, est forte. L'incertitude

régulatoire en France pèse sur le prix de l'électricité et le prix du gaz, sur la fiscalité carbone, sur les subventions aux filières électriques subventionnées et sur les investissements dans le système de production d'électricité. Par ailleurs, le prix du baril est historiquement très volatile et son évolution future est soumise à une forte incertitude. C'est pourquoi la dernière partie de la thèse simule les scénarios Ampère et Volt dans leurs trois versions dans un cadre où les agents de l'économie n'anticipent pas l'évolution des variables exogènes dans le temps. Alors, l'évolution des variables exogènes est perçue comme permanente à chaque date par les agents.

Selon la littérature, la temporalité des chocs de revenu (transitoire vs permanents, et anticipés vs non anticipés) affecte les décisions des ménages. Une partie de la littérature s'accorde pour dire que les chocs transitoires ont un effet relativement plus faible sur les comportements de consommation que les chocs permanents (Friedman [1957], Pindyck et Rotemberg [1984], Souleles [1999], Blundell, Pistaferri et Preston [2008], et Jappelli et Pistaferri [2010]). Une autre partie de la littérature s'accorde pour dire que les agents répondent sensiblement aux chocs anticipés (Wilcox [1989], Winkler et Wohltmann [2008], et Jappelli et Pistaferri [2010]).

Annexes de la Partie III

3.A. Bibliographie

- Antonietti, R., & Fontini, F. (2019). Does energy price affect energy efficiency? Cross-country panel evidence. *Energy Policy*, 129, 896-906.
- Antosiewicz, M., Fuentes, R., Lewandowski, P., & Witajewski-Baltvilks, J. (2020). Distributional effects of emission pricing in a carbon-intensive economy: the case of Poland.
- Atalla, T., Blazquez, J., Hunt, L., & Manzano, B. (2017). Prices versus policy: an analysis of the drivers of the primary fossil fuel mix. *Energy Policy*, 106, 536-546.
- Aubert, D., & Chiroleu-Assouline, M. (2019). Environmental tax reform and income distribution with imperfect heterogeneous labour markets. *European Economic Review*, 116, 60-82.
- Bento, A. M., & Jacobsen, M. (2007). Ricardian rents, environmental policy and the 'double-dividend' hypothesis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 53(1), 17-31.
- Blundell, R., Pistaferri, L., & Preston, I. (2008). Consumption inequality and partial insurance. *American Economic Review*, 98(5), 1887-1921.
- Böhringer, C., & Rutherford, T. F. (2008). Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics*, 30(2), 574-596.
- Bohringer, C., & Rutherford, T. (2013). Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland. *Energy Policy*, 55, 16-26.
- Bondia, R., Ghosh, S., & Kanjilal, K. (2016). International crude oil prices and the stock prices of clean energy and technology companies: Evidence from non-linear cointegration tests with unknown structural breaks. *Energy*, 101, 558-565.
- Bovenberg, A. L., & De Mooij, R. A. (1994). Environmental levies and distortionary taxation. *The American Economic Review*, 84(4), 1085-1089.
- Chan, Y. T. (2020). Collaborative optimal carbon tax rate under economic and energy price shocks: A dynamic stochastic general equilibrium model approach. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120452.
- Chiroleu-Assouline, M., & Fodha, M. (2014). From regressive pollution taxes to progressive environmental tax reforms. *European Economic Review*, 69, 126-142.
- Combet, E. & Méjean, A. (2017). The Equity and Efficiency Trade-off of Carbon Tax Revenue Recycling: A Reexamination (CIRED, 2017)
- Corbet, S., Goodell, J. W., & Günay, S. (2020). Co-movements and spillovers of oil and renewable firms under extreme conditions: New evidence from negative WTI prices during COVID-19. *Energy economics*, 92, 104978.
- De Miguel, C., & Manzano, B. (2006). Optimal oil taxation in a small open economy. *Review of Economic Dynamics*, 9(3), 438-454.
- Decker, T., & Menrad, K. (2015). House owners' perceptions and factors influencing their choice of specific heating systems in Germany. *Energy Policy*, 85, 150-161.
- Dhawan, R., & Jeske, K. (2008). Energy price shocks and the macroeconomy: the role of consumer durables. *Journal of Money, Credit and Banking*, 40(7), 1357-1377.
- Douenne, T. (2019). Les effets de la fiscalité écologique sur le pouvoir d'achat des ménages : simulation de plusieurs scénarios de redistribution. *Conseil d'analyse économique-FOCUS*, 30.
- Douenne, T. (2020). The vertical and horizontal distributive effects of energy taxes: A case study of a french policy. *The Energy Journal*, 41(3).
- Fell, H., Li, S., & Paul, A. (2014). A new look at residential electricity demand using household expenditure data. *International Journal of Industrial Organization*, 33, 37-47.
- Finn, M. (2000). Perfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *Journal of Money, Credit and Banking*, 32(3), 400-416.
- Friedman, M. (1957). The permanent income hypothesis. In *A theory of the consumption function* (pp. 20-37). Princeton University Press.
- France Stratégie (2019). La valeur de l'action pour le climat. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-laction-pour-le-climat_0.pdf
- Gonand, F., & Jouvét, P.-A. (2015). The "second dividend" and the demographic structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 71-97.

- Goodwin, P., Dargay, J., & Hanly, M. (2004). Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review. *Transport reviews*, 24(3), 275-292.
- Goulder, L. H. (1995). Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: an intertemporal general equilibrium analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3), 271-297.
- Goulder, L., & Hafstead, M. (2017). *Confronting the climate challenge: US policy options*. Columbia University Press.
- Goulder, L. H., Hafstead, M. A., Kim, G., & Long, X. (2019). Impacts of a carbon tax across US household income groups: What are the equity-efficiency trade-offs?. *Journal of Public Economics*, 175, 44-64.
- Hamilton, J. (1983). Oil and the macroeconomy since World War II. *Journal of Political Economy*, 91, 228-248.
- Henriet, F., Maggiar, N., & Schubert, K. (2014). A stylized applied energy-economy model for France. *The Energy Journal*, 35(4).
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244-264.
- International Energy Agency (2019 et 2020). World Energy Investment Outlook.
- Jacobs, B., & De Mooij, R. A. (2015). Pigou meets Mirrlees: On the irrelevance of tax distortions for the second-best Pigouvian tax. *Journal of Environmental Economics and Management*, 71, 90-108.
- Jacobsen, G. D. (2015). Do energy prices influence investment in energy efficiency? Evidence from energy star appliances. *Journal of Environmental Economics and Management*, 74, 94-106.
- Jappelli, T., & Pistaferri, L. (2010). The consumption response to income changes.
- Jorgenson, D. W., & Wilcoxon, P. J. (1993). Reducing US carbon dioxide emissions: an assessment of alternative instruments. *Journal of Policy Modeling*, 15(5-6), 491-520.
- Karydas, C., & Zhang, L. (2019). Green tax reform, endogenous innovation and the growth dividend. *Journal of Environmental Economics and Management*, 97, 158-181.
- Kilian, L. (2008). The economic effects of energy price shocks. *Journal of Economic Literature*, 46(4), 871-909.
- Kim, I., & Loungani, P. (1992). The role of energy in real business cycle models. *Journal of Monetary Economics*, 29(2), 173-189.
- Klenert, D., & Mattauch, L. (2016). How to make a carbon tax reform progressive: The role of subsistence consumption. *Economics Letters*, 138, 100-103.
- Kosonen, K. (2012). Regressivity of environmental taxation: myth or reality?. In *Handbook of research on environmental taxation*. Edward Elgar Publishing.
- Krishnamurthy, C. K. B., & Kriström, B. (2015). A cross-country analysis of residential electricity demand in 11 OECD-countries. *Resource and Energy Economics*, 39, 68-88.
- Kumar, S., Managi, S., & Matsuda, A. (2012). Stock prices of clean energy firms, oil and carbon markets: A vector autoregressive analysis. *Energy Economics*, 34(1), 215-226.
- Labandeira, X., Labeaga, J., & Rodriguez, M. (2009). An integrated economic and distributional analysis of energy policies. *Energy Policy*, 37(12), 5776-5786.
- Le Quéré, C., Korsbakken, J. I., Wilson, C., Tosun, J., Andrew, R., Andres, R. J., ... & van Vuuren, D. P. (2019). Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies. *Nature Climate Change*, 9(3), 213-217.
- Lee, K., & Ni, S. (2002). On the dynamic effects of oil price shocks: a study using industry level data. *Journal of Monetary Economics*, 49(4), 823-852.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2020). Stratégie Nationale Bas Carbone : rapport d'accompagnement. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200318%20Rapport%20d%27accompagnement%20SNBC2.pdf>
- Pindyck, R. S., & Rotemberg, J. J. (1984). Energy price shocks and macroeconomic adjustments. *Natural Resources Journal*, 24(2), 277-296.
- Rapson, D. (2014). Durable goods and long-run electricity demand: Evidence from air conditioner purchase behavior. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(1), 141-160.
- Roach, T. (2021). Dynamic carbon dioxide taxation with revenue recycling. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125045.
- Romero-Jordán, D., Del Rio, P., Jorge-García, M., & Burguillos, M. (2010). Price and income elasticities of demand for passenger transport fuels in Spain. Implications for public policies. *Energy Policy*, 38(8), 3898-3909.
- Rotemberg, J., & Woodford, M. (1996). Imperfect competition and the effects of energy price increases on economic activity. *NBER Working Papers*(w5634).
- Sahari, A. (2019). Electricity prices and consumers' long-term technology choices: Evidence from heating investments. *European Economic Review*, 114, 19-53.
- Shah, I. H., Hiles, C., & Morley, B. (2018). How do oil prices, macroeconomic factors and policies affect the market for renewable energy?. *Applied energy*, 215, 87-97.
- Schneider, S. H. (1997). Integrated assessment modeling of global climate change: Transparent rational tool for policy making or opaque screen hiding value-laden assumptions?. *Environmental Modeling & Assessment*, 2(4), 229-249.

- Sievers, L., Breitschopf, B., Pfaff, M., & Schaffer, A. (2019). Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions. *Ecological Economics*, 160, 191-204.
- Smulders, S., Tsur, Y., & Zemel, A. (2012). Announcing climate policy: can a green paradox arise without scarcity?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(3), 364-376.
- Souleles, N. S. (1999). The response of household consumption to income tax refunds. *American Economic Review*, 89(4), 947-958.
- Wilcox, D. W. (1989). Social security benefits, consumption expenditure, and the life cycle hypothesis. *Journal of Political Economy*, 97(2), 288-304.
- Wohltmann, H. W., & Winkler, R. C. (2008). *Anticipated and unanticipated oil price shocks and optimal monetary policy* (No. 2008-05). *Economics Working Paper*.

PARTIE IV. Effets de la structure d'information sur le comportement des agents sous divers scénarios d'évolution du prix des énergies

Tous les résultats de la Partie III se situent dans un cadre à information parfaite où l'évolution des variables énergétiques exogènes est anticipée parfaitement par les agents jusqu'en 2035. Cette structure d'information, souvent utilisée en macroéconomie, peut toujours prêter à discussion. Dans la réalité, les agents de l'économie ont une vision plus ou moins limitée de l'évolution des variables énergétiques dans le temps. Il existe une incertitude régulatoire sur les prix de détail du gaz et de l'électricité, sur l'évolution de la fiscalité énergétique et sur l'évolution du mix de production. C'est pourquoi, la présente Partie sort du cadre à information parfaite.

La Partie discute des résultats de simulation pour les divers scénarios précédents, mais en information imparfaite. L'exercice peut aussi représenter un test de robustesse sur une hypothèse forte du modèle qui est souvent utilisée dans la littérature pour les exercices de simulation. Le premier chapitre discute des résultats de simulation des scénarios Ampère et Volt si les agents ont une information imparfaite de l'économie. Le deuxième chapitre clôt la partie sur une discussion.

CHAPITRE 1. LES EFFETS AGRÉGÉS DE LONG TERME D'UNE TRANSITION ÉLECTRIQUE SOUS DIVERS SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU PRIX DES ÉNERGIES DANS UN ENVIRONNEMENT À INFORMATION IMPARFAITE

1. Structure de l'information et prise de décision des agents

La trajectoire des variables énergétiques exogènes - prix des énergies, taxes des énergies, investissements et subventions du système électrique - sont fixées à l'avance dans le modèle : la trajectoire des chocs exogènes est connue par le modélisateur. La thèse simule le modèle dans (i) un environnement où les agents anticipent parfaitement les chocs de l'économie et dans (ii) un environnement où les agents n'anticipent pas les chocs (*cf. Figure 33 infra*). Le premier environnement est un environnement où les agents ont une rationalité parfaite, c'est-à-dire qu'ils connaissent parfaitement après la période 1 (ici, l'année 2019) l'état de l'économie dans lequel ils

se trouvent et optimisent. Le second environnement peut être approché comme un environnement où les agents ont une rationalité « limitée », c'est-à-dire qu'ils ne connaissent pas l'état de l'économie dans lequel ils se trouvent à cause de l'information imparfaite sur la trajectoire des variables énergétiques exogènes. Les agents vont former leurs anticipations via un processus d'apprentissage.

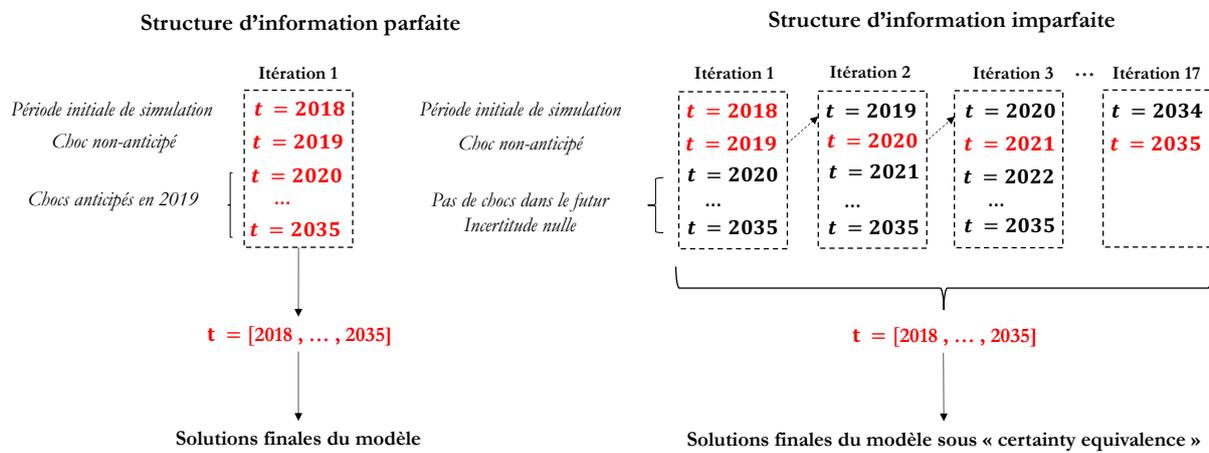


Figure 33 Chocs anticipés et chocs non-anticipés : schématisation des simulations Dynare

sur la base de Villemot (2018). Dans la structure d'information parfaite, les résultats de simulation du modèle sont obtenus à partir d'une seule itération pour tout l'horizon temporel. L'économie est perturbée à chaque date par un ensemble de chocs exogènes et prend connaissance en 2019 de l'évolution des chocs exogènes sur tout l'horizon temporel. Par exemple, les agents de l'économie prennent connaissance, en 2019, de la trajectoire du prix du baril de 2019 à 2035. Par conséquent, les agents sont surpris par l'évolution du prix du baril en 2019 (choc non-anticipé). En revanche, sachant qu'ils ont appris en 2019 la trajectoire du prix du baril de 2020 à 2035, les agents de l'économie ne sont plus surpris par l'évolution du prix du baril à partir de l'année 2020, et ce jusqu'à la fin de période (choc anticipé). Dans la structure d'information imparfaite, les simulations se font en 17 itérations. Sur le logiciel de simulation Dynare, il n'est pas possible de perturber une économie de chocs non-anticipés sur plusieurs dates dans un environnement déterministe. En revanche, il est possible de perturber une économie de chocs non-anticipés pour la date qui suit la date initiale de simulation, comme c'est le cas dans la structure d'information parfaite. La date initiale de simulation est décalée d'une année au fil des itérations. L'itération 1 commence la simulation en 2018 et perturbe l'économie en 2019. L'itération 2 commence la simulation en 2019 et perturbe l'économie en 2020. L'itération 3 commence la simulation en 2020 et perturbe l'économie en 2021. Et ainsi de suite jusqu'à l'itération 17 où la simulation commence en 2034 et perturbe l'économie de chocs non-anticipés en 2035. Sachant que la structure d'information imparfaite impose l'hypothèse de « certainty equivalence », après avoir perturbé l'économie de chocs non-anticipés en t , l'économie est supposée avoir atteint un nouvel état stationnaire en $t+1$ et n'est plus perturbée par des chocs exogènes de $t+1$ à T . Enfin, pour chaque itération, les résultats de simulation obtenus à la date durant laquelle l'économie est perturbée par des chocs non-anticipés, la date qui suit la date initiale de simulation, sont enregistrés de manière à avoir in fine les solutions finales du modèle à chaque date.

Si bien que les résultats des simulations correspondent bien à la réponse de l'économie à des chocs non-anticipés de 2019 à 2035.

L'inconvénient de la structure d'information parfaite est que le modèle repose sur un cadre à anticipations parfaites sans incertitude. Les agents connaissent la trajectoire des variables énergétiques exogènes et ne sont plus surpris après la période 1 de simulation (l'année 2019). Cela peut être contraignant, spécialement pour l'étude des chocs sur les prix des hydrocarbures qui sont de nature stochastique, et l'incertitude réglementaire qui pèse sur l'évolution des investissements dans le système électrique, sur l'évolution des subventions au système électrique et l'évolution du prix de détail de l'électricité.

Le second environnement correspond à un environnement où les agents optimisent sous information imparfaite. L'unique contrainte imposée est la propriété de *certainty equivalence* (Lucas et Sargent [1981]). Les agents vont prendre des décisions comme si les perturbations futures sont, conditionnellement à l'information sur l'état actuel de l'économie, **nulles en absolu**. Ils considèrent que, à l'arrivée non-anticipée de nouvelles informations sur l'évolution des variables énergétiques en t , les variables énergétiques n'évolueront plus à partir de $t+1$ jusqu'à la fin de période T (l'année 2035). Ils sont surpris à chaque date de simulation par l'évolution des variables énergétiques. Par exemple, si le prix du baril passe de 40\$ en 2018 à 45\$ en 2019, les agents de l'économie seront surpris par cette évolution en 2019. Ils vont considérer qu'à partir de 2020, les chocs sur le prix du baril seront nuls et qu'un nouvel état stationnaire sera atteint. Ce sont de multiples états stationnaires qui vont se succéder, si l'on se met à la place des agents économiques. Par conséquent, les dynamiques du modèle seront différentes dans un environnement à information imparfaite par rapport à un environnement où les agents possèdent une information parfaite sur l'état de l'économie dans lequel ils se trouvent.

Dans l'environnement à information imparfaite utilisé ici, le risque n'est pas pris en compte dans les prises de décision des agents. Cette propriété n'est forte que dans le cas d'un modèle stochastique où les agents prennent leurs décisions sachant que les chocs dans le futur sont aléatoirement distribués avec une moyenne nulle. Par construction, le modèle ici simulé en environnement déterministe n'intègre pas l'incertitude inhérente aux chocs.

2. Les résultats de simulation du modèle en structure d'information imparfaite

La section présente les résultats du modèle sous information imparfaite. Les scénarios, Ampère et Volt, et les versions d'évolution du prix des énergies étudiés sont les mêmes que ceux envisagés dans la Partie III.

2.1. La dynamique de la consommation d'énergie est relativement peu sensible à la structure d'information

Les dynamiques de la consommation d'électricité et de la consommation d'énergie non-électrique ne sont pas sensibles à la structure d'information. Les niveaux changent légèrement sur le long terme (cf. **Figure 34** *infra*) dans la structure d'information imparfaite. Les décisions de consommation d'énergie des agents de l'économie sont relativement moins soumises aux effets d'anticipation que les décisions sur les autres biens de consommation et d'investissement.

2.1.1. Dans le modèle, la consommation d'énergie est un peu plus sensible à des mouvements anticipés du prix des énergies plutôt que des mouvements non-anticipés du prix des énergies

Les dynamiques en unité de travail efficace sur le comportement des agents de l'économie en matière de choix de consommation d'énergie sont très proches dans les deux structures d'information (cf. **Figure 34** *infra*). Néanmoins, les niveaux, y.c. effet croissance, changent légèrement (cf. **Tableau 30**¹³⁷ *infra*). Par rapport à la structure où les agents anticipent parfaitement l'évolution des variables énergétiques exogènes sur tout l'horizon d'étude, les agents consomment relativement plus d'énergie non-électrique et d'électricité sur le moyen-long terme dans les deux scénarios et les trois versions d'évolution du prix des énergies. Par exemple, dans le scénario Ampère bas, ils consomment 1,50 TWh en plus d'électricité à l'horizon 2035, et dans Ampère haut, ils consomment 0,60 TWh d'électricité en plus à l'horizon 2035.

Ce résultat est intuitif. En effet, si les agents savent à l'avance que le prix des énergies augmente sur le long terme, ils vont relativement plus diminuer leur consommation en énergie que si les agents ne connaissent pas à l'avance l'évolution du prix des énergies sur le long terme. Ils vont pouvoir se prémunir à l'avance d'une quelconque évolution du prix des énergies dans le futur. Tandis que s'ils n'anticipent pas l'évolution du prix des énergies, ils vont prendre des décisions de consommation d'énergie à la date t conditionnellement à l'information qu'ils ont sur l'évolution future du prix des énergies. Or, d'après le principe de *certainty equivalence* imposé par la structure d'information imparfaite, les agents considèrent que l'évolution dans le futur du prix des énergies sera nulle. Donc, ils vont réagir relativement moins à la baisse que s'ils avaient une information parfaite sur l'évolution du prix des énergies dans le futur.

¹³⁷ Pour obtenir la consommation d'électricité en TWh, le facteur de conversion est : 1 TWh » 0,08598542 Mtep.

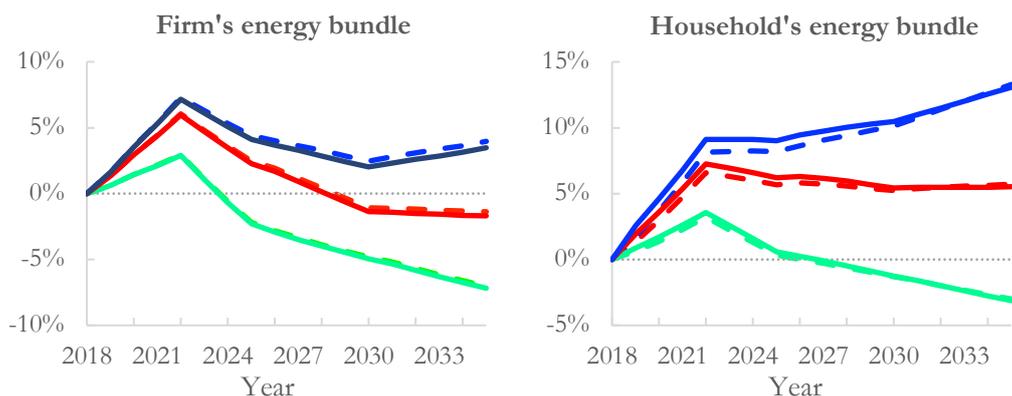


Figure 34 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

Légendes :

<i>High oil price – Anticipated</i>	
<i>Low oil price – Anticipated</i>	
<i>Baseline - anticipated</i>	
<i>High oil price – Non-anticipated</i>	
<i>Low oil price – Non-anticipated</i>	
<i>Baseline – Non-anticipated</i>	

	Consommation (Mtep)	Version	2025	2030	2035
Ampère	Électricité	Haut	-0,011	0,014	0,050
		Baseline	-0,021	0,047	0,088
		Bas	-0,030	0,063	0,125
	Énergie non-électrique	Haut	-0,051	0,042	0,119
		Baseline	-0,123	0,082	0,237
		Bas	-0,202	0,093	0,362
Volt	Électricité	Haut	-0,006	0,029	0,070
		Baseline	-0,026	0,056	0,112
		Bas	-0,041	0,075	0,156
	Énergie non-électrique	Haut	-0,068	0,044	0,155
		Baseline	-0,148	0,083	0,284
		Bas	-0,229	0,094	0,413

Tableau 30 Différences de consommation par type d'énergie par rapport à la structure à information parfaite, y.c. effet croissance

2.1.2. Dans le modèle, la consommation d'énergie non-électrique est relativement plus sensible au choix de la structure d'information par rapport à la consommation d'électricité

Les écarts en niveau entre les deux structures d'information sont plus importants pour la consommation d'énergie non-électrique que la consommation d'électricité, notamment quand le prix des énergies est relativement plus faible (cf. **Tableau 30** supra). Par exemple, dans le scénario Volt bas, en 2035, la consommation d'électricité est plus élevée de 0,156 Mtep alors que la consommation d'énergie non-électrique est plus élevée de 0,413 Mtep par rapport à la structure

d'information parfaite. Alors que dans le scénario Volt haut, lorsque l'évolution du prix des énergies n'est pas anticipée, la consommation d'énergie dévie beaucoup moins de la consommation d'énergie lorsque les agents anticipent parfaitement l'évolution du prix des énergies. En effet, la consommation d'électricité est plus élevée de 0,070 Mtep et la consommation d'énergie non-électrique est plus élevée de 0,155 Mtep par rapport à la structure d'information parfaite.

2.1.3. *Dans le modèle, la consommation d'énergie du ménage non-ricardien est relativement plus sensible au choix de la structure d'information*

Le ménage non-ricardien est plus sensible à la temporalité des chocs que le ménage ricardien. Les effets d'annonce, dans la structure d'information parfaite, ont un effet d'inflexion sur la consommation d'énergie relativement plus sensible sur le ménage non-ricardien que sur le ménage ricardien. Sur le long terme, en unité de travail efficace, le ménage non-ricardien augmente relativement plus sa consommation d'électricité et sa consommation d'énergie non-électrique (*cf. Tableau 31 infra*) lorsqu'il n'anticipe pas l'évolution du prix des énergies (TTC). Alors que, sur le long terme, la consommation d'énergie du ménage ricardien ne dévie que de peu entre les deux structures d'information. Par exemple, si le ménage non-ricardien n'anticipe pas l'évolution des variables énergétiques (exogènes) dans le temps, alors, sa consommation d'énergie non-électrique en 2035 par rapport à 2018 est de 0,58 p.p. plus élevée que s'il l'anticipait. Alors que celle du ménage ricardien est de 0,12 p.p. plus élevée.

	Consommation	Version	2025	2030	2035
Ricardien	Électricité	Haut	-0,30	-0,16	0,06
		Baseline	-0,61	-0,28	0,02
		Bas	-0,89	-0,46	-0,01
	Énergie non-électrique	Haut	-0,29	-0,10	0,08
		Baseline	-0,66	-0,27	0,10
		Bas	-1,03	-0,51	0,12
Non-ricardien	Électricité	Haut	0,10	0,15	0,20
		Baseline	0,17	0,31	0,28
		Bas	0,22	0,42	0,37
	Énergie non-électrique	Haut	0,08	0,17	0,19
		Baseline	0,17	0,37	0,37
		Bas	0,22	0,56	0,58

Tableau 31 Écart en p.p. entre les deux structures d'information de la réponse dynamique de la consommation d'énergie en unité de travail efficace par rapport à 2018 - *Ampère*

Par ailleurs, sur le court-moyen terme, le ménage ricardien diminue relativement plus sa consommation d'électricité et d'énergie non-électrique par rapport à la structure d'information

parfaite, alors que le ménage non-ricardien augmente relativement plus sa consommation d'électricité et d'énergie non-électrique par rapport à la structure d'information parfaite. Ces écarts sont relativement plus importants dans Ampère bas.

2.2. Effets sur le processus de production de l'entreprise

2.2.1. *Dans le modèle, l'effet de l'évolution du prix des énergies sur l'échelle de la production est relativement plus important lorsque l'entreprise n'anticipe pas l'évolution du prix des énergies*

Contrairement à la structure d'information parfaite, la dynamique de la production en unité de travail efficace est très proche de la dynamique du facteur « énergie efficace » (cf. **Figure 31** *infra*). La production varie dans le même sens que le facteur de production énergétique. Quelle que soit la date, l'entreprise va être surprise par l'évolution des variables énergétiques et considérera cette évolution comme permanente. À chaque date, les agents économiques considèrent être dans un nouvel état stationnaire. Si bien que l'entreprise ne peut se prémunir à l'avance de l'évolution défavorable (ou favorable) du prix des énergies en modifiant ses conditions de production. C'est-à-dire qu'elle va être relativement plus sensible aux mouvements du coût marginal de production qui sont dus à l'évolution non-anticipée du prix des énergies. *Les choix de l'entreprise se font au rythme de l'évolution surprise du prix des énergies à chaque date.* Tandis que dans la structure à information parfaite, l'entreprise connaît exactement l'évolution (transitoire) du prix des énergies jusqu'en 2035 et prendra des décisions sur la base de cette information en étalant les effets dans le temps.

2.2.2. *Dans le modèle, l'évolution non-anticipée du prix des énergies a un effet relativement moins dépressif sur l'entreprise qu'une évolution anticipée et ce, surtout lorsque l'évolution du prix des énergies est à la baisse*

Dans les trois versions, la production diminue relativement moins par rapport à la structure à information parfaite (cf. **Tableau 32** *infra*). Dans le scénario Ampère bas, l'output augmente de 0,004% en moyenne par an lorsque l'évolution du prix des énergies est non anticipée par l'entreprise, alors qu'il diminue de 0,027% lorsque l'évolution est anticipée. Et dans le scénario Ampère haut et baseline, l'output diminue relativement moins sur l'horizon temporel par rapport à la structure d'information parfaite. La demande adressée à l'entreprise est relativement plus élevée grâce à l'achat de biens durables et à la diminution relativement plus faible de l'investissement en capital physique dans la structure d'information imparfaite (cf. **Tableau 32** *infra*). Dans la structure d'information parfaite, l'entreprise sait que le prix des énergies augmente fortement dans le temps. En conséquence, l'entreprise diminue plus fortement sa production et sa demande de facteurs de production conditionnellement à cette information. Alors que dans la structure d'information

imparfaite, l'entreprise pense que l'évolution surprise du prix des énergies en date t ne se répétera pas dans le futur. En conséquence, elle va relativement moins diminuer sa production.

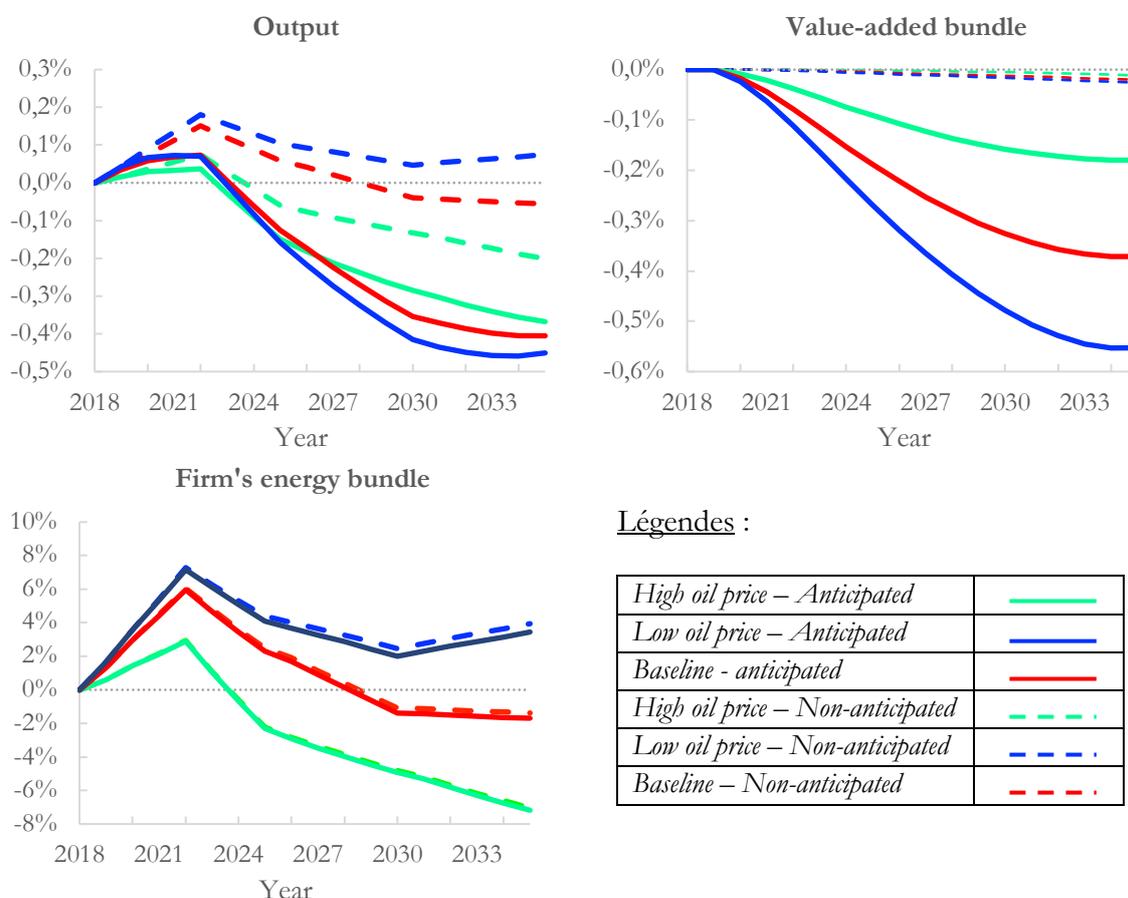


Figure 35 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

	Version	Output	Non-durable	Durable	Capital	Exports
Information parfaite	Haut	-0,022%	0,047%	-0,062%	-0,021%	0,087%
	Baseline	-0,024%	0,099%	-0,143%	-0,031%	0,069%
	Bas	-0,027%	0,137%	-0,231%	-0,042%	0,053%
Information imparfaite	Haut	-0,012%	0,053%	0,033%	-0,008%	0,096%
	Baseline	-0,003%	0,104%	0,168%	-0,009%	0,084%
	Bas	0,004%	0,139%	0,285%	-0,011%	0,073%

Tableau 32 Taux de croissance annuel moyen des variables sélectionnées - Ampère

2.2.3. Dans le modèle, l'effet de l'évolution du prix des énergies de l'entreprise (TTC) sur le salaire réel est relativement moins dépressif

L'augmentation du prix des énergies de l'entreprise (TTC) dans Ampère haut augmente les coûts de production de l'entreprise, et donc diminue le salaire réel (cf. **Figure 36 infra**). En effet, l'entreprise ne peut pas ajuster son prix de vente dans le modèle. Donc, l'entreprise ajuste sa demande de facteurs de production et son offre. Or, l'offre et la demande de travail sont fixes dans

le modèle, donc le salaire nominal fait l'ajustement. Au contraire, dans Ampère bas, le salaire réel augmente dans sur le long terme grâce à une production plus importante sur le long terme. Dans les deux versions, le salaire réel s'ajuste relativement moins à la baisse par rapport à la structure d'information parfaite car l'entreprise ajuste relativement moins ses décisions de production.

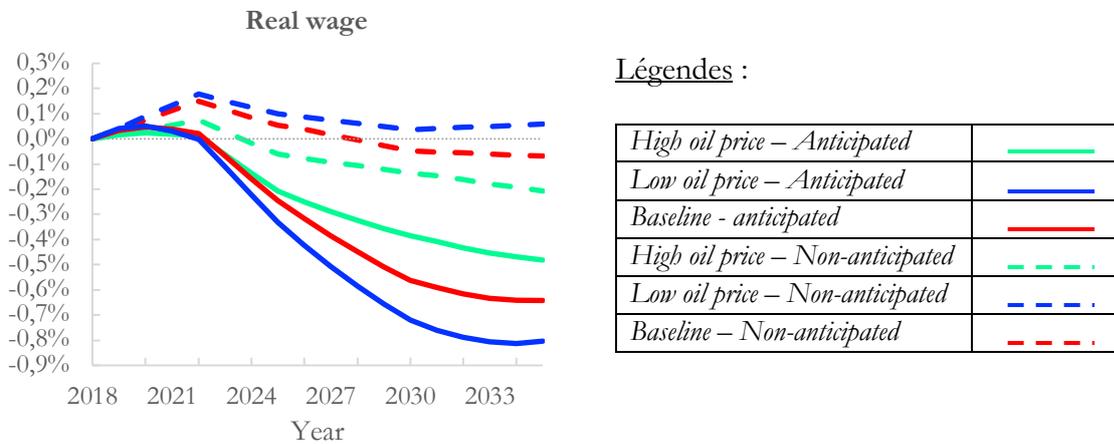


Figure 36 Réponse dynamique en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

2.3. Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages

2.3.1. *Contrairement à la structure d'information parfaite, le ménage ricardien ne va pas se prémunir contre l'évolution du prix des énergies et va préférer augmenter son investissement de biens durables en défaveur de son investissement en capital*

On rappelle que, par définition, un ménage ricardien ne fait pas face à des contraintes de liquidités affectant son comportement de consommation, contrairement au ménage non-ricardien.

Les décisions du ménage ricardien en matière de consommation et d'investissement diffèrent sensiblement selon la structure d'information. Alors que dans la structure d'information parfaite le ménage ricardien augmente son investissement en capital en défaveur des biens durables sur le long terme, dans la structure d'information imparfaite il diminue son investissement en capital en faveur de son investissement en biens durables (cf. **Figure 37** infra).

Une des raisons est que, dans la structure à information parfaite, le ménage étale sur tout l'horizon temporel les effets de l'évolution des variables énergétiques dans le temps et se prémunit à l'avance contre l'évolution future de chocs adverses. Par exemple, il sait que le prix de l'énergie non-électrique augmente sur le long terme. Alors, sachant cela, il va durablement baisser son investissement en biens durables sur le long terme, malgré une efficacité énergétique accrue. Le ménage ricardien préfère investir en biens de capital plutôt qu'en biens de durables. En revanche, dans la structure d'information imparfaite, les deux types de ménages, ne connaissent pas la tendance croissante du prix de l'énergie non-électrique. Les ménages ne savent pas que le coût

unitaire de production des services énergétiques à partir des biens durables sera de plus en plus élevé à mesure que le temps passe. Les ménages vont prendre des décisions en pensant que, dans le futur, la tendance sera nulle. Par conséquent, les ménages ne vont pas diminuer leur stock de biens durables en réponse à l'évolution du prix des énergies et vont plus réagir au stimulus fourni par le gouvernement. D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle ils consomment relativement plus d'énergie dans le temps par rapport à la structure d'information parfaite (cf. **Figure 37** *infra*). Sur le long terme, dans Ampère bas et Ampère baseline, l'effet revenu renforce l'effet substitution entre le stock de biens durables et l'utilisation de l'énergie efficace, et dans Ampère haut l'effet revenu prend le dessus de l'effet substitution entre le stock de biens durables et l'utilisation de l'énergie efficace. En effet, malgré la complémentarité imparfaite entre les biens durables et l'énergie efficace, le stock de biens durables augmente lorsque l'utilisation de l'énergie efficace diminue sur le long terme.

Une autre raison est que le stimulus fourni par le mécanisme de redistribution du gouvernement vers les ménages est plus important (cf. sous-section 2.4 *infra*). La redistribution est relativement plus élevée dans la structure d'information imparfaite que dans la structure d'information parfaite grâce à des recettes fiscales plus élevées. Donc, les ménages ont plus d'argent à dépenser dans la structure d'information imparfaite et vont donc moins désépargner dans le temps.

2.3.2. Par rapport à la structure d'information parfaite, l'investissement du ménage ricardien réagit relativement moins à l'arrivée de nouvelles informations sur l'état de l'économie si bien que les stocks de biens durables et de capital s'ajustent à un taux moins élevé

Dans la structure d'information imparfaite, la fluctuation de l'investissement en capital et de l'investissement en biens durables du ménage ricardien est relativement plus faible. De fait, à l'horizon 2035, l'investissement en capital et l'investissement en biens durables sont à un niveau relativement plus élevé dans la structure à information imparfaite par rapport à la structure d'information parfaite. Le stock de capital diminue relativement moins et le stock de biens durables augmente relativement plus par rapport à la structure d'information parfaite. La raison derrière ce résultat est que les coûts d'usages réagissent relativement moins dans la structure d'information imparfaite (cf. **Figure 38** *infra*). Ces « prix » vont capitaliser les nouvelles informations sur le futur. Or, le ménage possède plus d'information sur le futur dans la structure d'information parfaite que dans la structure d'information imparfaite. Il est donc normal que le coût d'usage réagisse relativement plus dans la structure d'information parfaite car il capitalise plus d'information.

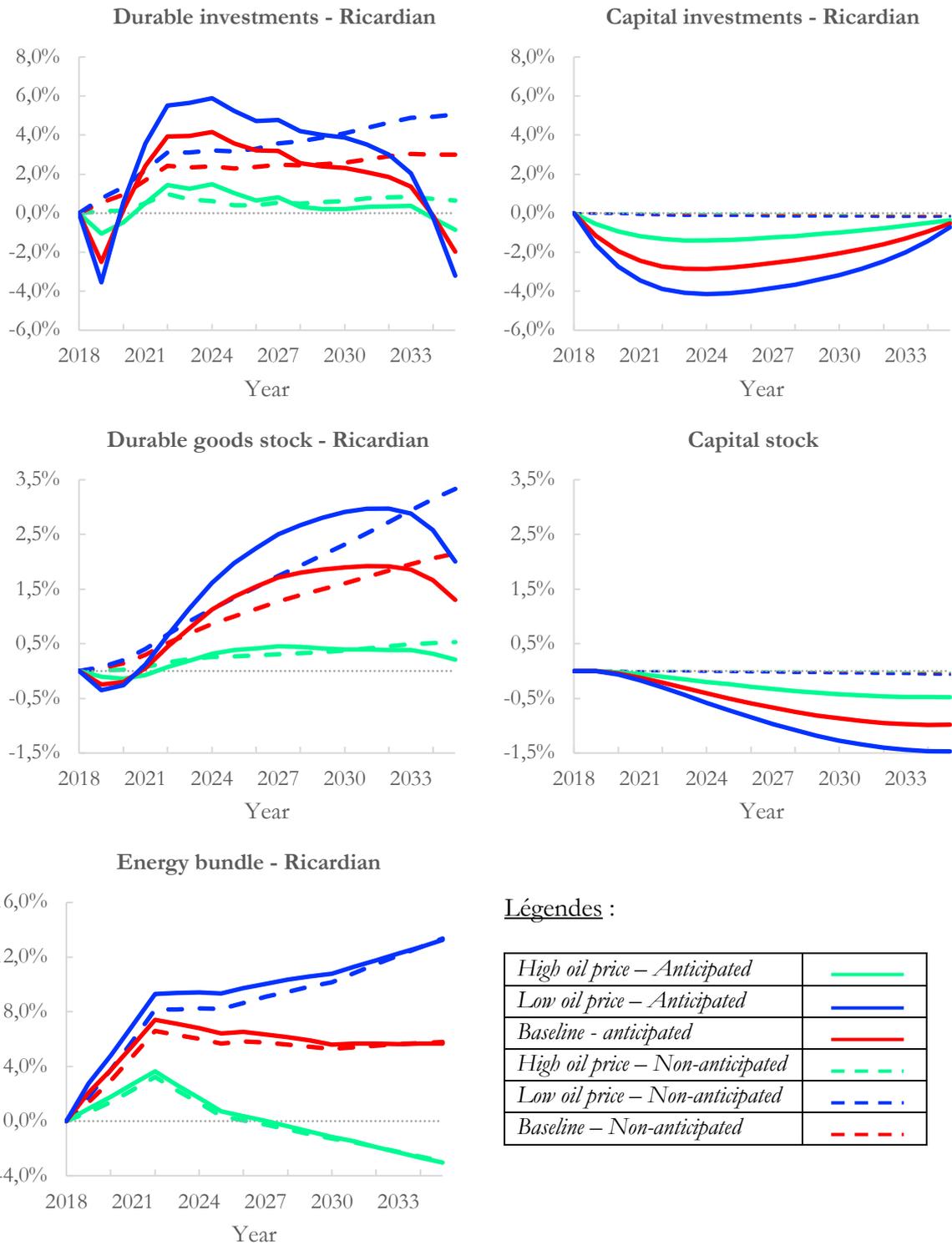


Figure 37 Réponse dynamique en unité de travail efficace par rapport à 2018 – *Ampère*

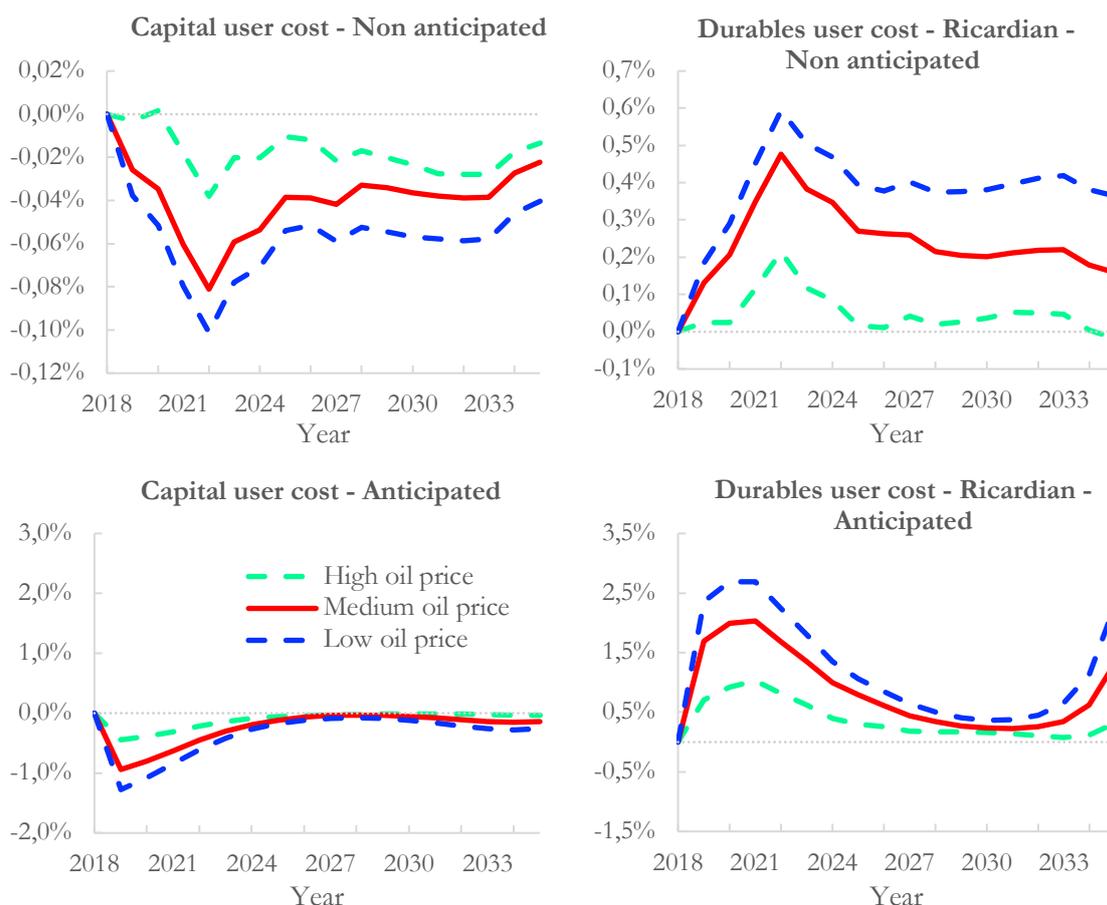


Figure 38 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère.

Dans la structure d'information parfaite, le coût d'usage des biens durables du ménage ricardien rebique en fin de période pour rééquilibrer le portefeuille d'actifs. Sur le long terme, le coût d'usage du capital diminue. Cela envoie un signal au ménage ricardien qu'il faut augmenter le stock de capital. Pour rééquilibrer le portefeuille d'actifs en faveur du capital, le ménage ricardien doit donc ajuster (fortement) son investissement en biens durables pour pouvoir plus investir en capital. L'ajustement est relativement plus fort du côté des biens durables car ils représentent une part relativement plus faible du portefeuille d'actifs que le capital physique. Donc, les variations du coût d'usage du capital se transmettent, une période plus tard, dans les variations du coût d'usage des biens durables qui rebique fortement en sur le long terme pour ajuster à la baisse le stock de biens durables et ajuster à la hausse le stock de capital physique de l'économie (hors système électrique).

2.3.3. *Dans la structure d'information imparfaite, pour le ménage non-ricardien, en plus d'un mécanisme de redistribution relativement plus important, l'effet substitution augmente le stock de biens durables du ménage non-ricardien lorsque le prix des énergies est relativement plus faible*

Contrairement à la structure d'information parfaite, l'effet revenu renforce l'effet substitution pour le ménage non-ricardien dans les trois versions. La dynamique de l'investissement en biens durables suit celle de l'énergie efficace (cf. **Figure 39** infra). Dans Ampère bas et Ampère baseline, l'investissement en biens durables et la consommation d'énergie du ménage non-ricardien

augmentent sur le long terme par rapport à 2018. Alors, le stock de biens durables augmente sur le long terme. Dans Ampère haut, à l'horizon 2035, l'investissement en biens durables et la consommation d'énergie diminuent. Le stock de biens durables diminue légèrement sur le long terme, mais augmente par rapport à 2018 à l'horizon 2035 grâce à l'augmentation de l'investissement des biens durables sur le court-moyen terme. Par ailleurs, les écarts en matière de dynamique entre les deux structures d'information sont les mêmes pour l'énergie efficace et le stock de biens durables du ménage non-ricardien. Sur tout l'horizon d'étude, le stock de biens durables est relativement plus élevé dans la structure d'information imparfaite, et donc l'utilisation de l'énergie efficace l'est aussi (cf. **Figure 39** infra).

Comme pour le ménage ricardien, le choc de revenu (positif) non-anticipé et permanent a un effet amplificateur sur les investissements en biens durables du ménage non-ricardien par rapport à la structure d'information parfaite.

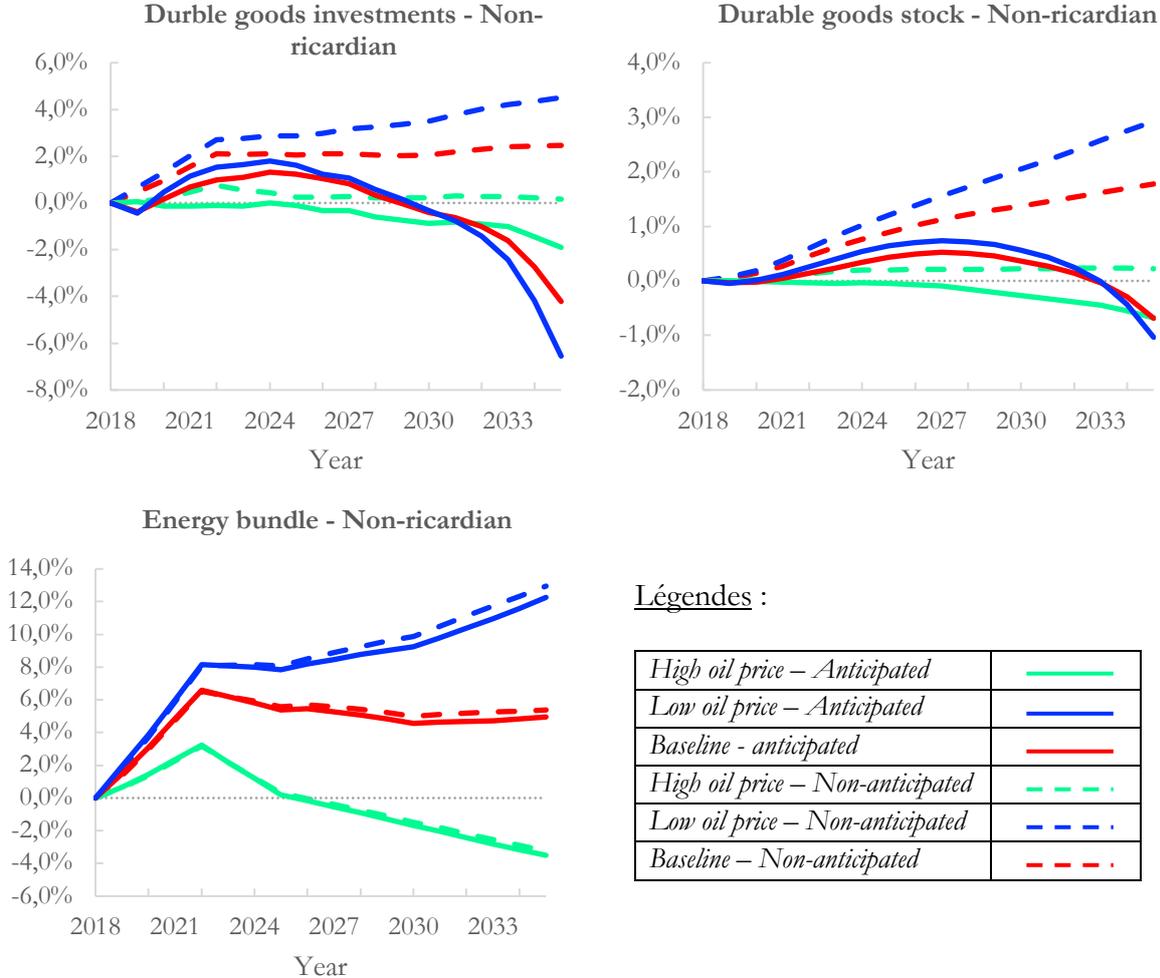


Figure 39 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

2.3.4. *Dans la structure d'information imparfaite, le bien-être non-environnemental des ménages est relativement plus élevé grâce à une consommation relativement plus forte de services énergétiques et de biens non-durables dans le temps*

Pour les deux types de ménages, les services énergétiques et la consommation de biens non-durables augmentent relativement plus dans le temps dans Ampère bas et Ampère baseline par rapport à la structure d'information parfaite (cf. **Figure 40** *infra*). Tandis que, dans Ampère haut, la production de services énergétiques est tirée vers le bas, malgré une efficacité énergétique accrue, et la consommation de biens non-durables est tirée vers le haut. L'intensité de ces réponses est relativement plus forte pour le ménage non-ricardien. L'augmentation relativement plus élevée du stock de biens durables n'affecte pas sensiblement la consommation d'énergie des ménages grâce aux efforts d'efficacité énergétique sur le long terme.

Tout cela indique que l'augmentation relativement plus élevée du mécanisme de redistribution (cf. **Figure 41** *infra*) a un effet relativement plus bénéfique sur les dépenses de consommation du ménage non-ricardien. Sur le long terme, en plus de l'effet sensible sur les dépenses en biens non-durables du ménage non-ricardien du choc de revenu, le choc sur le prix des énergies déclenche l'effet prix suivant : l'effet revenu d'une diminution du coût unitaire de production des services énergétiques domine l'effet substitution dans Ampère bas et baseline, et l'effet substitution domine l'effet revenu dans Ampère haut.

La réponse des biens de consommation dans leur ensemble est plus forte sur le long terme dans la structure d'information imparfaite. En revanche, sur le court-moyen terme, les variations sont plus fortes dans le cas où les chocs sont anticipés par les agents. Wohltmann et Winkler (2008) montrent que l'économie réagit plus à des chocs de prix du baril anticipés plutôt qu'à des chocs de prix du baril non-anticipés. Cette discussion est poursuivie dans le chapitre discussion qui suit.

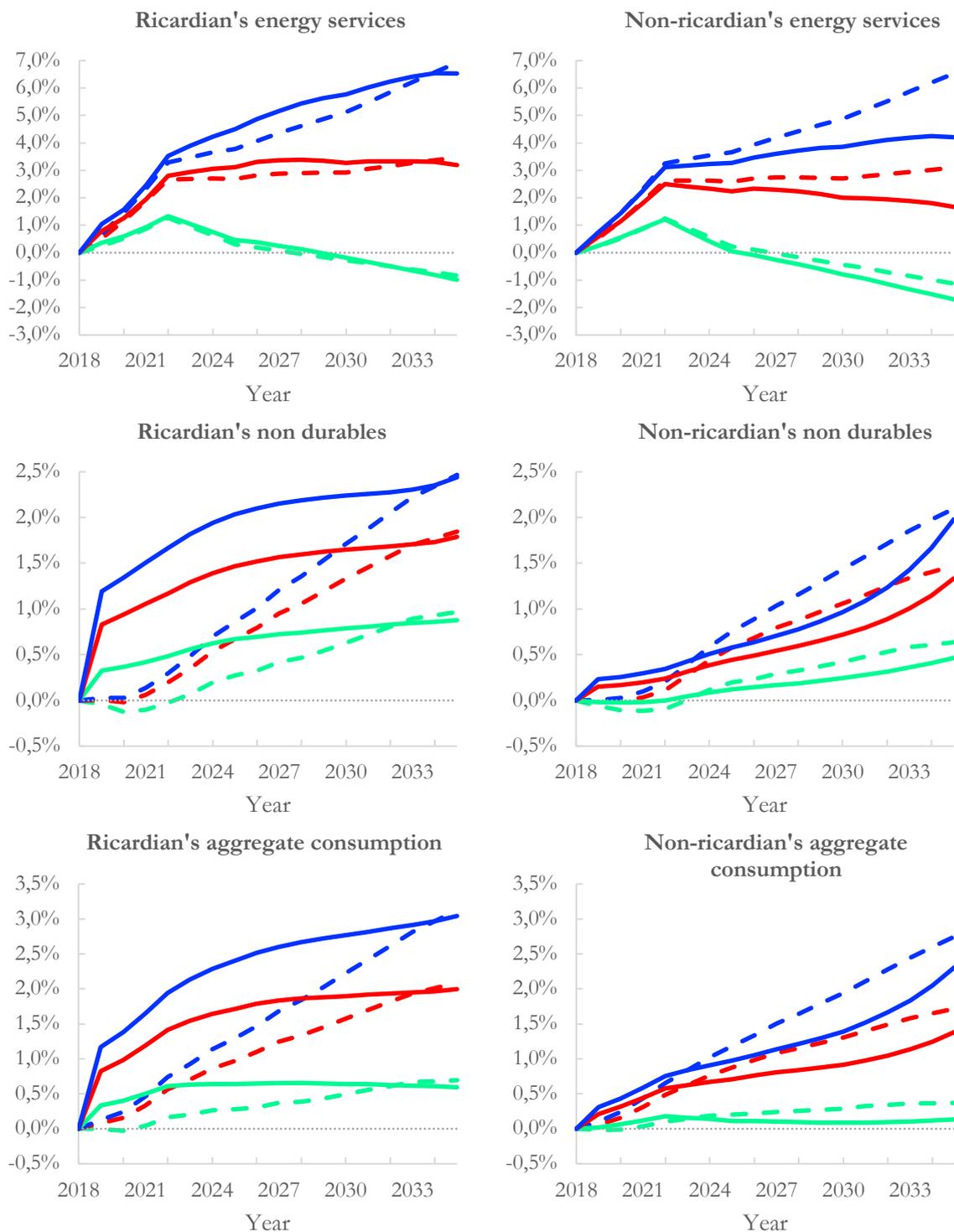


Figure 40 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

Légendes :

<i>High oil price – Anticipated</i>	
<i>Low oil price – Anticipated</i>	
<i>Baseline - anticipated</i>	
<i>High oil price – Non-anticipated</i>	
<i>Low oil price – Non-anticipated</i>	
<i>Baseline – Non-anticipated</i>	

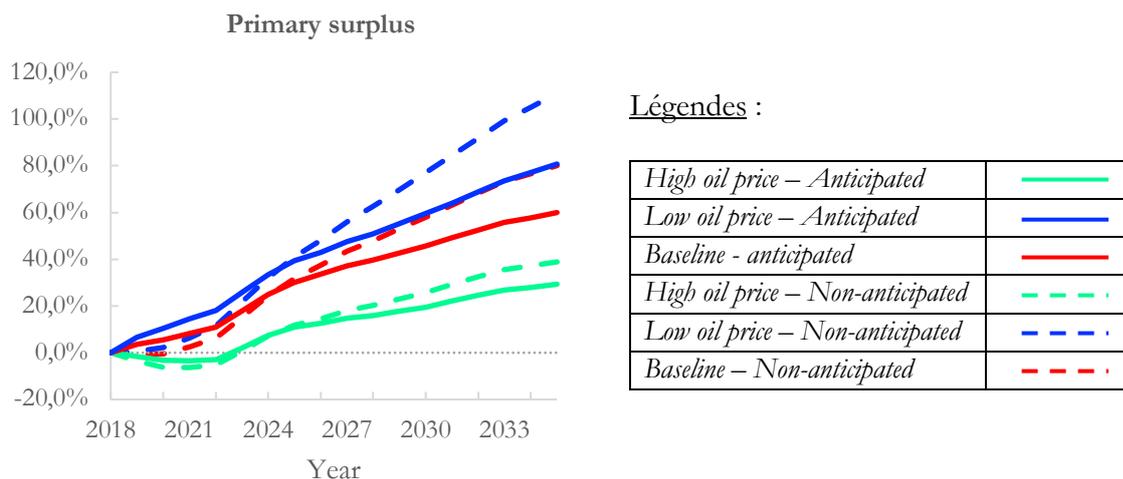


Figure 41 Réponses dynamiques en unité de travail efficace par rapport à 2018 – Ampère

2.3.5. *Dans la structure d'information imparfaite, la demande pour les biens de consommation est davantage lissée dans le temps*

La demande en biens non-durables est relativement plus lissée dans le temps pour les deux types de ménages par rapport à la structure d'information parfaite (cf. **Figure 40** supra) et ce, surtout pour le ménage ricardien qui ne sur-réagit pas sur le court terme. En conséquence, la consommation agrégée des ménages est d'apparence plus lisse dans la structure d'information imparfaite. Les niveaux sur le long terme sont aussi comparables. Le ménage non-ricardien avait déjà une consommation relativement lisse dans la structure d'information parfaite grâce au mécanisme de redistribution qui lui permet d'étaler l'effet des chocs dans le temps. Et, dans une moindre mesure, la possession d'actifs durables lui permet aussi de lisser sa consommation grâce à la vente dans le futur de ces actifs.

2.3.6. *Dans la structure d'information imparfaite, le ménage non-ricardien gagne plus que le ménage ricardien en matière de bien-être non-environnemental s'il n'anticipe pas l'évolution des variables énergétiques dans le temps*

Comme dans la structure d'information parfaite, le bien-être non-environnemental¹³⁸ des ménages augmente quelle que soit l'évolution choisie du prix des énergies (cf. **Tableau 33** infra). Dans Ampère bas, à l'horizon 2035, le ménage ricardien augmente son bien-être de 0,0088% par rapport à 2018, et le ménage non-ricardien augmente son bien-être de 0,0082% par rapport à 2018. Et, dans Ampère haut, le ménage ricardien augmente son bien-être de 0,0020% par rapport à 2018 et le ménage non-ricardien augmente son bien-être 0,0012% par rapport à 2018.

¹³⁸ Le gain de bien-être est mesuré, dans le **Tableau 33**, en comparant l'équivalent en consommation d'état stationnaire (*steady-state consumption equivalent*) de l'utilité du ménage entre deux dates. L'équivalent en consommation d'état stationnaire en t correspond au pourcentage de la consommation d'état stationnaire (le niveau de la consommation en 2018) nécessaire pour atteindre le niveau d'utilité en t.

Malgré une augmentation du bien-être sur le long terme pour les deux types de ménage, le ménage ricardien gagne relativement plus en bien-être que le ménage non-ricardien grâce à son portefeuille d'actifs. En revanche, les écarts de bien-être entre les deux ménages sont beaucoup plus faibles lorsque les ménages n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques exogènes du modèle (*cf. Tableau 33 infra*). Par exemple, dans Ampère bas, si les ménages n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques exogènes, le ménage ricardien gagne 0,0006 points de pourcentage de plus en bien-être que le ménage non-ricardien. Alors que si les ménages anticipent l'évolution des variables énergétiques exogènes, le ménage ricardien gagne 0,0016 points de pourcentage de plus en bien-être que le ménage non-ricardien. Par conséquent, le caractère régressif de la fiscalité environnementale est considérablement affaibli lorsque les ménages n'anticipent pas l'évolution de cette dernière.

		Haut	Baseline	Bas
Structure d'information imparfaite	<i>Ricardien</i>	0,0020%	0,0059%	0,0088%
	<i>Non-ricardien</i>	0,0012%	0,0052%	0,0082%
Structure d'information parfaite	<i>Ricardien</i>	0,0017%	0,0056%	0,0085%
	<i>Non-ricardien</i>	0,0004%	0,0042%	0,0069%

Tableau 33 Gains de bien-être des ménages en 2035 par rapport à 2018 selon la structure d'information – Ampère

2.4. Effets agrégés sur les finances publiques

Les dynamiques des recettes fiscales sont très proches dans les deux structures d'information. Au total, les recettes fiscales de l'État sont relativement plus élevées dans le cas où les agents n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques dans le temps (*cf. Tableau 34 infra*). Par rapport à la structure d'information parfaite, la structure d'information imparfaite ajoute aux recettes fiscales 0.012 p.p./an dans Ampère haut, 0.025 p.p./an dans Ampère baseline et 0.037 p.p./an dans Ampère bas. Ce résultat est porté par des recettes fiscales TVA plus importantes grâce à une consommation en biens durables et à une consommation en biens non-durables plus fortes. À l'horizon 2035, dans Ampère bas, les recettes fiscales de la TVA augmentent de 2,38% par rapport à 2018 dans la structure d'information imparfaite, alors que dans la structure d'information parfaite elles n'augmentent que de 1,20% par rapport à 2018.

Ceci a pour conséquence un surplus primaire plus élevé et une redistribution plus forte vers les ménages. Le surplus primaire s'établit, en 2035, à 1,54% de l'offre agrégée dans Ampère haut, 2,00% dans Ampère baseline et 2,33% dans Ampère bas. En taux de croissance annuel moyen, par rapport à la structure d'information parfaite, le surplus primaire dans la structure d'information imparfaite ajoute 0,43 p.p./an dans Ampère haut, 0,72 p.p./an dans Ampère baseline et 0,95 p.p./an dans Ampère bas.

Recettes fiscales	Scénario	2025	2030	2035
Électricité	Variante haute	-9,00%	-12,93%	-16,55%
	Baseline	-9,31%	-17,80%	-20,60%
	Variante basse	-9,73%	-18,16%	-21,08%
Énergie non-électrique	Variante haute	10,90%	23,84%	33,40%
	Baseline	19,87%	38,37%	53,08%
	Variante basse	24,16%	47,62%	68,62%
TVA	Variante haute	0,25%	0,57%	0,86%
	Baseline	0,70%	1,28%	1,74%
	Variante basse	0,91%	1,68%	2,38%
Capital/Dividendes	Variante haute	0,19%	0,49%	0,76%
	Baseline	0,27%	0,77%	1,03%
	Variante basse	0,33%	0,86%	1,17%

Tableau 34 Évolution des recettes fiscales par unité de travail efficace par rapport à 2018 - Ampère

2.5. Les effets sur la croissance sont plus favorables quand les agents n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques

Par rapport à la structure d'information parfaite, l'offre agrégée réagit positivement dans Ampère bas et Ampère baseline (cf. **Figure 42** *infra*), et elle diminue relativement moins dans Ampère haut. En taux de croissance annuel moyen, cela se traduit par une perte de 0.012 p.p. par an dans Ampère haut, un gain de 0.0017 p.p. par an dans Ampère baseline et un gain de 0.010 p.p. par an dans Ampère bas.

Les différences entre les deux structures d'information sur le taux de croissance sont en partie portées par, du côté de la demande agrégée, l'investissement en capital et l'investissement en biens durables des ménages (cf. **Tableau 35** *infra*), et du côté de l'offre agrégée, les revenus de marché du système électrique. Dans Ampère baseline, la diminution de l'output en unité de travail efficace est inversée grâce à l'augmentation des revenus de marché du système électrique en unité de travail efficace sur le long terme.

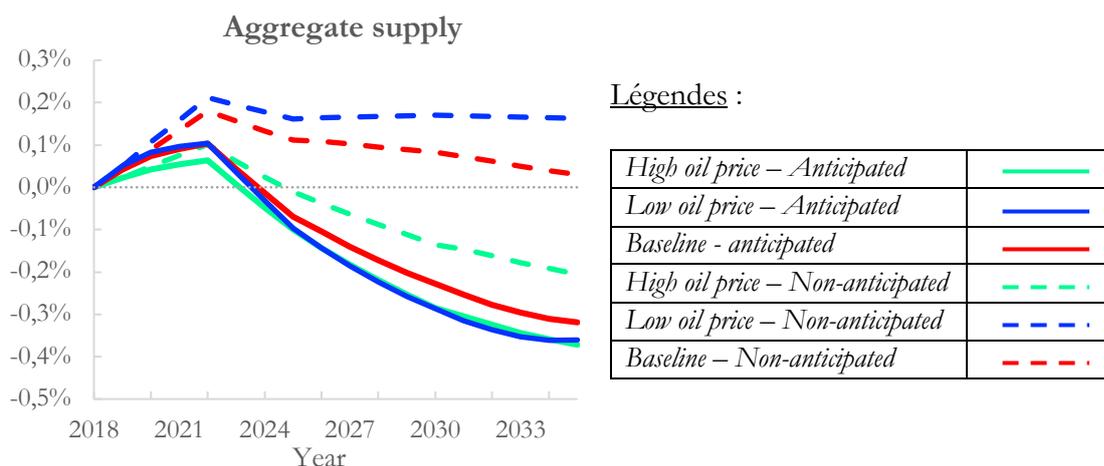


Figure 42 Réponse dynamique de l'offre agrégée par rapport à 2018 – Ampère

	DEMANDE AGRÉGÉE					
	Non-durables	Inv. durables	Inv. capital	Électricité au prix de détail hors taxes	Coûts annualisés du système électrique	Importations énergie non-électrique
Haut	+0,006	+0,095	+0,013	+0,009	-	+0,009
Baseline	+0,005	+0,311	+0,022	+0,016	+0,002	+0,015
Bas	+0,002	+0,516	+0,031	+0,024	+0,004	+0,020

	OFFRE AGRÉGÉE	
	Output	Revenus de marché de gros de l'électricité
Haut	+0,01	+0,006
Baseline	+0,021	+0,012
Bas	+0,031	+0,018

Tableau 35 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de la structure d'information imparfaite et le taux de croissance annuel moyen de la structure d'information parfaite - Ampère

Les conditions pour une décarbonation de l'économie et un taux de croissance en unité de travail efficace positif sont donc réunis dans Ampère baseline grâce au gain de croissance et à la diminution de la consommation d'énergie carboné dans le temps (cf. **Figure 43** *infra*). On peut considérer qu'elles le sont aussi dans Ampère haut tant la perte de croissance est faible.

Néanmoins, dans les trois versions, l'économie est légèrement plus carbonée dans la structure d'information imparfaite que dans la structure d'information parfaite car les agents de l'économie y ajustent relativement moins leurs comportements (cf. **Tableau 28** *supra*). Par exemple, le taux de croissance annuel moyen des importations en énergie non-électrique dans Ampère bas de la structure d'information imparfaite est 0,020 p.p. plus élevé que celui de la structure d'information parfaite (cf. **Tableau 35** *supra*).

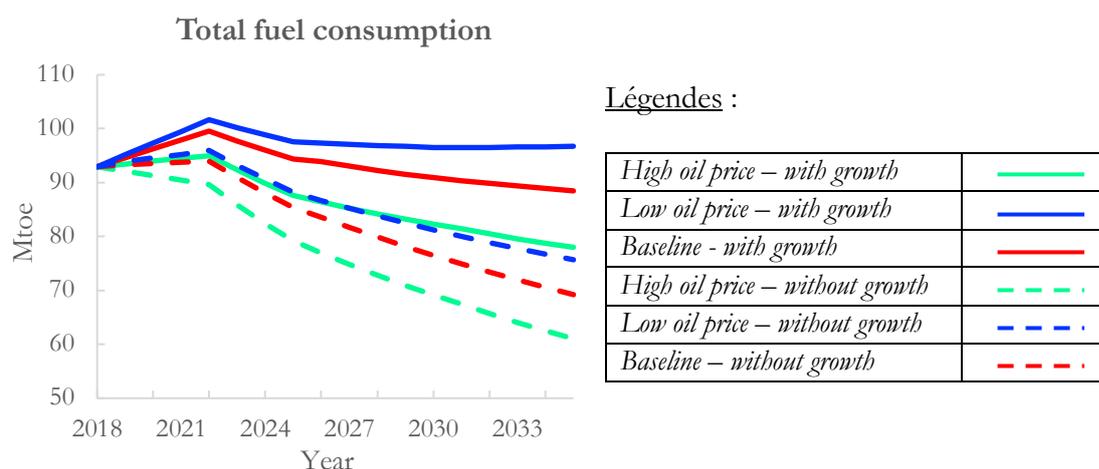


Figure 43 Évolution de la consommation de gaz et de pétrole de l'économie, y.c. effet croissance, dans la structure d'information imparfaite – Ampère

2.6. Dans la structure d'information imparfaite, la décarbonation de l'économie et l'effet sur la croissance sont meilleurs pour le scénario Volt

Comme la structure d'information parfaite, par rapport à Ampère, le scénario Volt permet de décarboner davantage l'économie (*cf. Tableau 37 et Tableau 36 infra*). Les différences d'évolution de la consommation d'énergie non-électrique entre les scénarios Ampère et Volt sont dues aux différences dans le prix de gros de l'électricité, les investissements dans le système électriques, les subventions aux filières électriques subventionnées, les revenus de marché et les efforts d'efficacité énergétique dans le modèle de croissance dynamique (*cf. Tableau 36 infra*). Malgré des coûts annualisés dans le système électrique et des revenus de marchés plus élevés, la consommation de biens non-durables augmente au détriment de l'investissement en biens durables et de l'investissement en capital physique. La cause en est attribuée à un prix de gros de l'électricité relativement plus élevé et une efficacité électrique relativement plus élevée sur le long terme entre les deux scénarios. Donc, les agents de l'économie consomment moins d'énergie. Cela se traduit, pour l'entreprise, par une demande en capital relativement plus faible sur le long terme, et pour le ménage par une diminution de la production de services énergétiques à partir de l'utilisation conjointe des biens durables et de l'énergie efficace, et donc une augmentation de la consommation de biens non-durables.

	Haut	Baseline	Bas
Subventions aux filières électriques subventionnées	-1,037	-1,581	-1,554
Revenus de marché du système électrique	0,367	0,569	0,559
Coûts annualisés du système électrique	-0,596	-0,559	-0,552
Prix de gros de l'électricité <i>hors taxes</i>	0,003	0,004	0,004
Efficacité électrique des ménages	0,315	0,315	0,315
Efficacité électrique de l'entreprise	-0,072	-0,072	-0,072

Tableau 36 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage

Contrairement à la structure d'information parfaite, le scénario Volt améliore le PIB en unité de travail efficace sur le long terme par rapport à Ampère. Volt bas ajoute 0,003 points de pourcentage au taux de croissance de l'économie (*cf. Tableau 37 infra*) par rapport à Ampère bas grâce notamment à des revenus de marché du système électrique relativement plus élevés. Alors que dans la structure d'information parfaite, la croissance de l'économie était relativement plus faible dans le scénario Volt que dans le scénario Ampère. En unité de travail efficace, les investissements en biens durables sont relativement plus élevés dans Volt par rapport à Ampère dans la structure d'information parfaite et les investissements en capital physique sont relativement plus faibles dans Volt par rapport à Ampère dans la structure d'information parfaite.

	Haut	Baseline	Bas
Consommation totale d'électricité	-0,104	-0,156	-0,153
Consommation totale d'énergie non-électrique	-0,038	-0,040	-0,041
Investissements en biens durables du ménage ricardien	0,034	0,037	0,035
Investissements en biens durables du ménage non-ricardien	0,018	0,019	0,018
Consommation en biens non-durables du ménage ricardien	0,014	0,017	0,016
Consommation en biens non-durables du ménage non-ricardien	0,005	0,007	0,006
Stock de capital physique de l'économie (hors système électrique)	-0,001	-0,001	-0,001
Output	-0,003	-0,004	-0,004
Surplus primaire	0,279	0,281	0,234
Stock de biens durables du ménage ricardien	0,016	0,017	0,017
Stock de biens durables du ménage non-ricardien	0,009	0,008	0,008
Investissement en capital physique de l'économie (hors système électrique)	-0,004	-0,004	-0,004
Offre agrégée	0,001	0,003	0,003
Recettes fiscales de la TVA	0,012	0,015	0,015
Recettes fiscales de l'électricité	-0,098	-0,150	-0,147
Recettes fiscales de l'énergie non-électrique	-0,034	-0,032	-0,032
Recettes fiscales des revenus du capital	0,018	0,021	0,021
Subventions publiques aux filières électriques subventionnées	-1,037	-1,581	-1,554
Revenus de marché du système électrique	0,367	0,569	0,559
Coûts totaux annualisés du système électrique	-0,596	-0,559	-0,552

Tableau 37 Écart entre le taux de croissance annuel moyen de Volt et le taux de croissance annuel moyen de Ampère en points de pourcentage

Enfin, comme dans la structure d'information parfaite, le caractère régressif de la politique fiscale environnementale est plus prononcé dans le scénario Volt que dans le scénario Ampère. En effet, les écarts de gain de bien-être entre les deux ménages sont plus importants dans le scénario Volt (*cf. Tableau 38 infra*).

		Haut	Baseline	Bas
Ampère	<i>Ricardien</i>	0,0020%	0,0059%	0,0088%
	<i>Non-ricardien</i>	0,0012%	0,0052%	0,0082%
	<i>Écart en p.p.</i>	0,0008	0,0007	0,0006
Volt	<i>Ricardien</i>	0,0028%	0,0068%	0,0096%
	<i>Non-ricardien</i>	0,0015%	0,0056%	0,0086%
	<i>Écart en p.p.</i>	0,0013	0,0012	0,0010

Tableau 38 Gains de bien-être en 2035 par rapport à 2018

En somme, les agents de l'économie réagissent relativement plus dans le scénario Volt que dans le scénario Ampère. Les effets dépressifs sur le PIB en unité de travail efficace dans la structure d'information parfaite sont plus prononcés pour le scénario Volt à cause de l'effet du prix de l'électricité et de l'efficacité électrique sur l'investissement en biens durables et l'investissement en capital physique. Et, les effets expansionnistes sur le PIB en unité de travail efficace dans la structure d'information imparfaite sont plus prononcés pour le scénario Volt grâce à l'effet du prix de l'électricité et de l'efficacité électrique sur l'investissement en biens durables et l'investissement en capital physique.

CHAPITRE 2. DISCUSSION

Ce dernier chapitre tire quelques enseignements de la Partie IV. Le choix de la structure d'information dans l'étude de l'effet des chocs de prix des énergies sur les dynamiques agrégées d'une économie (hors consommation d'énergie) est important. Néanmoins, il n'affecte pas sensiblement les dynamiques des comportements des agents en matière de consommation d'énergie. Seuls les niveaux de consommation d'énergie changent, quoique faiblement. Les effets d'annonce sur les dynamiques de l'économie, hors consommation d'énergie, sont en revanche sensibles. En particulier, les effets d'annonce sont plus bénéfiques à la décarbonation de l'économie, mais sont plus dépressifs sur le taux de croissance de l'économie. Enfin, la fiscalité environnementale a des effets moins régressifs quand les ménages n'anticipent pas son évolution dans le temps.

1. Les décisions de consommation d'énergie sont relativement peu altérées par les effets d'annonce

Quelle que soit la structure d'information, les dynamiques de consommation d'énergie non-électrique et d'électricité sont très proches. *Néanmoins, en niveau, si les agents n'anticipent pas l'évolution du prix des énergies (TTC) et l'évolution de l'efficacité énergétique, ils consomment relativement plus d'énergie sur le long terme.* Par conséquent, les effets d'annonce d'une augmentation de la taxe carbone ne sont pas significatifs sur l'évolution de la consommation d'énergie. Dans la littérature, Mertens et Ravn (2012) montrent que les effets d'anticipation d'une augmentation de la fiscalité ne sont pas significatifs sur la consommation des ménages. De même, Chan (2020) montre que le choix de la structure d'information dans l'étude d'un choc de taxe carbone n'a pas d'effet significatif sur la consommation d'énergie. Et, il conclut que les effets agrégés d'une augmentation de la taxe carbone sont moins dépressifs dans le cas où l'augmentation n'est pas anticipée, ce qui est le cas dans les résultats de la Partie IV de cette thèse.

En somme, si le gouvernement annonce une trajectoire claire de la fiscalité carbone dans le temps et qu'il existe une communication claire sur les efforts d'efficacité énergétique que fournissent les équipements ménagers et industriels dans le temps, les agents changeront leur comportement en faveur de la décarbonation de l'économie. Par ailleurs, les recommandations pour atteindre l'objectif du *facteur 6* à l'horizon 2050 de la Partie III tiennent aussi dans un environnement où les agents de l'économie n'anticipent pas l'évolution des variables exogènes énergétiques. D'autant plus que les agents de l'économie consomment relativement plus d'énergie non-électrique et l'effet

sur le bien-être collectif est meilleur lorsqu'ils n'anticipent pas l'évolution du prix des énergies (TTC) et l'évolution de l'efficacité énergétique.

2. Les effets d'annonce sur l'évolution du prix de détail des énergies ont une influence sensible sur les dynamiques agrégées de l'économie hors consommation d'énergie

Dans le modèle, les dynamiques des variables agrégées hors consommation d'énergie, sont différentes entre les deux structures d'information. Dans la structure d'information imparfaite, le ménage ricardien a une vision restreinte du futur : il ne connaît pas l'évolution des variables exogènes, et est surpris à chaque date par l'évolution des variables exogènes. Le ménage ricardien considère que, dans le futur, les chocs seront nuls en absolu. Par conséquent, il ne va à aucun moment penser à se prémunir, dans le passé, contre l'évolution future du prix des énergies (TTC) ou à effectuer des arbitrages de consommation d'énergie et de biens durables en fonction de l'évolution de l'efficacité énergétique. C'est pourquoi la dynamique entre les deux structures d'information est sensiblement différente. Ses choix vont refléter l'information qu'il détient à l'instant présent sur l'économie. Par conséquent, c'est encore le rôle joué par les arbitrages entre l'investissement en capital physique et l'investissement en biens durables qui va être central dans les différences entre les deux structures d'information. Ces résultats convergent avec la littérature existante sur le sujet.

Chan (2020) conclut que les effets d'une augmentation de la taxe carbone sur les agrégats sont moins dépressifs si l'augmentation n'est pas annoncée à l'avance, ce qui est le cas dans la thèse. En réponse à l'augmentation de la taxe carbone, comme chez Chan (2020), afin de minimiser les coûts d'ajustement de l'investissement en capital, dans la version d'information parfaite, les ménages désinvestissent significativement en capital physique dans la phase d'avant mise en œuvre de la taxe carbone parce qu'ils prévoient que l'évolution de la taxe carbone réduira la demande de capital de l'entreprise à long terme. La baisse de la demande en capital induit une baisse du prix du capital, ce qui, en fin de compte, fait grimper le coût d'utilisation des biens durables pendant la période de d'avant mise en œuvre. Après la période d'avant mise en œuvre, le ménage ricardien reprend son plan d'épargne et recommence à investir dans le capital physique au dépend de ses achats en ses biens durables. Ces compromis ont un impact négatif sur l'output à long terme. Alors que dans la version d'information imparfaite, en réponse à des chocs énergétiques non-anticipés, le ménage ricardien désinvestit relativement moins dans le capital physique et investit positivement dans des biens durables sur l'ensemble de la période d'étude. Cela a un impact positif sur l'output à long terme dans la version basse et médiane, et a un impact relativement moins négatif sur l'output à long terme dans la version haute par rapport à la structure d'information parfaite. En somme, les

annonces de politiques énergétiques et environnementales ont un impact plus négatif sur la dynamique globale.

Dans la littérature, Rapson (2014) montre, à partir d'un modèle en équilibre partiel de demande des climatiseurs, que les ménages sont *forward-looking* dans leur prise de décisions d'achat des biens durables, et que ces décisions sont affectées par l'évolution (anticipée) du coût énergétique unitaire et par l'évolution (anticipée) de l'efficacité énergétique sur le long terme. Dans le modèle de la thèse, les décisions d'investissement dans les biens durables sont affectées négativement lorsque les ménages anticipent l'évolution du coût énergétique unitaire sur le long terme. Alors qu'elles sont affectées positivement lorsque les ménages n'anticipent pas l'évolution du coût énergétique unitaire sur le long terme.

Par ailleurs, Mertens et Ravn (2012) montrent de façon convergente que l'économie, hors consommation des ménages, réagit différemment selon qu'un changement dans la fiscalité est anticipé ou pas. Surtout, ils argumentent que les effets d'annonce d'un changement dans la politique fiscale sur les agrégats macroéconomiques sont sensibles et que les dynamiques de l'économie, hors consommation d'énergie, vont réagir différemment sur la phase d'avant mise en œuvre de la fiscalité. Par exemple, une diminution pré-annoncée d'une taxe diminue l'output et l'investissement, et augmente le salaire, sur la phase d'avant mise en œuvre, et a au contraire des effets expansionnistes après la phase de mise en œuvre de la politique fiscale sur toutes les dynamiques de l'économie, y compris la consommation. La phase d'avant mise en œuvre de la politique fiscale permet au ménage optimisateur de se prémunir contre une hausse ou une baisse future anticipée de la fiscalité.

Marion et Svensson (1984) montrent que, lorsque l'évolution du prix des énergies est non-anticipée, il n'y a pas ou presque pas de changement dans l'investissement. Si bien que l'entreprise se retrouve avec un stock de capital plus élevé que dans la situation où il anticipe l'évolution du prix des énergies. L'entreprise trouve le moyen d'utiliser complètement son stock de capital, ce qui augmente sa production et son utilisation d'énergie sur le long terme. En revanche, l'investissement diminue relativement plus dans le cas où le choc de prix des énergies est anticipé, comme c'est le cas dans le modèle. Pindyck et Rotemberg (1984) montrent que les gains et/ou les pertes que subissent les grands agrégats sont relativement plus faibles quand les agents connaissent à l'avance l'évolution du prix des énergies.

3. Les effets d'annonce de la politique de recyclage de la taxe environnementale sont sensibles sur les dynamiques de l'économie hors consommation d'énergie

L'effet surprise sur la consommation de biens non-durables de l'évolution des transferts budgétaires dans la structure d'information imparfaite est important. En effet, la dynamique des

biens non-durables est différente dans les deux structures d'information, même si sur le long terme les niveaux sont comparables. Les résultats montrent que les ménages répondent aussi bien à des changements anticipés dans leur revenu réel que des changements non-anticipés contrairement à ce concluent les théories du revenu permanent et du cycle de vie¹³⁹. Dans la structure d'information parfaite, les ménages connaissent à l'avance l'évolution de leurs revenus futurs. Le ménage anticipe le changement de revenu et l'incorpore dans son plan de consommation optimal à la date où il prend connaissance du changement. Malgré l'augmentation transitoire (et anticipée) de leur revenu réel grâce au mécanisme de redistribution, les ménages augmentent leur consommation dans le temps. Dans la structure d'information imparfaite, l'évolution du revenu réel est permanente, c'est-à-dire que les ménages anticipent que leur revenu réel en $(t+1)$ est égal à l'augmentation de leur revenu en t . Il est donc normal que les ménages ajustent pleinement leurs dépenses de consommation au niveau relativement plus élevé de revenu réel.

Comme chez Parker (1999) et Souleles (2002), par rapport à la structure d'information imparfaite, la consommation du ménage ricardien réagit relativement plus sur la phase d'avant mise en œuvre de la politique fiscale. Il ne va pas chercher à étaler dans le temps les effets sur sa consommation des chocs de prix. Ce résultat est soutenu par la réponse du ménage ricardien et non-ricardien dans le cas où ils anticipent les chocs de prix. Il existe de forts effets d'annonce sur la consommation, si bien que les ménages vont relativement plus augmenter leur consommation sur le court terme en anticipation des chocs futurs. Ce résultat est souligné aussi par Blundell, Pistaferri et Preston (2008), Jappelli et Pistaferri (2010), et Agarwal et Qian (2014). Les auteurs concluent que les ménages réagissent aussi à des changements anticipés dans leur revenu sur le long terme, surtout en présence de contraintes de liquidité.

Les ménages non-ricardien n'ont pas accès aux marchés financiers, donc leur consommation réagit relativement plus à des changements présents dans les revenus, qu'ils soient temporaires ou permanents. En effet, les dépenses du ménage non-ricardien sont contraintes par leur revenu du travail en t . Dans le modèle, la consommation du ménage non-ricardien réagit relativement plus dans la structure d'information imparfaite, où son revenu actuel augmente relativement plus grâce à un mécanisme de redistribution relativement plus avantageux, que dans la structure d'information parfaite, où il connaît l'évolution de son revenu actuel et futur. Dans la structure d'information parfaite, même si le ménage non-ricardien sait à l'avance que ses revenus futurs augmentent, il

¹³⁹ La théorie montre que si une politique publique augmente de manière transitoire le revenu des ménages, cela ne va pas forcément résulter en une augmentation pérenne de leurs dépenses de consommation. La théorie conclut que les ménages n'augmenteront leur consommation que si le changement dans leur revenu est permanent.

augmente relativement moins ses dépenses de consommation que dans la structure d'information imparfaite.

4. Le ménage contraint par ses liquidités est relativement plus sensible sur le long terme aux effets d'annonce

Le ménage non-ricardien est sensible aux effets d'annonce. Son investissement en biens durables augmente dans le temps dans le cas où il n'anticipe pas l'évolution des variables exogènes et sa consommation en biens non-durables augmente relativement plus grâce à des transferts budgétaires relativement plus élevés. Alors que les décisions d'investissement dans les biens durables sont affectées négativement lorsque les ménages anticipent l'évolution du coût énergétique unitaire sur le long terme. Par conséquent, malgré l'augmentation (non-anticipée) graduelle du prix des énergies sur le long terme, le ménage non-ricardien augmente sa consommation de biens non-durables et son investissement en biens durables grâce à des transferts budgétaires relativement plus élevés. L'effet du choc (positif) de revenu sur la consommation du ménage non-ricardien prend le dessus sur l'effet du choc (négatif) du prix des énergies (TTC). Dans la littérature, Zeldes (1989a et 1989b) concluent que la réponse de la consommation à des chocs non anticipés de revenu est plus forte pour les ménages contraints par des liquidités, ce qui est vérifié dans les résultats du modèle.

Par ailleurs, la consommation d'énergie du ménage non-ricardien est relativement plus sensible aux effets d'annonce que le ménage ricardien. Alors que, sur le long terme, le ménage ricardien atteint un niveau de consommation d'énergie proche entre les deux structures d'information, le ménage non-ricardien atteint un niveau de consommation d'énergie différent entre les deux structures d'information. Les effets d'annonce dans la structure d'information parfaite ont un effet d'inflexion sur la consommation d'énergie relativement plus sensible sur le ménage non-ricardien que sur le ménage ricardien.

5. L'évolution non-anticipée de la fiscalité carbone et du recyclage limite le caractère régressif de la fiscalité environnementale par rapport à la structure d'information parfaite

L'évolution de la fiscalité carbone mise en place par le gouvernement génère un surplus de recettes dans les trois versions d'évolution du prix des énergies. Ce surplus de recettes est relativement plus élevé que dans la structure d'information imparfaite. C'est pourquoi la consommation agrégée des ménages augmente relativement plus dans la structure d'information imparfaite. Grâce au mécanisme de redistribution, les ménages gardent un niveau de consommation soutenu sur le long terme. Par ailleurs, lorsque le gouvernement n'annonce pas à l'avance la politique fiscale, le caractère régressif de la taxe environnementale est atténué dans la version basse de l'évolution du

prix des énergies. Au contraire, lorsque le gouvernement annonce à l'avance la politique fiscale, le caractère régressif de la taxe environnementale est atténué dans la version haute de l'évolution du prix des énergies.

Comme dans la structure d'information parfaite, le mécanisme permet donc de diminuer le caractère régressif de la taxe carbone sur la consommation des ménages. Néanmoins, les différences de gain de consommation et de bien-être, suite à la mise en place des transferts budgétaires, entre le ménage ricardien et le ménage non-ricardien sont moins élevées dans le cas où la politique fiscale n'est pas anticipée par les ménages. Ce résultat est intuitif car le ménage ricardien peut amortir à l'avance l'effet d'une augmentation du prix des énergies sur le long terme dans cas où il anticipe parfaitement l'évolution du prix des énergies. Alors que s'il n'anticipe pas l'évolution du prix des énergies sur le long terme, le ménage ne peut pas se prémunir contre des chocs adverses futurs, comme c'est le cas pour le ménage non-ricardien dans les deux structures d'information. Par conséquent, la politique fiscale est relativement moins régressive lorsque les ménages ne l'anticipent pas. Le résultat est observé dans le scénario Ampère comme dans le scénario Volt.

Les résultats en matière de redistribution de la taxe carbone et de la réévaluation de la fiscalité carbone sont à nuancer avec les croyances des ménages français sur ces instruments. Douenne et Fabre (*forthcoming*) montrent qu'une majorité des ménages français rejetteraient une politique de fiscalité carbone et de redistribution car ils ne sont pas conscients du caractère potentiellement progressif de la politique. Les ménages français auraient tendance à surestimer l'effet négatif d'une telle politique sur leur pouvoir d'achat.

6. Les effets d'annonce sont plus bénéfiques à la décarbonation de l'économie mais au détriment de la croissance économique

Sur le long terme, l'effet des chocs de prix des énergies quand ils ne sont pas anticipés est plus bénéfique à l'économie que lorsque les chocs sont anticipés. Les conclusions en matière de découplage croissance/émissions de la Partie III tiennent pour la Partie IV, d'autant plus que dans les versions bas et médiane le taux de croissance de l'économie augmente en unité de travail efficace. Grâce à une consommation et un investissement en capital physique relativement plus élevés dans Ampère/Volt bas et Ampère/Volt baseline, le PIB en unité de travail efficace augmente dans le temps. Dans Ampère/Volt haut, le PIB en unité de travail efficace diminue relativement moins si les agents de l'économie n'anticipent pas parfaitement l'évolution des variables énergétiques exogènes dans le temps. Par conséquent, contrairement à la structure d'information parfaite où l'évolution des variables énergétiques dans le temps est annoncée à l'avance, l'évolution de la fiscalité carbone, de l'efficacité énergétique, des investissements dans le secteur de production

de l'électricité et le choix du mécanisme de recyclage ne se fait pas au détriment de l'entreprise. Néanmoins, l'augmentation de l'output dans le temps se fait au prix d'une consommation d'énergie non-électrique relativement plus élevée si les agents n'anticipent pas les chocs.

Dans la littérature, Acemoglu et al. (2012) montrent que, lorsque les facteurs de production sobre en carbone et les facteurs de production non-sobre en carbone sont substituables, une croissance durable peut être atteinte grâce à un dosage entre des taxes pour contrôler les émissions et des subventions temporaires qui redirigent l'innovation vers les facteurs de production sobre. Par ailleurs, Bretschger et Schaefer (2017), et Argentiero et al. (2018), montrent aussi que l'utilisation simultanée des taxes et des subventions aux technologies bas-carbone est importante pour le succès de la transition énergétique, comme c'est le cas dans la thèse. Enfin, Metcalf et Stock (2020) montrent que l'effet de l'évolution de la fiscalité carbone sur le PIB (et l'emploi) est nul voire positif. De même, Chan (2020) montre qu'une augmentation non-anticipée de la taxe carbone a un effet plus bénéfique en matière de bien-être social qu'une augmentation anticipée. Les résultats de la littérature convergent avec les résultats de la thèse.

Annexes de la Partie IV

4.A. Bibliographie

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *The American Economic Review*, 102(1), 131-166.
- Agarwal, S., & Qian, W. (2014). Consumption and debt response to unanticipated income shocks: Evidence from a natural experiment in Singapore. *American Economic Review*, 104(12), 4205-30.
- Blundell, R., Pistaferri, L., & Preston, I. (2008). Consumption inequality and partial insurance. *American Economic Review*, 98(5), 1887-1921.
- Bretschger, L., & Schaefer, A. (2017). Dirty history versus clean expectations: can energy policies provide momentum for growth? *European Economic Review*, 99, 170-190.
- Chan, Y. T. (2020). Collaborative optimal carbon tax rate under economic and energy price shocks: A dynamic stochastic general equilibrium model approach. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120452.
- Douenne et Fabre (forthcoming). Yellow vests, Pessimistic beliefs, and carbon tax aversion. *American Economic Journal : Economic Policy*.
- Jappelli, T., & Pistaferri, L. (2010). The consumption response to income changes.
- Lucas Jr, R., & Sargent, T. (1979). After keynesian macroeconomics. *Quarterly Review of Federal Reserve Bank of Minneapolis*, 1(295-319).
- Marion, N. P., & Svensson, L. E. (1984). Adjustment to expected and unexpected oil price changes. *Canadian Journal of Economics*, 15-31.
- Mertens, K., & Ravn, M. O. (2012). Empirical evidence on the aggregate effects of anticipated and unanticipated US tax policy shocks. *American Economic Journal: Economic Policy*, 4(2), 145-81.
- Metcalf, G. E., & Stock, J. H. (2020, May). Measuring the macroeconomic impact of carbon taxes. In *AEA Papers and Proceedings* (Vol. 110, pp. 101-06).
- Parker, J. A. (1999). The reaction of household consumption to predictable changes in social security taxes. *American Economic Review*, 89(4), 959-973.
- Pindyck, R. S., & Rotemberg, J. J. (1984). Energy price shocks and macroeconomic adjustments. *Natural Resources Journal*, 24(2), 277-296.
- Souleles, N. S. (1999). The response of household consumption to income tax refunds. *American Economic Review*, 89(4), 947-958.
- Villemot S. (2018). Determinist Models. <https://sebastien.villemot.name/pdf/talks/2018/deterministic.pdf>
- Wohltmann, H. W., & Winkler, R. C. (2008). *Anticipated and unanticipated oil price shocks and optimal monetary policy* (No. 2008-05). Economics Working Paper.
- Zeldes, S. P. (1989a). Optimal consumption with stochastic income: Deviations from certainty equivalence. *The Quarterly Journal of Economics*, 104(2), 275-298.
- Zeldes, S. P. (1989b). Consumption and liquidity constraints: an empirical investigation. *Journal of political economy*, 97(2), 305-346.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de recherche présentés dans la thèse sont parmi les premiers à étudier les effets agrégés de la transition énergétique à partir d'un modèle hybride économie-électricité. Les effets sont simulés sous divers scénarios d'évolution du prix des énergies et de l'efficacité énergétique, ce qui permet de dégager plusieurs enseignements généraux. Les résultats montrent que transition énergétique et croissance ne sont pas incompatibles sur le long terme à condition que les politiques mettent en place les bonnes incitations. Avec les bonnes politiques publiques (subventions publiques aux filières électriques, contraintes en matière de mix électrique, fiscalité carbone et politiques favorisant les efforts d'efficacité énergétiques), la décarbonation de l'économie et la croissance peuvent être portées par le progrès technique et les mécanismes de substitution.

Le principal canal de transmission macroéconomique de la transition bas-carbone dans le modèle est la demande d'énergie via le prix relatif des énergies et l'efficacité relative des énergies, plutôt que via l'augmentation des investissements en faveur de la décarbonation du mix électrique. Les contraintes en matière de mix électrique n'affectent l'économie qu'à la marge dans la thèse. En effet, les investissements dans le système électrique qui en résultent ne représentent qu'une faible part du PIB de l'économie française. Néanmoins, le prix de gros sur le marché de l'électricité, qui résulte en partie du choix de la composition du mix électrique, affecte l'économie à travers les mécanismes de substitution entre les différents types d'énergie. Les résultats de la thèse montrent donc que l'effet prix sur les décisions des agents en matière de consommation d'énergie est sensible. Par conséquent, la prise en compte dans les modèles de l'évolution du prix de l'électricité, en plus du prix des hydrocarbures, pour une économie qui est vouée à s'électrifier sur le long terme est important. Par ailleurs, les subventions publiques aux filières électriques subventionnées permettent de décarboner très sensiblement le mix électrique français à l'horizon 2035. Les recettes de la fiscalité carbone permettent, entre autres, de financer ces dépenses publiques à destination du système électrique.

Par ailleurs, la fiscalité carbone permet un découplage absolu des émissions et de la croissance lorsque le prix des énergies augmente dans le temps, et un découplage relatif lorsque le prix des énergies diminue dans le temps. Les résultats du modèle ont montré que lorsque le prix de gros des énergies diminue dans le temps, la fiscalité carbone telle que prévue par le Projet Loi Finance 2018 ne permet pas d'inciter les agents de l'économie à diminuer leur consommation d'énergie non-électrique. Néanmoins, la consommation d'énergie non-électrique, facteur principal de

l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, augmente relativement moins que le taux de croissance de l'économie. Par conséquent, la fiscalité carbone doit être fixée de manière dynamique en prenant en compte l'évolution du prix des hydrocarbures dans le temps. C'est-à-dire que si le prix des hydrocarbures suit l'évolution du scénario bas de Saudi Aramco sur le long terme, il faut réévaluer à la hausse la fiscalité carbone par rapport à celle fixée dans le Projet Loi Finance 2018.

Les résultats de la thèse ont montré, qu'à condition que les recettes de la fiscalité carbone soient redistribuées à partir de transferts forfaitaires de type « chèque climat », le bien-être des ménages n'est pas lésé par l'augmentation de la fiscalité carbone sur le long terme. En conséquence, le caractère régressif de la fiscalité environnementale est atténué, mais pas annulé car les ménages non-contraints par leurs liquidités gagnent relativement plus en matière de bien-être que les ménages contraint par leurs liquidités. L'effet d'une augmentation de la fiscalité carbone sur les entreprises dépend quant à lui des effets d'anticipation. Enfin, l'interaction entre la fiscalité carbone et le prix de l'énergie non-électrique affecte aussi les recettes fiscales de l'État. Les résultats de la thèse concluent que, malgré une érosion de la base taxable des produits énergétiques, le passage au tout électrique ne devrait pas engendrer, toutes choses égales par ailleurs, un manque à gagner pour les administrations, grâce en partie aux possibilités de substitution. À long terme, le surplus primaire du gouvernement pourrait même augmenter.

En outre, les résultats du modèle montrent que, en plus de la fiscalité carbone, les efforts d'efficacité énergétique ne sont pas suffisants pour diminuer sensiblement la consommation d'énergie non-électrique sur le long terme, et ce surtout dans le secteur résidentiel. Les résultats de la thèse montrent que l'objectif du *facteur 6* de la loi énergie-climat, pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, n'est pas atteint quelle que soit la version d'évolution du prix des énergies et le scénario d'évolution de l'efficacité énergétique considérés. Par conséquent, les politiques doivent accélérer les efforts d'efficacité énergétique et des transferts d'usage, comme le développement du parc de véhicules électriques.

La prise en compte du reste de l'économie dans l'élaboration des trajectoires de consommation d'énergie des politiques publiques est importante, d'autant plus que l'évolution du mix énergétique est conditionnée à l'évolution de la consommation d'énergie. Les trajectoires de consommation d'électricité simulées avec bouclage macroéconomique diffèrent sensiblement des trajectoires de consommation d'électricité simulées sans bouclage macroéconomique. La cause principale en est attribuée aux mécanismes de substitution qui existent entre les différents types d'énergie, les différents biens de consommation et les différents facteurs de production. Les résultats de la thèse ont montré que les effets substitution sont sensibles lorsque les agents de l'économie ont la possibilité de substituer entre l'électricité et l'énergie non-électrique.

Les résultats de la thèse montrent aussi que l'effet des politiques publiques précédentes est différent selon les effets d'anticipation. Si les politiques publiques sont annoncées à l'avance, les agents de l'économie vont réagir en diminuant relativement plus leur consommation d'énergie non-électrique et en diminuant relativement plus leur demande agrégée. La demande agrégée est affectée principalement par le canal de la demande des biens durables, la demande des biens non-durables et les investissements dans le capital physique. Les résultats de la thèse ont montré que la prise en compte des biens durables dans un modèle construit pour étudier les effets d'une transition énergétique sur une économie est nécessaire. Néanmoins, l'effet sur la croissance est contenu. La croissance perd 0.022 points de pourcentage par an lorsque les agents de l'économie anticipent l'évolution des politiques publiques et l'évolution à la hausse du prix des énergies. *Au total, les effets d'anticipations sont plus favorables à la décarbonation de l'économie sans affecter significativement le taux de croissance de l'économie.*

La thèse peut ouvrir d'autres horizons de recherche. Tout d'abord, *la thèse ne chiffre pas les efforts d'efficacité énergétique et les transferts d'usage.* L'augmentation des investissements dans l'efficacité énergétique et des transferts d'usage affectent positivement la demande agrégée sur le long terme. Si bien que l'effet total sur la croissance pourrait être positif si l'on prenait en compte ces investissements au moyen de modèles en équilibre partiel d'investissement dans le logement et le transport par exemple. Par ailleurs, différentes politiques de redistribution pourraient être envisagées pour limiter l'effet de la fiscalité environnementale sur les entreprises. Par exemple, une politique de redistribution hybride, comme des transferts forfaitaires vers les ménages et une diminution des charges sociales aux entreprises les plus fragilisées par la fiscalité carbone, pourrait être mise en place pour atténuer l'effet de la fiscalité carbone sur les entreprises. Aussi, il serait intéressant d'étudier, en plus de la transition électrique, la transition énergétique dans une version plus globale. Cela suppose d'intégrer la transition du côté des gaziers (hydrogène, gaz renouvelable etc.) et les outils de capture et de stockage du carbone. Enfin, il serait intéressant d'étudier les conséquences des politiques de transition énergétique sur les actifs échoués de l'économie française tant du côté du système électrique que du secteur du bâtiment. Les effets attendus sur le système électrique sont faibles car le système est déjà fortement décarboné et le poids des actifs du système électrique dans les actifs totaux de l'économie est faible (environ 1% en 2018). De plus, la construction des scénarios Ampère et Volt par Rte prennent en compte les décisions de déclassement des actifs carbonés du système électrique et repose sur un calcul de rentabilité économique. En revanche, la question du déclassement des actifs est plus importante dans le secteur du bâtiment qui verra une grande partie de ses actifs être déclassés. Cela peut représenter

une perte potentiellement significative. En effet, lorsque les bâtiments sont rénovés, une partie des équipements et du matériel du bâtiment original est déclassé.

Table des matières

RESUME	5
ABSTRACT	6
INTRODUCTION GÉNÉRALE	16
PARTIE I. LES MODELES MACROECONOMIQUES A L'EPREUVE DES POLITIQUES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES : UN ETAT DE LA LITTERATURE	27
CHAPITRE 1. CONTEXTE THÉORIQUE: ORIGINES DE LA RÉFLEXION CONTEMPORAINE EN MACROÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	29
1. <i>Élément de définition : la transition énergétique</i>	29
2. <i>Les outils de la « nouvelle économie classique »</i>	31
2.1. Les origines de la réflexion et leurs prolongements dans la macroéconomie actuelle de l'énergie ³¹	
2.2. Utilité du cadre microfondé dans l'étude de la transition énergétique	36
3. <i>La nouvelle économie keynésienne et ses implications pour l'énergie</i>	37
CHAPITRE 2. LES DIFFÉRENTES CLASSES DE MODÈLES EN ÉQUILIBRE GÉNÉRAL APPLICABLES A L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	41
1. <i>Avantages et limites principaux des modèles en équilibre général</i>	42
2. <i>L'équilibre général calculable (CGE – computable general equilibrium)</i>	43
2.1. Spécificités du modèle CGE	44
2.2. Caractéristiques	44
3. <i>Synergie néoclassique et keynésienne : l'Équilibre Général Dynamique et Stochastique</i>	45
3.1. Spécificités des modèles DSGE.....	46
3.1.1. La structure du modèle	46
3.1.2. L'équilibre général dynamique et stochastique comme outil de modélisation des problématiques énergétiques et environnementales	47
3.2. Caractéristiques	50
4. <i>Les modèles à Générations Imbriquées (Overlapping Generation Models - OLG)</i>	52
4.1. Spécificités du modèle OLG	52
4.2. Caractéristiques	53
CHAPITRE 3. L'IMBRICATION DES MODÈLES SCIENTIFIQUES DANS LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL.....	55
1. <i>Les modèles hybrides</i>	55
1.1. Spécificités des modèles hybrides.....	56
1.2. Réduire le fossé entre les approches <i>top-down</i> et <i>bottom-up</i>	57
1.3. Caractéristiques	58
1.4. Les modèles hybrides en France.....	58
2. <i>Les modèles à évaluation intégrée (LAM)</i>	60
2.1. Spécificités des modèles IAM	61

2.1.1. Les IAM d'optimisation	61
2.1.2. Les IAM d'évaluation	63
2.2. Caractéristiques	63
CONCLUSION.....	64
ANNEXES DE LA PARTIE I.....	67
1.A. LES MODELES DSGE DEVELOPPES PAR LES INSTITUTIONS (SERGI, 2015)	67
1.B. BIBLIOGRAPHIE	67
PARTIE II. HYGEM, UN MODELE HYBRIDE DE CROISSANCE DYNAMIQUE COUPLE AUX TRAJECTOIRES DE TRANSFORMATION DU PAYSAGE ELECTRIQUE FRANÇAIS	76
CHAPITRE 1. PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS AMPÈRE ET VOLT DU BILAN PRÉVISIONNEL 2017 DE RTE.....	77
1. <i>Le scénario Volt</i>	77
2. <i>Le scénario Ampère</i>	79
CHAPITRE 2. LE SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS ET SON INTERFAÇAGE AVEC LE MODÈLE MACROÉCONOMIQUE	82
1. <i>Présentation du modèle d'optimisation du secteur de production d'électricité</i>	82
2. <i>Interfaçage avec le modèle macroéconomique</i>	85
CHAPITRE 3. LE MODÈLE DE CROISSANCE DYNAMIQUE	88
1. <i>Vue d'ensemble du bouclage macroéconomique</i>	88
2. <i>L'environnement déterministe</i>	89
3. <i>Le secteur résidentiel : un sous-modèle à agents hétérogènes</i>	91
3.1. Le ménage ricardien.....	91
3.2. Le ménage non-ricardien	96
3.3. Agrégation.....	97
4. <i>Les secteurs d'activité</i>	97
5. <i>L'autorité publique</i>	101
5.1. Fiscalité de l'énergie et financement de la transition énergétique.....	101
5.2. La fiscalité dans le modèle.....	102
5.3. Les taux effectifs de taxation.....	103
5.4. Finances publiques et règles fiscales	104
6. <i>L'évolution de la demande d'énergie dans le modèle : entre effet substitution, effet croissance et effet technologique</i>	105
7. <i>Fermeture du modèle</i>	107
CHAPITRE 4. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE	109
1. <i>Calibration des paramètres hors élasticités de substitution</i>	109
1.1. Les principaux ratios de l'économie française	109
1.2. Le taux de croissance de l'économie et de l'efficacité énergétique.....	109
2. <i>Estimation des élasticités de substitution intratemporelle</i>	112
2.1. Méthodologie d'estimation.....	112

2.2.	L'estimation des paramètres de substitution de la technologie de production	113
2.2.1.	Estimation de l'élasticité de substitution entre les composites travail-capital et énergie efficace	113
2.2.2.	Estimation de l'élasticité de substitution entre le facteur capital et le facteur travail	114
2.2.3.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les secteurs d'activité.....	117
2.3.	L'estimation des paramètres de substitution de la fonction de consommation.....	120
2.3.1.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'énergie efficace et les biens durables	120
2.3.2.	Estimation de l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique pour les ménages.....	122
ANNEXES DE LA PARTIE II		125
2.A.	MONTANT DES SOUTIENS DU COMPTE D'AFFECTATION SPECIAL « TRANSITION ENERGETIQUE » EN 2018.....	125
2.B.	LE POIDS DE LA FISCALITE ENERGETIQUE DANS LA VALEUR AJOUTEE DES SECTEURS	125
2.C.	TAUX DE CROISSANCE ANNUEL DE L'EFFICACITE ELECTRIQUE	126
2.D.	CALCUL DES TAUX DE TAXATION EFFECTIF EN 2018	127
2.D.1.	<i>Taux de taxation effectif moyen sur la valeur ajoutée à la Mendoza, Razin et Tesar (1994).....</i>	<i>127</i>
2.D.2.	<i>Taux de taxation effectif moyen des revenus du travail à la Mendoza, Razin et Tesar (1994)</i>	<i>127</i>
2.D.3.	<i>Taux de taxation effectif moyen des revenus du capital à la Mendoza, Razin et Tesar (1994)</i>	<i>128</i>
2.D.4.	<i>Taux de taxation effectif moyen de l'énergie non-électrique.....</i>	<i>128</i>
2.D.5.	<i>Taux de taxation effectif moyen de l'électricité.....</i>	<i>129</i>
2.E.	CONCORDANCE ENTRE LES DONNEES DES COMPTES NATIONAUX ET LE MODELE	130
2.F.	RECONSTITUTION DES DEPENSES EN ENERGIE DES ENTREPRISES DE 1985 A 2018 POUR L'EXERCICE D'ESTIMATION DES ELASTICITES DE SUBSTITUTION.....	133
2.G.	REPARAMETRISATION DES PARAMETRES DE DISTRIBUTION DES FONCTIONS CES DU MODELE A LA CANTORE ET LEVINE (2011)	135
2.G.1.	<i>Les paramètres de distribution du côté de l'entreprise.....</i>	<i>135</i>
2.G.2.	<i>Les paramètres de distribution du côté des ménages</i>	<i>138</i>
2.H.	LES CONDITIONS DE PREMIER ORDRE DU MODELE.....	139
2.H.1.	<i>La demande du bien non-durable du ménage i.....</i>	<i>139</i>
2.H.2.	<i>Demande d'investissement en capital physique du ménage ricardien</i>	<i>139</i>
2.H.3.	<i>Offre de capital (décision d'épargne/ investissement) du ménage ricardien – Équation d'Euler du capital... 139</i>	
2.H.4.	<i>La demande de biens durables du ménage i.....</i>	<i>139</i>
2.H.5.	<i>La demande de services énergétiques du ménage i.....</i>	<i>140</i>
2.H.6.	<i>La demande d'énergie du ménage i.....</i>	<i>140</i>
2.H.7.	<i>La demande d'électricité du ménage i.....</i>	<i>141</i>
2.H.8.	<i>La demande d'énergie non électrique du ménage i.....</i>	<i>141</i>
2.H.9.	<i>Règles d'accumulation des stocks des ménages.....</i>	<i>141</i>
2.H.10.	<i>La contrainte budgétaire du ménage non-ricardien</i>	<i>141</i>

2.H.11. La contrainte budgétaire du ménage ricardien	142
2.H.12. Agrégation des variables endogènes des ménages	142
2.H.13. Demande du facteur agrégé travail-capital de l'entreprise	142
2.H.14. Demande d'énergie agrégée de l'entreprise	142
2.H.15. Demande de capital de l'entreprise	143
2.H.16. Demande de travail de l'entreprise	143
2.H.17. Demande d'électricité de l'entreprise	143
2.H.18. Demande d'énergie non électrique de l'entreprise	143
2.H.19. Les tendances de progrès technique	143
2.H.20. La contrainte budgétaire de l'autorité publique	143
2.H.21. La contrainte de ressource de l'économie	143
2.I. CALIBRATION DU MODELE	144
2.J. CALCUL DE LA PART DES REVENUS DU CAPITAL DANS LES REVENUS TOTAUX DE L'ECONOMIE FRANÇAISE	145
2.K. BIBLIOGRAPHIE	146
PARTIE III. LES EFFETS AGREGES DE LONG TERME D'UNE TRANSITION ELECTRIQUE SOUS DIVERS SCENARIOS D'EVOLUTION DU PRIX DES ENERGIES .152	
CHAPITRE 1. LES SCÉNARIOS ÉTUDIÉS	153
1. Hypothèses d'évolution des variables exogènes du système électrique	153
2. Hypothèses d'évolution du prix hors taxes des énergies et prix du CO ₂ sur le marché des quotas	154
2.1. Prix de détail hors taxes des combustibles et prix du CO ₂ sur le marché des quotas	154
2.2. Prix de détail de l'électricité	155
3. Hypothèses d'évolution de la fiscalité énergétique	156
3.1. Évolution de la fiscalité non-énergétique	156
3.2. Évolution de la fiscalité électrique	157
CHAPITRE 2. LES RÉSULTATS DE SIMULATION AVEC INFORMATION PARFAITE	158
1. Les effets de bouclage macroéconomique sur la consommation d'énergie sont importants	158
1.1. Dans le modèle, les agents de l'économie réagissent sensiblement à l'effet prix dans leurs prises de décision de consommation d'énergie	159
1.1.1. L'effet substitution	159
1.1.1.1. Dans le modèle, sur le long terme, les ménages basent leurs décisions de consommation d'énergie sur le prix relatif des énergies (TTC) davantage que sur l'efficacité énergétique relative quand le prix du baril est relativement plus élevé, et plutôt sur l'efficacité énergétique quand le prix du baril est relativement plus faible	159
1.1.1.2. Dans le modèle, l'évolution du prix de l'énergie non-électrique affecte sensiblement la consommation d'électricité	161
1.1.2. Dans le modèle, les ménages réagissent plus à l'effet substitution qu'à l'effet revenu dans leurs prises de décision de consommation d'énergie	161
1.1.3. Dans le modèle, les ménages non-ricardiens diminuent davantage leur consommation d'énergie que les ménages ricardiens à cause de l'effet revenu	162

1.2.	Dans le modèle, sur le long terme, l'entreprise base ses décisions de consommation d'énergie sur le prix relatif des énergies (TTC) plutôt que sur l'efficacité énergétique relative, quelle que soit l'évolution du prix des énergies	163
1.3.	Dans le modèle, sur le long terme, l'entreprise est plus sensible aux mouvements des prix des énergies et de la fiscalité carbone que les ménages	164
1.4.	Dans le modèle, sur le long terme, les effets croissance viennent atténuer, voire inverser, l'effet conjoint du prix et de l'efficacité énergétique sur la consommation d'énergie	165
2.	<i>Effets agrégés sur les conditions de production de l'entreprise</i>	166
2.1.	Dans le modèle, sur le long terme, grâce à un effet d'échelle plus fort que l'effet substitution et une demande agrégée relativement plus élevée, un prix relativement plus élevé de l'énergie (TTC) a un effet moins dépressif sur l'output	166
2.2.	Dans le modèle, sur le long terme, l'évolution de la fiscalité carbone pèse sur la production de l'entreprise	167
2.3.	Toutefois, dans le modèle, l'effet de la variation des prix des énergies (TTC) sur la production de l'entreprise est faible	168
3.	<i>Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages</i>	169
3.1.	Dans le modèle, avant la mise en œuvre du dégel de la taxe carbone, l'effet de l'annonce de l'augmentation de la taxe carbone sur l'investissement du ménage ricardien est sensible	169
3.2.	Dans le modèle, sur le long terme, par unité de travail efficace, le ménage ricardien absorbe les pics de prix des énergies en augmentant l'investissement en capital physique (hors secteur électrique) et en diminuant l'investissement en biens durables	169
3.3.	Dans le modèle, sur le long terme, un prix des énergies relativement plus élevé affecte négativement la production de services énergétiques par le ménage ricardien malgré une efficacité énergétique accrue	171
3.4.	Dans le modèle, en réponse aux mouvements du prix des énergies (TTC), l'investissement en biens durables du ménage contraint par ses liquidités est relativement plus affecté que celui du ménage non-contraint par ses liquidités	173
3.5.	Dans le modèle, sur le long terme, un prix des énergies relativement plus élevé affecte relativement plus la production de services énergétiques du ménage non-ricardien	174
3.6.	Dans le modèle, les consommations brutes d'électricité et d'énergie non-électrique du ménage en unité de travail efficace diminuent lorsque le prix des énergies est relativement plus élevé, mais les services énergétiques en unité de travail efficace augmentent grâce aux gains d'efficacité énergétique	175
3.7.	Dans le modèle, les pics de prix des énergies sont absorbés en partie par les ménages par une substitution entre les services rendus par la consommation conjointe d'énergie efficace et de biens durables, et les biens de consommation non-durables	176
3.8.	Dans le modèle, la consommation de biens non-durables des ménages est « lissée » sur le long terme	178
3.8.1.	Dans le modèle, le portefeuille d'actifs du ménage ricardien et le mécanisme de redistribution amortissent l'effet de l'évolution du prix des énergies sur la consommation en biens non-durables	178
3.8.2.	Dans le modèle, le mécanisme de redistribution et les biens durables permettent d'amortir des chocs subis par le ménage non-ricardien	179
3.9.	Dans le modèle, en réponse à l'évolution du prix des énergies et du mécanisme de redistribution, malgré une augmentation du bien-être des ménages sur le long terme, le mécanisme de redistribution ne parvient pas à supprimer totalement le caractère régressif de la fiscalité carbone	180

4.	<i>Effets agrégés sur les finances publiques</i>	181
4.1.	Dans le modèle, l'électrification de l'économie n'érode pas les recettes fiscales provenant des produits pétroliers	181
4.2.	Dans le modèle, l'électrification de l'économie et l'évolution du prix des énergies augmentent les recettes fiscales hors énergie du gouvernement	182
4.3.	Dans le modèle, l'électrification de l'économie et l'évolution du prix des énergies augmentent les recettes fiscales totales en unité de travail efficace, permettant au gouvernement de davantage redistribuer vers les ménages	183
5.	<i>Dans le modèle, l'effet de long terme sur le PIB par tête de l'évolution des investissements dans le système électrique et du prix des énergies est légèrement négatif</i>	184
6.	<i>Dans le modèle, une maîtrise de la demande d'énergie et des transferts d'usage relativement moins poussés, et un mix de production plus nucléarisé permettent une décarbonation plus intense de l'économie mais au prix d'une sensibilité plus forte de l'économie aux variations du prix du baril et de la fiscalité carbone</i>	186
CHAPITRE 3. TESTS DE ROBUSTESSE SUR LE MODÈLE À INFORMATION PARFAITE ..		189
1.	<i>La reparamétrisation du modèle</i>	189
1.1.	La reparamétrisation des élasticités de substitution inter-énergies	189
1.2.	La reparamétrisation de l'élasticité entre les biens durables et l'énergie efficace	189
1.3.	La reparamétrisation de l'élasticité entre le composite travail-capital et le composite énergie efficace	190
2.	<i>Les résultats des tests de robustesses</i>	190
2.1.	Test sur les élasticités de substitution inter-énergies	190
2.2.	Tests sur l'élasticité de substitution entre les biens durables et l'énergie efficace	191
2.3.	Tests sur l'élasticité de substitution entre l'électricité et l'énergie non-électrique d'une part, et le facteur capital et le facteur travail d'autre part	192
2.4.	Tests de robustesse, croissance et décarbonation de l'économie	192
CHAPITRE 4. DISCUSSION		197
1.	<i>Sous certaines conditions, la transition électrique n'affecte pas sensiblement la croissance sur le long terme et permet de décarboner l'économie</i>	197
1.1.	Prix relatif des énergies et évolution du parc électrique français	199
1.2.	L'hypothèse d'efficacité énergétique dans le modèle trouve des limites	200
1.2.1.	Investissements dans l'efficacité énergétique et croissance de l'économie	200
1.2.2.	Investissements dans l'efficacité énergétique et prix relatif des énergies	201
2.	<i>Pour atteindre l'objectif du facteur 6 à l'horizon 2050, les réévaluations de la fiscalité carbone doivent prendre en compte l'évolution du prix des hydrocarbures sur le long terme et l'électrification de l'économie doit être plus forte</i>	202
3.	<i>L'importance des biens durables dans l'explication de l'effet des chocs de prix des énergies sur le long terme</i> .	204
4.	<i>Fiscalité carbone et efficacité économique : quelles sont les conditions ?</i>	205
4.1.	Les résultats montrent que l'effet d'annonce du dégel de la taxe carbone peut être positif	205
4.4.	Futures recherches sur les mécanismes de recyclage de la taxe carbone	209
5.	<i>La prise en compte de l'électricité dans l'étude des chocs énergétiques est importante</i>	210
6.	<i>La temporalité des chocs énergétiques</i>	210
ANNEXES DE LA PARTIE III		212

3.A. BIBLIOGRAPHIE.....	212
-------------------------	-----

PARTIE IV. EFFETS DE LA STRUCTURE D'INFORMATION SUR LE COMPORTEMENT DES AGENTS SOUS DIVERS SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU PRIX DES ÉNERGIES ..215

CHAPITRE 1. LES EFFETS AGRÉGÉS DE LONG TERME D'UNE TRANSITION ÉLECTRIQUE SOUS DIVERS SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU PRIX DES ÉNERGIES DANS UN ENVIRONNEMENT À INFORMATION IMPARFAITE.....	215
---	-----

1. <i>Structure de l'information et prise de décision des agents</i>	215
2. <i>Les résultats de simulation du modèle en structure d'information imparfaite</i>	217

2.1. La dynamique de la consommation d'énergie est relativement peu sensible à la structure d'information.....	218
--	-----

2.1.1. Dans le modèle, la consommation d'énergie est un peu plus sensible à des mouvements anticipés du prix des énergies plutôt que des mouvements non-anticipés du prix des énergies.....	218
---	-----

2.1.2. Dans le modèle, la consommation d'énergie non-électrique est relativement plus sensible au choix de la structure d'information par rapport à la consommation d'électricité .	219
---	-----

2.1.3. Dans le modèle, la consommation d'énergie du ménage non-ricardien est relativement plus sensible au choix de la structure d'information.....	220
---	-----

2.2. Effets sur le processus de production de l'entreprise.....	221
---	-----

2.2.1. Dans le modèle, l'effet de l'évolution du prix des énergies sur l'échelle de la production est relativement plus important lorsque l'entreprise n'anticipe pas l'évolution du prix des énergies.....	221
---	-----

2.2.2. Dans le modèle, l'évolution non-anticipée du prix des énergies a un effet relativement moins dépressif sur l'entreprise qu'une évolution anticipée et ce, surtout lorsque l'évolution du prix des énergies est à la baisse.....	221
--	-----

2.2.3. Dans le modèle, l'effet de l'évolution du prix des énergies de l'entreprise (ITC) sur le salaire réel est relativement moins dépressif.....	222
--	-----

2.3. Effets agrégés sur la consommation et l'investissement des ménages.....	223
--	-----

2.3.1. Contrairement à la structure d'information parfaite, le ménage ricardien ne va pas se prémunir contre l'évolution du prix des énergies et va préférer augmenter son investissement de biens durables en défaveur de son investissement en capital.....	223
---	-----

2.3.2. Par rapport à la structure d'information parfaite, l'investissement du ménage ricardien réagit relativement moins à l'arrivée de nouvelles informations sur l'état de l'économie si bien que les stocks de biens durables et de capital s'ajustent à un taux moins élevé.....	224
--	-----

2.3.3. Dans la structure d'information imparfaite, pour le ménage non-ricardien, en plus d'un mécanisme de redistribution relativement plus important, l'effet substitution augmente le stock de biens durables du ménage non-ricardien lorsque le prix des énergies est relativement plus faible.....	226
--	-----

2.3.4. Dans la structure d'information imparfaite, le bien-être non-environnemental des ménages est relativement plus élevé grâce à une consommation relativement plus forte de services énergétiques et de biens non-durables dans le temps.....	228
---	-----

2.3.5. Dans la structure d'information imparfaite, la demande pour les biens de consommation est davantage lissée dans le temps.....	230
--	-----

2.3.6. Dans la structure d'information imparfaite, le ménage non-ricardien gagne plus que le ménage ricardien en matière de bien-être non-environnemental s'il n'anticipe pas l'évolution des variables énergétiques dans le temps.....	230
---	-----

2.4. Effets agrégés sur les finances publiques.....	231
---	-----

2.5. Les effets sur la croissance sont plus favorables quand les agents n'anticipent pas l'évolution des variables énergétiques.....	232
2.6. Dans la structure d'information imparfaite, la décarbonation de l'économie et l'effet sur la croissance sont meilleurs pour le scénario Volt.....	234
CHAPITRE 2. DISCUSSION	237
1. <i>Les décisions de consommation d'énergie sont relativement peu altérées par les effets d'annonce.....</i>	<i>237</i>
2. <i>Les effets d'annonce sur l'évolution du prix de détail des énergies ont une influence sensible sur les dynamiques agrégées de l'économie hors consommation d'énergie.....</i>	<i>238</i>
3. <i>Les effets d'annonce de la politique de recyclage de la taxe environnementale sont sensibles sur les dynamiques de l'économie hors consommation d'énergie.....</i>	<i>239</i>
4. <i>Le ménage contraint par ses liquidités est relativement plus sensible sur le long terme aux effets d'annonce... 241</i>	<i>241</i>
5. <i>L'évolution non-anticipée de la fiscalité carbone et du recyclage limite le caractère régressif de la fiscalité environnementale par rapport à la structure d'information parfaite</i>	<i>241</i>
6. <i>Les effets d'annonce sont plus bénéfiques à la décarbonation de l'économie mais au détriment de la croissance économique</i>	<i>242</i>
ANNEXES DE LA PARTIE IV	244
4.A. BIBLIOGRAPHIE.....	244
CONCLUSION GÉNÉRALE	245
TABLE DES MATIERES.....	249

RÉSUMÉ

La thèse modélise différents canaux macroéconomiques de transmission de la transition énergétique dans deux scénarios officiels sur le système énergétique français, selon différentes évolutions du prix des énergies et structures d'information des agents privés. Un modèle hybride associe un modèle en équilibre général dynamique et un modèle d'optimisation du système de production d'électricité. Il modélise notamment des ménages sous contraintes de liquidité, les services énergétiques produits par les biens durables des ménages, différents scénarios du prix des énergies, les effets d'une taxe carbone, et deux structures d'information selon que les agents anticipent ou non parfaitement le futur. Les résultats suggèrent l'importance de l'effet prix sur la consommation d'énergie par les agents (plutôt que l'augmentation des investissements de décarbonation du mix électrique), le rôle joué par les investissements dans les biens durables et en capital, les différences de comportement entre ménages ricardiens et non ricardiens. Les effets de la fiscalité carbone varient selon l'évolution du prix de l'énergie non-électrique ; si ses recettes sont redistribuées, elle ne lèse par forcément le bien-être des ménages dans le modèle. Si les agents anticipent le futur, la décarbonation est favorisée sans peser significativement sur la croissance. Pour atteindre la neutralité carbone, davantage d'efforts d'efficacité énergétique et en matière de transferts d'usage semblent nécessaires.

MOTS CLÉS

Transition énergétique, Macroéconomie, Modèles hybrides, Croissance, Électricité.

ABSTRACT

I model different macroeconomic transmission channels of the energy transition in two official scenarios on the French energy system, according to different evolutions of energy prices and information structures of private agents. A hybrid model combines a dynamic GE model and an optimization model of the electricity production system. It simulates households under liquidity constraints, the energy services produced by households' durable goods, different energy price scenarios, the effects of a carbon tax, and two information structures depending on whether or not the agents anticipate the future. The results suggest the importance of the price effect on energy consumption (rather than a rise in investments to decarbonize the electricity mix), the role played by investments in durable goods, and the differences in behavior between Ricardian and non-Ricardian households. The effects of the carbon tax vary according to the price of non-electric energy; if redistributed, it does not harm household welfare in the model. If agents anticipate the future, decarbonization is favored without weighing significantly on growth. To achieve carbon neutrality, more efforts in energy efficiency and in transfers of use seem necessary.

KEYWORDS

Low-carbon energy transition, Macroeconomics, Hybrid modelling, Growth, Electricity.