



HAL
open science

Effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels des investissements bas carbone en France en 2050 - Focus sur les investissements électriques

Laura Atarody

► To cite this version:

Laura Atarody. Effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels des investissements bas carbone en France en 2050 - Focus sur les investissements électriques. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres, 2022. Français. NNT : 2022UPSLD052 . tel-04123620

HAL Id: tel-04123620

<https://theses.hal.science/tel-04123620v1>

Submitted on 9 Jun 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL
Préparée à l'Université Paris-Dauphine

**Effets macroéconomiques et redistributifs
intergénérationnels des investissements bas carbone en
France d'ici 2050 – cas du secteur électrique**

Soutenue par

Laura ATARODY

Le 14 décembre 2022

Ecole doctorale n° ED 543

École doctorale SDOSE

Spécialité

Économie

Composition du jury :

Patrice GEOFFRON
Professeur des Universités,
Université Paris Dauphine-PSL

Président

Thi Kim Cuong PHAM
Professeur des Universités,
Université Paris Nanterre

Rapporteur

Cédric CLASTRES
Professeur des Universités,
Univ. Grenoble-Alpes / GAEL

Rapporteur

Carine STAROPOLI
Maître de conférence,
Université Paris 1 Panthéon Sorbonne

Examineur

Frédéric GONAND
Professeur, Université Paris Dauphine-PSL

Directeur de thèse

Remerciements

Cette thèse est le fruit de la collaboration entre le Département d'Économie de l'Université Paris Dauphine-PSL et EDF R&D. Je souhaite remercier les nombreuses personnes que j'ai côtoyées et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

J'adresse en premier lieu mes remerciements à Frédéric Gonand pour avoir dirigé cette thèse. Je le remercie d'avoir partagé son expérience, son aide et ses conseils tout au long de cette période. Je lui suis particulièrement reconnaissante de m'avoir accordé sa confiance, et d'avoir contribué au travers de conseils avisés à la réussite de mes travaux.

Ma reconnaissance va évidemment à Mourad Ayouz, pour son précieux soutien, aussi bien professionnel que personnel et qui en plus de ses connaissances techniques et scientifiques, a su me transmettre son énergie sans faille.

Je remercie également Cédric Clastres et Thi Kim Cuong Pham qui ont accepté de rapporter cette thèse. Je les remercie de l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à mon travail, de leur lecture attentive de ce manuscrit et de leurs précieuses remarques.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux collègues de l'ancien département EFESE qui m'ont encadrée et accompagnée. J'ai eu la chance de côtoyer et de collaborer avec de nombreuses personnes durant mon doctorat, et je tiens à remercier ces collègues qui ont aussi contribué d'une façon ou d'une autre au succès de ce projet. Je remercie Sylvie Duchassaing, pour son écoute, sa grande bienveillance, sa clairvoyance et ses conseils pertinents. Mes remerciements vont aussi à Viviane Leboucher qui a toujours été très présente pour m'accompagner et me soutenir. Je souhaite également exprimer ma plus gratitude à Claire-Marie Bono pour son aide scientifique, et à Laura Perotto pour son soutien.

Je tiens à remercier les autres Professeur(e)s qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie du jury de thèse : Patrice Geoffron et Carine Staropoli. Je souhaite remercier les Professeur·e·s Anna Creti, Marie Bessec et Patrice Geoffron et Oliver Appert, pour leurs conseils clairvoyants sur mes travaux de recherche pendant les différents comités de thèse effectués.

Un autre sincère remerciement est destiné à Florence qui m'a toujours soutenue dans les moments nécessaires. Côté thésards, je souhaite évidemment remercier Eugénie et Darius qui m'ont aussi été d'un grand soutien.

Enfin, j'adresse toute mon affection à tous mes amis et ma famille, qui m'ont apporté toute leur force, leur amour et leur confiance. Je n'aurais sans doute jamais réussi sans vous. La liste n'étant pas exhaustive, j'écris donc ces lignes pour vous faire honneur.

Résumé

La thèse modélise les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels de différents modes de financement des investissements privés de transition énergétique à faible émission de carbone dans le secteur électrique, en France à l'horizon 2050. Un modèle empirique d'équilibre général est développé, avec quinze générations et cinq secteurs économiques. Trois scénarios sont considérés, où les investissements privés dans le secteur électrique sont soit financés par de la dette publique, remboursée ultérieurement par une hausse d'un impôt générique (scénario 1), ou par un signal prix du carbone payé par les entreprises seulement (scénario 2), ou par un signal prix du carbone pour les entreprises et les ménages (scénario 3). Nous envisageons deux types de ménages qui se distinguent par leur contrainte de liquidité, ainsi que différentes variantes, en fonction notamment des volumes d'investissement, du prix de l'énergie, ou du niveau des taux d'intérêt. Les résultats suggèrent notamment que les effets redistributifs intergénérationnels sont généralement plus préjudiciables pour les générations intermédiaires et âgées, du fait des effets du choc sur les revenus du capital et du travail. L'effet sur les prix à la consommation pénalise relativement plus les jeunes générations. Si les taux restent bas à l'avenir, les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels sont relativement atténués en cas de financement par de la dette publique. Si les taux remontent, les effets négatifs sont plus atténués si les investissements sont financés par des signaux-prix conjoints sur les entreprises et sur les ménages.

Mots clés : Transition énergétique, Macroéconomie, Modèle CGE, Électricité

Abstract

The thesis models the macroeconomic and intergenerational redistributive effects of different ways of financing private low-carbon energy transition investments in the electricity sector in France by 2050. An empirical general equilibrium model is developed, with fifteen generations and five economic sectors. Three scenarios are considered: private investments in the electricity sector are either financed by public debt, later reimbursed by an increase in a generic tax (scenario 1), by a carbon price signal paid by firms only (scenario 2), or by a carbon price signal for firms and households (scenario 3). We consider two types of households depending on whether they are liquidity constrained or not, as well as different sensitivities, depending in particular on investment volumes and energy prices, or on the level of interest rates. The results suggest notably that the intergenerational redistributive effects are generally more detrimental to the middle and older generations, in line with the effects of the shock on capital and labour incomes. The effect on consumer prices is relatively more detrimental to younger generations. If interest rates remain low in the future, the macroeconomic and intergenerational redistributive effects are relatively attenuated in the case of financing by public debt. If rates rise, the negative effects are more attenuated if investments are financed by joint price signals on companies and households.

Keywords : Energy transition policies, Macroeconomics, CGE modelling, Electricity

Tables des matières

Remerciements.....	1
Résumé.....	3
Abstract.....	4
Tables des matières.....	5
Liste des tableaux.....	9
Liste des graphiques	10
Introduction générale	14
PARTIE I. Littérature disponible	26
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	29
1. Littérature sur la question du volume des investissements bas carbone et de leur allocation	29
2. Taxe carbone, prix de l'énergie et volume d'investissements bas carbone dans la littérature	34
2.1. Prix de gros de l'énergie	35
2.2. Taxe carbone et investissements bas carbone.....	40
3. Les investissements dans la R&D bas carbone.....	49
4. La littérature qui traite des effets redistributifs intergénérationnels et de la manière de financer les investissements dans une transition énergétique à faible émission de carbone est peu développée	52
CHAPITRE 2 : SPÉCIFICITÉS DES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL	56
1. Caractéristiques des modèles à générations imbriquées	56
2. Caractéristiques des modèles d'équilibre général calculable.....	58
PARTIE II : UN MODÈLE EMPIRIQUE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL À GÉNÉRATIONS IMBRIQUÉES SUR DONNÉES FRANÇAISES APPLIQUÉ AU CAS DES INVESTISSEMENTS BAS CARBONE DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE.....	61
CHAPITRE 1 : QUELQUES CHOIX DE MODÉLISATION	61
1. Modélisation de l'offre : secteurs économiques et lien avec la littérature.....	62
2. Modélisation des ménages et lien avec la littérature.....	63

CHAPITRE 2 : LE MODELE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL68

1. Le programme des ménages 68
2. Les entreprises 74
3. Demande et prix de l'énergie..... 79
4. Les finances publiques..... 82

CHAPITRE 3 : PARAMÉTRISATION ET CALIBRATION84

1. Paramétrisation des investissements..... 84
2. Paramétrisation des prix de gros de l'électricité associés à la trajectoire d'investissements..... 88
3. Autres paramètres exogènes 89
 - 3.1. Taux de progrès technique et croissance de la population 89
 - 3.2. Paramétrisation du taux d'intérêt moyen sur le stock de dette publique 90
 - 3.3. Autres paramètres 92
4. Calibration..... 92
 - 4.1. Consommation et actifs par génération..... 92
 - 4.2. Calibration relative aux ménages et en fonction du type de ménages (classiques ou non-classiques) 96

PARTIE III : EFFETS MACROÉCONOMIQUES ET REDISTRIBUTIFS INTERGÉNÉRATIONNELS DES INVESTISSEMENTS BAS CARBONE DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE SELON LEUR MODE DE FINANCEMENT 100

CHAPITRE 1 : EFFETS MACROÉCONOMIQUES 100

1. Scénario de référence (*baseline*) 100
 - 1.1. Description du scénario 100
 - 1.2. Analyse sectorielle du scénario baseline..... 105
2. *Scénario 1*. Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par la dette publique 107
 - 2.1. Description du scénario 107
 - 2.2. Mécanismes de transmission du choc dans ce premier scénario..... 114
 - 2.3. Analyse sectorielle du scénario 1 123
3. *Scénario 2*. Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par un signal prix ou une taxe sur la consommation d'énergie pour les entreprises uniquement

3.1. Description du scénario	125
3.2. Mécanismes de transmission du choc dans le deuxième scénario	128
3.3. Analyse sectorielle du scénario 2.....	135
4. <i>Scénario 3</i> : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie).....	138
4.1. Description du scénario	138
4.2. Mécanismes de transmission du choc dans le troisième scénario.....	141
4.3. Analyse sectorielle du scénario 3.....	147
5. Comparaison des trois scénarios	149
6. Focus sur la consommation d'énergie des ménages.....	151
7. Conclusion.	155
CHAPITRE 2 : EFFETS REDISTRIBUTIFS INTERGÉNÉRATIONNELS	157
1. Mécanismes et effets communs aux trois scénarios.....	157
2. Premier scénario.....	159
3. Second scénario.....	160
4. Troisième scénario	162
CHAPITRE 3 : EFFETS D'UNE TRAJECTOIRE D'INVESTISSEMENTS PLUS ÉLEVÉS (SCENARIO RTE)	164
1. Implémentation du choc dans une variante RTE (chiffrage du scénario N03 de RTE)	164
2. Effets sur la dette publique dans cette variante	169
3. Effets redistributifs intergénérationnels dans cette variante (chiffrage du scénario N03 de RTE).....	171
3.1. Premier scénario.....	171
3.2. Second scénario.....	172
3.3. Troisième scénario	173
CHAPITRE 4 : TESTS DE SENSIBILITÉ ET VARIANTES	175
1. Test de robustesse sur les élasticités de substitution dans les fonctions de production et de consommations intermédiaires.....	177
2. Tests de robustesse sur l'élasticité de l'offre de travail au salaire	180
3. Tests de robustesse sur le progrès technique (hausse de 1%)	181

4. Tests de robustesse sur le prix de l'énergie pour les entreprises et les ménages.....	182
5. Test de robustesse sur la part des ménages classiques (vs non-classiques)	184
6. Test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette.....	185
7. Test de robustesse sur le taux d'intérêt réel	187
CHAPITRE 5 : DISCUSSION SUR LE RECOURS À LA DETTE PUBLIQUE POUR FINANCER LES INVESTISSEMENTS ÉLECTRIQUES BAS CARBONE.....	191
1. Discussion sur les effets de chocs fiscaux	192
2. Discussion sur la dynamique de croissance en fonction de l'endettement public dans le modèle	192
3. Dans le modèle, une taxe carbone pèse relativement plus sur le bien-être des ménages jeunes.....	193
4. L'influence du progrès technique sur la croissance et le bien-être des ménages	194
CONCLUSION GÉNÉRALE	195
BIBLIOGRAPHIE.....	199

Liste des tableaux

Tableau 1 : Lecture des effets redistributifs des différentes générations de ménages	67
Tableau 2 : Paramètres du modèle pour les entreprises	79
Tableau 3 : Consommations interbranches en 2017 (en % de la production totale de la branche)	80
Tableau 4 : Chiffrage des coûts d'investissements à partir du mix d'IHS Markit et du chiffrage de RTE et de l'IAE (milliards d'euros)	84
Tableau 5 : Hypothèses et chiffrage RTE pour le calcul des coûts CAPEX et OPEX	85
Tableau 6 : Chiffrage des coûts d'investissements à partir du mix d'IHS Markit et du chiffrage de RTE et de l'IAE	87
Tableau 7 : Autres paramètres utilisés dans le modèle	92
Tableau 8 : Projections de la croissance française sur la période 2022-2050 (différentes sources : OCDE, RTE, IHS Markit, ENEDIS, Enerfuture, COR21, OEF)	101
Tableau 9 : Ensemble des variables exprimées en base 2014 (pour les prix) et en milliards d'euros constants (autres variables) (année de base : 2017)	102
Tableau 10 : Ensemble des variables exprimées en base 2014 pour les prix et en milliards d'euros pour les autres variables (année de référence: 2017)	106
Tableau 11 : Composition de l'impôt générique sur le revenu total	111
Tableau 12 : Résultats macroéconomiques du premier scénario	113
Tableau 13 : Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 1 par rapport au compte central	118
Tableau 14 : Ensemble des variables exprimées en écart dynamique par rapport au baseline (premier scénario)	123
Tableau 15 : Résultats macroéconomiques du second scénario	127
Tableau 16 : Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 2 par rapport au compte central	130
Tableau 17 : Ensemble des variables exprimées écart dynamique par rapport au baseline (second scénario)	137
Tableau 18 : Résultats macroéconomiques du troisième scénario	140
Tableau 19 : Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 3 par rapport au compte central	143
Tableau 20 : Ensemble des variables exprimées en écart dynamique par rapport au baseline (troisième scénario)	147

Tableau 21: Effet d'une hausse du prix de l'énergie sur la consommation des ménages dans les trois scénarios et pour les deux trajectoires d'investissements.....	167
Tableau 22: Résultats (différence entre écarts au baseline) des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 0.1 point de l'élasticité de substitution entre énergie et consommation intermédiaire dans le premier scénario.....	178
Tableau 23: Résultats des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 0.4 point de l'élasticité de de substitution entre valeur ajoutée et consommation intermédiaire dans le premier scénario	179
Tableau 24: Résultats des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 0.1 point de l'élasticité de de substitution entre valeur ajoutée et consommation intermédiaire	180
Tableau 25: Résultats des tests de robustesse supplémentaires sur le modèle d'équilibre général.....	181
Tableau 26: Résultats d'une augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu	182
Tableau 27: Résultats d'une augmentation du prix de l'énergie pour les ménages sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu	183
Tableau 28: Résultats d'un test de robustesse sur la part des ménages non-classiques sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu	184
Tableau 29 : Résultats (en différence par rapport au premier scénario) du test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette à 5 ans après le choc	185
Tableau 30 : Résultats (en différence par rapport au premier scénario) du test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette à 5 ans après le choc	186
Tableau 31: Résultats (en écart dynamique par rapport au baseline) du test de robustesse d'une hausse du taux d'intérêt	187

Liste des graphiques

Graphique 1: Montant moyen de consommation annuel en euros par tête pour la génération des 15-19 ans née l'année 0.....	63
Graphique 2: Montant des actifs en euros par tête pour toutes les générations l'année 0.....	64
Graphique 3: Montant de consommation en euros par tête pour toutes les générations l'année 0.....	65
Graphique 4: Graphique illustrant la dynamique du capital (en euros)	66
Graphique 5: Part (en %) des consommations intermédiaires dans la production en valeur et en volume (1949-2019).....	76

Graphique 6: Coûts CAPEX d’ici 2050 des nouvelles capacités de production d’électricité en vue de la neutralité carbone (en se basant sur le mix d’IHS Markit).....	86
Graphique 7: Coûts OPEX d’ici 2050 (en se basant sur le mix d’IHS Markit).....	86
Graphique 8: Coûts des nouvelles capacités.....	87
Graphique 9: Projections démographiques par âge et total.....	90
Graphique 10: Dépenses de consommation par agent représentatif d’une générations (en euros) et par génération (Mds euros).....	94
Graphique 11: Description du patrimoine financier par tranches d’âges.....	96
Graphique 12 : Part des ménages pauvres pour chaque génération (selon la SRCV de 2018).....	98
Graphique 13: Propension à consommer des ménages classiques (rapport de la consommation au patrimoine) et des ménages non-classiques (rapport de la consommation au revenu courant) en fonction de l’âge	99
Graphique 14: Evolution du taux d’intérêt réel à 10 ans sur la période 1800-2020 (Levy-Garboua et Monnet, 2016)	109
Graphique 15: Stock de capital et sa productivité marginale dans le premier scénario.....	115
Graphique 16: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline)	117
Graphique 17: Part en pourcentage des consommations intermédiaires dans la production sur la période 1949-2019, en valeur et en volume.....	119
Graphique 18: Dette publique et déficit en % du PIB dans le premier scénario en écart au baseline.....	121
Graphique 19: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse de l’impôt sur le revenu dans le premier scénario).....	122
Graphique 20: Stock de capital et sa productivité marginale dans le premier scénario.....	128
Graphique 21: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline) dans le second scénario.....	131
Graphique 22: Dette publique et déficit en % du PIB dans le premier scénario en écart au baseline.	133
Graphique 23: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse de du prix de l’énergie pour les entreprises dans le second scénario)	134
Graphique 24: Stock de capital et sa productivité marginale dans le premier scénario.....	141
Graphique 25: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline) dans le troisième scénario.....	144
Graphique 26: Dette publique et déficit en % du PIB dans le troisième scénario en écart au baseline.	145
Graphique 27: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse de du prix de l’énergie pour les entreprises dans le second scénario)	146
Graphique 28: Dette publique en % du PIB (écart dynamique par rapport au baseline) : comparaison des trois scénarios.....	150

Graphique 29: Déficit public en % du PIB (écart dynamique par rapport au baseline) : comparaison des trois scénarios.....	151
Graphique 30: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) donnée par la SRCV 2018.	152
Graphique 31: Répartition sectorielle de la consommation d'énergie au sein du foyer d'un agent représentatif d'une génération, donnée par la SRCV 2018	153
Graphique 32: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) pour les ménages classiques et non-classiques, donnée par la SRCV 2018.....	154
Graphique 33: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie – en écart au baseline-au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) pour un ménage représentatif d'une génération, donnée par la SRCV 2018	155
Graphique 34: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios, par tranche d'âges et à long terme	158
Graphique 35: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario -financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme.....	159
Graphique 36: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges (à l'années 0) et à long terme.....	161
Graphique 37: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline, par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme	162
Graphique 38: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios par rapport au scénario baseline , pour les jeunes générations, à long terme (démonstration de l'effet prix)	163
Graphique 39: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios et sur toute la période étudiée (variante RTE)	168
Graphique 40: Produit intérieur brut en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios et sur toute la période étudiée (variante RTE)	168
Graphique 41: Investissement et financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique dans nos trois simulations (variante RTE).....	170
Graphique 42: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario (deuxième variante RTE) - financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges et à long terme	172
Graphique 43: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges et à long terme, dans le scénario RTE et celui d'IHS Markit	173
Graphique 44: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios -, par tranche d'âges et à long terme, dans le scénario RTE et celui d'IHS Markit.....	174

Graphique 45: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt réel de 3%..... 189

Graphique 46: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario -financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme, dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt réel de 3%..... 190

Introduction générale

En France, le secteur de l'énergie en général et le parc de production d'électricité en particulier vont connaître de profonds changements dans les prochaines décennies, en lien avec les objectifs de transition énergétique fixés par les pouvoirs publics. Ces changements prendront notamment la forme de programmes d'investissements en actifs de production. Compte-tenu de leurs montants, ces programmes sont susceptibles d'avoir des effets macroéconomiques (sur les volumes comme sur les prix, sur l'accumulation du capital...) et des effets redistributifs intergénérationnels (dans la mesure où ces investissements s'étendent sur plusieurs décennies). Quels peuvent être les effets macroéconomiques et de redistribution intergénérationnelle des investissements bas carbone dans le secteur électrique en France d'ici 2050 ?

L'Accord de Paris de 2015 a permis d'établir un consensus entre les pays sur l'objectif de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en dessous de 2°C et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1.5 °C. Selon le rapport du GIEC, cet objectif nécessite d'atteindre une neutralité des émissions durant la seconde moitié du siècle. Dans le sillage de l'Accord de Paris, le ministère en charge de l'écologie a établi en France un Plan Climat qui fixe un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour atteindre cette neutralité carbone, les montants d'investissements en jeu d'ici les années 2050 seraient importants (80 Mds d'euros/an en moyenne entre 2019 et 2054, « *SNBC* »). En 2017, ce chiffre est de 41,2 milliards d'euros dont 7,4 pour le secteur production d'énergie et réseaux (I4CE, « *Panorama des financements climat*, 2018). Dans le seul secteur électrique, selon le dernier « *Panorama des financements climat* » (I4CE, 2020), le chiffrage est plus ambitieux sur le montant à investir dans le renouvelable. Ainsi, pour les auteurs, pour atteindre les objectifs de la programmation énergétique, il faudrait investir entre 4 et 5 milliards d'euros de plus par an entre 2020 et 2023. Lorsque l'on tire ces montants jusqu'en 2050, on obtient respectivement entre 267 (proche du chiffrage obtenu avec le mix d'IHS Markit) et 298 milliards d'euros d'investissements. Un tel montant d'investissements impliquerait un choc cumulé à hauteur de respectivement 11 à 12% du PIB (PIB de l'année du choc, 2020). En annuel, ce choc est équivalent en moyenne sur la période à 0.4% du PIB par an (PIB de l'année du choc, 2020) : il est donc d'ampleur macroéconomique. Plus récemment, RTE a publié un document (« *Futurs Énergétiques 2050* -

principaux-résultats », 2021) fournissant un chiffrage de 20 à 25 milliards d'euros en moyenne par an sur 40 ans.

Les administrations ont mené différentes évaluations préliminaires¹ des coûts et effets de scénarios avec des hypothèses plus ou moins restrictives sur le renouvellement du parc de production électrique, le développement des réseaux et les usages de l'électricité. Dans la plupart des scénarios disponibles, l'accent est mis sur la nécessité de développer l'offre de production d'électricité décarbonée. Toutefois, ces évaluations négligent les bouclages macroéconomiques et surtout les effets de redistribution intergénérationnelle du financement de ces investissements. De fait, la question de la répartition des coûts et des bénéfices de la neutralité carbone entre les générations est rarement abordée. C'est toutefois bien dans l'intérêt des générations futures que le rapport Stern sur l'économie du changement climatique suggère d'investir rapidement et massivement pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (Stern, 2007). Son rapport conclut qu'il est plus rentable d'investir immédiatement pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, même si cela conduit à un léger fléchissement de la valeur de la production mondiale à court terme (estimé à 1%), plutôt que de faire face aux coûts élevés qu'entraîneront les changements climatiques.

Cette thèse cherche à évaluer, à l'aide d'un modèle d'équilibre général sur données empiriques françaises, les effets macroéconomiques et de redistribution intergénérationnelle de différents modes de financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique d'ici 2050. Le modèle montre que les résultats sont différents selon les modalités de financement, aussi bien sur l'activité économique qu'au niveau des effets redistributifs intergénérationnels.

L'étude des différents effets (effet d'éviction, effet multiplicateur, impact sur les variables macroéconomiques et sur le bien-être des ménages) d'une trajectoire d'investissements dans le secteur de l'électricité visant à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) semble partielle si elle n'est pas complétée par l'étude de l'effet de son mode de financement. En effet, l'effet de ces politiques d'investissements peut être différent en fonction du mode de financement

¹ Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) "exercice de scénarisation" pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (AMS2018) <https://ppe.debatpublic.fr/file/1602/download?token=Xgpm5ET0>. Stéphane Chatelin et Yves Marigna. Scénario négaWatt 2017-2050. Association négaWatt. 2018 https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario_negawatt_2017-2050.pdf. ADEME. Actualisation des scénarios Energie-Climat 2017 <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-29918-ademe-scenario-energie-climat-2035-2050.pdf>. Rémy Doudard *et al* (2017), Dessiner une France zéro émission en 2072.

sélectionné (payé par une augmentation du prix de l'énergie par les agents privés ou par dette publique par exemple).

Étudier l'impact de différents modes de financement alimente la recherche sur l'efficacité de ces financements (sur la croissance et sur le bien-être non-environnemental des ménages). Ce type d'étude permet également de comparer l'efficacité des différentes politiques publiques de financement de ces investissements visant à la fois l'augmentation des investissements privés bas carbone, tout en favorisant les effets positifs - ou en limitant les effets négatifs - sur l'économie et sur le bien-être des ménages. Au-delà d'étudier les effets sur le bien-être des ménages (en agrégé), l'étude des effets redistributifs intergénérationnels des différents modes de financement apparaît comme un outil utile pour les décideurs publics. En effet, en étudiant l'impact des différentes modalités de financement, le décideur politique peut choisir un mode de financement particulier qui favorise une génération précise (les générations âgées par exemple).

La question du mode de financement explique que, dans le cadre de cette thèse, le scénario d'investissements utilisé est le même pour tous les scénarios envisagés. Le scénario de trajectoire d'investissements et des prix de gros est exogène (et issu d'IHS Markit). Ce scénario d'investissements est cohérent avec celui publié dans la « *SNBC* » (version-décembre 2018). En effet, ce dernier document ne montre pas une trajectoire d'investissements bas carbone dans le secteur électrique uniquement mais une chronique d'investissements dans le secteur énergie et réseaux, qui est donc plus large et dont les montants avoisinent les 12 milliards d'euros par an en moyenne sur la période 2020-2050. Concernant la trajectoire d'investissements, des études supplémentaires pourraient toujours être utiles. Elles affinaient par exemple le calcul des trajectoires d'investissement dans les réseaux, ou des coûts supplémentaires induits liés à l'électrification des usages.

La thèse effectue un travail de simulation et non de projection. Son objectif n'est pas de prévoir l'avenir mais de montrer les mécanismes en jeu dans différents scénarios de financement d'une même trajectoire d'investissements sur une période donnée.

Le volume d'investissement retenu pour cette thèse concerne donc uniquement les investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité (source : IHS Markit). Il ne prend pas en compte les investissements bas-carbone dans les autres secteurs. Par exemple, ce calcul ne prend pas en compte les efforts d'efficacité énergétique et les efforts de transfert d'usage (électrification des usages). Nous ne modélisons pas les investissements nécessaires au développement du parc de véhicules électriques et hybrides rechargeables. Nous notons que des investissements dans d'autres secteurs (l'industrie

automobile ou la construction par exemple) auraient donné des résultats différents. En effet, les fonctions de production entre secteurs diffèrent sur plusieurs paramètres : progrès technique, paramètres de pondération, intensité capitalistique et/ou énergétique, part de chaque composante de la demande agrégée, ce qui explique que les résultats diffèrent probablement d'un secteur à l'autre.

Dans cet exercice, nous étudions uniquement le bien-être non-environnemental. Le bien-être environnemental n'est pas mesuré. Le bien-être non-environnemental exclu la qualité de l'environnement comme facteur de bien-être mais prend en compte d'autres critères, comme la consommation et le loisir par exemple (Gonand et Jouvét, 2015). Le bien-être non-environnemental est mesuré à l'aide d'une fonction d'utilité qui inclut, de manière standard, la consommation comme critère principal (King, Plosser et Rebelo, 1998 ; Henriot et al (2014) ; Blazquez, Hunt et Manzano, 2017), voir unique du bien-être d'un ménage. En revanche, le bien être environnemental augmente lorsque l'on observe un accroissement de la qualité de l'environnement ce qui peut augmenter l'espérance de vie des ménages. Par exemple, Etner et Jouvét (2001) incluent une fonction d'utilité intertemporelle (à la Von Neumann-Morgenstern), croissante en fonction de la consommation et décroissante en fonction de la pollution. Dans ce modèle empirique, nous ne mesurons pas l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre de ces investissements bas carbone car on ne connaît pas empiriquement le degré de substituabilité entre la consommation d'une génération et l'environnement.

Le lien entre politiques environnementales² et effets redistributifs intergénérationnels est mentionné par une partie de la littérature, qui utilise des modèles d'équilibre général à générations imbriquées. L'importance d'analyser les effets redistributifs intergénérationnels des politiques environnementales dans un cadre à générations imbriquées (overlapping generations – en abrégé, OLG) a été évoquée par Solow dès 1974. En effet, les modèles à générations imbriquées permettent d'étudier le comportement des agents au cours des différentes phases de leur vie et l'effet du comportement économique de chaque génération sur toutes les autres. Le modèle comporte plusieurs générations d'agents à horizon de vie fini. La plupart des modèles à générations imbriquées (en particulier les modèles théoriques) ont deux ou trois générations

2 La politique environnementale établit divers instruments de politique publique (normes, quota, taxe, dette, etc) pour répondre à des objectifs fixés en matière d'environnement. Dans le cas de la France, la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) - introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) - est la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable. Elle définit une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 2050 et fixe des objectifs à court-moyen termes : les budgets carbone. Les programmes d'action pluriannuels en matière d'environnement, quant à eux, établissent le cadre des actions futures dans tous les domaines de la politique environnementale.

(jeunes, travailleurs mûrs, personnes âgées). John et Pecchenino (1994) développent un modèle qui prend en compte l'effet de la prise de décision des agents mortels sur l'accumulation du capital et la qualité de l'environnement sur les générations suivantes. Howarth (1998) développe un modèle à générations imbriquées pour étudier les interactions entre le climat et l'économie en se basant sur le critère de bien-être entre les générations et une politique de taxation carbone. Bovenberg et Heijdra (1998) développent un modèle à générations imbriquées mesurant les effets d'une taxation environnementale sur l'économie. Nakabayashi (2010) étudie les politiques de taxation dans ce cadre.

La littérature académique disponible n'offre pas d'étude portant exactement sur la question de recherche de cette thèse (à savoir, les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels des investissements bas carbone dans le secteur électrique en France). En revanche, plusieurs ensembles de travaux apportent des éclairages et suggestions qui vont influencer notre travail de modélisation.

Une partie de la littérature étudie de telles interactions entre le volume d'investissement et ses modes de financement.

Hall et al (2017) appellent à l'utilisation de nouveaux instruments financiers pour " aligner le système financier avec les besoins physiques réels d'investissements durables à long terme ". Dans le secteur de l'énergie, la politique publique ou la réglementation du marché, par exemple, sont des contraintes structurelles en plus des contraintes cognitives (sur la prise de décision de l'agent). En effet, dans le cas du secteur de l'énergie, les auteurs affirment que le financement de l'énergie peut être décrit comme un marché adaptatif, plutôt qu'un marché efficace pour résoudre le problème du sous-investissement dans l'innovation et la décarbonisation. Ils concluent que "l'évaluation de l'élément financier de la politique énergétique/climatique encouragerait les décideurs politiques et les chercheurs dans divers domaines à prendre en compte les effets comportementaux (premier domaine), les cadres de tarification et la conception du marché (deuxième domaine), et les obstacles structurels (troisième domaine) lors de la conception d'une politique qui repose sur la mobilisation de sources importantes et diverses de capital financier."

Concernant les modes de financement, différents leviers existent (autofinancement, politique fiscale, dette privée et/ou publique). Dans le cas français, Hainaut et al (2018) ont estimé le coût de l'investissement climatique total à 31,7 milliards d'euros en 2016. Concernant les modes de financement dans les énergies renouvelables, 35% sont payés par la dette privée dans leur modèle. En particulier, la dette privée a financé 80% des investissements en énergies renouvelables électriques en production centralisée (éolien, PV au sol, hydroélectrique). Dans ce cas, " la garantie d'un tarif d'achat stable sur

une longue période a permis de sécuriser un niveau d'endettement élevé dans les bilans des projets de moyenne et grande taille " (CRE, 2014).

Pourtant, la littérature qui étudie les effets redistributifs intergénérationnels se concentre principalement sur la taxe carbone et ses modalités de recyclage. Tullock (1967) et Terkla (1984) ont été parmi les premiers auteurs à s'intéresser aux vertus d'un système de recyclage fiscal efficace qui redistribue au secteur privé le revenu d'une taxe environnementale. Goulder (1995) et Bovenberg et Goulder (2002) traitent du double dividende (c'est-à-dire un effet positif net sur l'activité en plus de la réduction des émissions de gaz à effet de serre) qui découle du recyclage de la taxe environnementale effective par une réduction du coût des taxes de distorsion. Des recherches plus récentes se sont concentrées sur différentes formes de recyclage des recettes de la taxe carbone dans un cadre empirique d'équilibre général avec des OLGs (Carbone et Morgenstern (2013), Rausch (2013), Gonand et Jovet (2015), Gonand, Hasanov et Hunt (2019)).

Une partie de la littérature suggère également de partager le coût entre les générations en émettant des dettes publiques. Dans le cas de la zone euro, les pays ont des règles budgétaires à respecter et ne peuvent pas s'endetter sans limite même s'il apparaît que l'augmentation de la dette publique est un moyen de réaliser une politique environnementale ambitieuse. Cependant, aujourd'hui, dix-huit pays de la zone euro (à l'exception de l'Estonie) se sont engagés à atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050 et des voix s'élèvent en faveur d'un endettement public accru pour financer les investissements environnementaux, permis par un environnement de taux d'intérêt initialement anticipé comme très bas pour la prochaine décennie (voir notamment Blanchard, 2019). En utilisant un modèle OLG simplifié, Blanchard (2019) étudie les coûts de la dette publique dans un environnement de taux d'intérêt bas. La différence entre le taux d'intérêt et le taux de croissance de l'économie détermine si une dette est soutenable ou non. Ainsi, l'accumulation de dette peut être souhaitable si le taux d'intérêt reste inférieur au taux de croissance de l'économie (l'accumulation de richesse permet ainsi de financer le service de la dette). Cet argument plaiderait pour l'augmentation des déficits publics afin de stimuler les investissements en infrastructures et de lutter contre le changement climatique.

Le modèle prend en compte les effets de la dette publique. Il contribue à la littérature OLG disponible dans la mesure où sa dynamique du côté de la demande est détaillée grâce à quinze cohortes différentes modélisées en optimisant leur niveau de consommation, certains ménages de chaque cohorte étant sous contrainte de liquidité. Du côté de l'offre, nous modélisons cinq secteurs économiques différents

avec différents niveaux d'intensité énergétique (agriculture, industrie sans énergie, énergie, construction et services). Cette structure permet de capturer de manière stylisée un riche ensemble de mécanismes de transmission possibles en équilibre général.

Comme tout modèle d'équilibre général, ce modèle est approprié pour étudier les répercussions des politiques macroéconomiques (en l'occurrence, de politiques de financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique) sur une économie et sur les différents agents qui la composent. Le principal avantage de ces modèles est de permettre la prise en compte de diverses interactions économiques et notamment les interactions sectorielles. Ces modèles sont dotés d'une modélisation microéconomique du comportement des agents qui permet d'étudier précisément l'effet des politiques publiques sur leurs comportements.

Nous simulons trois scénarios d'équilibre général qui ne diffèrent que par un seul élément : le mode de financement des investissements publics du secteur de l'électricité, alors que les investissements sont les mêmes dans tous les scénarios. Le scénario 1 suppose que la hausse des investissements bas carbone dans le secteur électrique est financée par de la dette publique (remboursée partiellement par une hausse de l'impôt sur le revenu quelques années après le choc d'investissement). Le scénario 2 modélise une hausse des investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité financée par une hausse des prix de l'énergie qui pèse sur les entreprises uniquement (prix du signal carbone ou taxe sur la consommation d'électricité). Le scénario 3 fait référence à une augmentation des investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité financée par une hausse des prix de l'énergie partagée entre les entreprises (prix du signal carbone ou taxe sur la consommation d'électricité) et les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'électricité).

Tous les scénarios ont un impact négatif net sur l'activité économique (PIB) à long terme par rapport à un scénario de référence sans réforme (-0.69%, -0.75% et -0.7%, respectivement pour les scénarios 1, 2 et 3, en moyenne annuelle sur la période). Cet effet défavorable sur l'activité s'explique principalement par une hausse du prix de l'énergie - qui pèse sur les ménages et les entreprises - et par un effet d'éviction des investissements bas carbone dans le secteur électrique. Cela vaut surtout pour le scénario 2 qui implique des taxes ou un prix du signal carbone sur les entreprises uniquement. La raison principale est que le fardeau du financement est exclusivement porté par les entreprises, qui diminuent (par rapport au baseline) les salaires et le stock de capital dans leur production.

Dans le premier scénario qui implique un financement par la dette publique, l'impact négatif sur les ménages est d'autant plus limité qu'une partie des ménages est contrainte par la liquidité. En effet, dans le modèle, il est supposé qu'une fraction des ménages appartient à la catégorie des ménages non-classiques qui consomment l'ensemble de leur revenu et par conséquent n'épargnent pas et ne disposent pas de patrimoine. Ils ne peuvent pas amortir l'effet du choc dans le temps. Ainsi, l'équivalence ricardienne ne s'applique pas ici, ce qui explique pourquoi ce scénario est en partie plus avantageux. Un autre facteur explicatif tient au délai de remboursement de la dette -mobilisée pour financer ces investissements bas carbone- qui intervient à moyen terme dans le scénario 1, alors que le financement est immédiatement appliqué dès le choc d'investissement dans les scénarios 2 et 3.

Toutefois, il est intéressant de constater que lorsque l'on considère le scénario N03 de RTE qui compte une trajectoire d'investissements plus importante (avec un montant annuel moyen de 19.25 milliards d'euros par an sur la période), en écart moyen sur la période par rapport au baseline, le troisième scénario -financement par les entreprises et les ménages- devient le plus défavorable sur l'activité économique (alors que dans la première variante il s'agissait du second scénario de financement par les entreprises uniquement). Ceci s'explique par le fait que la hausse des prix de l'énergie est sensible, et donc une hausse du prix de l'énergie pour les ménages a un effet relativement plus récessif sur l'activité économique.

Dans tous les scénarios, l'activité du secteur de l'énergie diminue par rapport au scénario de base, mais aussi par rapport aux autres secteurs. En effet, le secteur de l'énergie est le premier à être pénalisé dans le cas d'une hausse des prix de l'énergie dans la mesure où la consommation des ménages diminue, tout comme les consommations intermédiaires énergétiques des entreprises.

La demande d'énergie (en volume) est surtout importante dans le secteur de l'énergie même (49% du total de la demande d'énergie). En effet, la majorité des consommations intermédiaires du secteur de l'énergie sont des produits énergétiques. Ainsi, une hausse du prix de l'énergie a un effet négatif plus élevé pour le secteur de l'énergie (relativement aux autres secteurs)

L'ampleur des effets redistributifs intergénérationnels sur le bien-être non-environnemental des ménages dépend de manière significative du scénario considéré. Dans le scénario 1 (avec dette publique), le scénario 2 (avec un signal de prix de l'énergie pour les entreprises) et le scénario 3 (avec un signal de prix de l'énergie pour les entreprises et les ménages), les générations d'âges intermédiaires et plus âgées sont relativement plus touchées car les effets sur le revenu du capital et du travail

dominent l'impact sur les prix à la consommation (qui est relativement plus important dans le troisième scénario, ce qui pénalise davantage les jeunes). Autrement dit, bien que l'effet négatif sur les prix à la consommation existe et pénalise relativement plus les jeunes, l'effet négatif sur les générations plus âgées domine. Au final, les jeunes sont relativement moins pénalisés dans les trois scénarios.

En effet, deux effets défavorables influencent la consommation des ménages : la baisse des salaires et de la demande de capital des entreprises (qui diminue les revenus du travail et du capital pour les ménages, et donc leur consommation) et la hausse des prix à la consommation (qui pèse aussi sur la consommation des ménages). Le premier effet pénalise davantage les générations intermédiaires et plus âgées (qui ont les revenus du travail et du capital les plus élevés, relativement aux générations plus jeunes) tandis que le second pénalise davantage les jeunes (qui ont un niveau d'actifs relativement plus faible, une plus forte propension à consommer et une proportion relativement plus forte de ménages relativement pauvres, sous contrainte de liquidité).

Si les effets intergénérationnels sont proches entre les deux premiers scénarios - la diminution des revenus du travail explique que la cohorte d'individus âgés de 35-39 ans l'année 0 soit la plus pénalisée, on note que les mécanismes sous-jacents sont différents. Dans notre premier scénario, c'est la hausse de l'impôt générique qui explique cette baisse des revenus du travail tandis que dans le second scénario (et le troisième également), c'est la hausse du coût pour les entreprises qui se transmet par une baisse des revenus du travail pour les ménages (baisse des salaires).

Dans le scénario 3 qui implique une taxe carbone payée par les ménages, les effets redistributifs intergénérationnels pèsent relativement plus (par rapport aux scénarios 1 et 2) sur le bien-être non-environnemental des jeunes et des générations futures, car les effets sur les prix à la consommation dominent. Autrement dit, si l'on fait un focus sur les jeunes générations, on observe bien cet effet prix -qui les pénalisent relativement plus par rapport aux générations plus âgées-.

En moyenne, les effets redistributifs intergénérationnels sont plus contenus lorsque les investissements à faible intensité de carbone sont financés par la dette publique. Si l'on fait la distinction entre types de ménages, le résultat est plus nuancé. Si le deuxième scénario impacte plus fortement la consommation des ménages sous contrainte de liquidité (car l'impact sur les revenus du capital et du travail est plus fort), le troisième scénario est celui qui pénalise le plus les ménages classiques car ce scénario diminue davantage le volume de la consommation.

Dans l'ensemble, nos simulations sur des données françaises suggèrent que le financement par la dette publique des investissements à faible intensité de carbone dans le secteur de l'électricité pourrait être relativement moins préjudiciable à la croissance. Au niveau des effets redistributifs intergénérationnels, ce scénario est moins pénalisant qu'un scénario avec taxe carbone pour les ménages et signal prix carbone pour les entreprises -qui détériore davantage la consommation des ménages-.

Nous supposons qu'il n'y a pas d'effet d'éviction de la dette publique sur les investissements privés ni sur le taux d'intérêt. La première hypothèse n'est pas nécessairement très contraignante. Selon la théorie de "l'effet d'éviction", la dette publique absorbe une partie de l'épargne nationale et réduit en conséquence l'investissement privé, ce qui pourrait peser sur le bien-être des générations futures. Toutefois, un travail de l'OFCE (2021) considère que, dans le cas de la France, la baisse des taux d'intérêt réels depuis plus de quarante ans suggère que l'augmentation de l'épargne privée globale aurait plus que compensé la hausse de la dette publique globale malgré l'augmentation spectaculaire de cette dernière. Les faibles taux d'intérêt mondiaux indiquent que la faiblesse des investissements observée dans le monde entier ne serait peut-être pas due principalement à un effet d'éviction de la dette publique.

La deuxième hypothèse – relative à l'absence d'effet du niveau de la dette publique sur le taux d'intérêt – soulève des questions intéressantes. Avec la paramétrisation de notre modèle, le taux d'intérêt réel est inférieur au taux de croissance réel, comme pour Blanchard (2019). Nos résultats sur données françaises peuvent alimenter le débat actuel lancé par Blanchard sur les implications intergénérationnelles supposées limitées de l'accumulation de la dette publique. Nous confirmons en partie empiriquement ce résultat dans le contexte d'une transition à faible émission de carbone financée par la dette. En effet, nous constatons que la dette publique peut être un bon moyen de réduire de manière significative les implications négatives globales d'une transition à faible émission de carbone sur l'activité - dans un environnement à taux d'intérêt bas-. En termes de bien-être, l'effet négatif est limité par rapport au financement par les ménages et les entreprises. Toutefois, le scénario 2 (financement par les entreprises uniquement) et sa plus forte récession entraîne une diminution des prix à la consommation et donc un niveau de consommation plus élevé pour les ménages.

En effectuant quelques tests, on constate qu'il faudrait une baisse du niveau de PIB plus élevée pour que le différentiel entre le taux d'intérêt réel et le taux de croissance du PIB devienne positif. Cette baisse est bien plus forte que celles constatées dans nos scénarios (partie – Effets macroéconomiques – description du premier scénario -). Ainsi, le taux de croissance réel est supérieur au taux d'intérêt réel

de l'économie sur toute la période³. Dans le cas d'une hausse des taux d'intérêt réels de 3%, dans les trois scénarios, les résultats changent par rapport à notre variante principale. Ainsi, dans les trois scénarios, l'effet sur la valeur ajoutée est positif à court terme (on a une substitution capital-travail⁴) par rapport au baseline, mais devient négatif à long terme. Les résultats de cette variante nous montrent que dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt de 3%, c'est le financement conjoint par les entreprises et les ménages qui devient le plus avantageux au niveau agrégé, et avec des effets de redistribution intergénérationnelle qui favorisent relativement les jeunes actifs et les actifs proches de la retraite.

La thèse comporte quatre parties. La première partie dresse l'état de la littérature, organisé en quatre thématiques relatives à une transition bas carbone dans le secteur de l'électricité : i) besoin d'investir massivement, ii) taxe carbone et prix de l'énergie, iii) besoin d'augmenter le progrès technique à travers une hausse des investissements dans la recherche et le développement et iv) considérer les modalités de financement des investissements. Un deuxième chapitre est consacré à une brève description des modèles à générations imbriquées et les modèles d'équilibre général calculable.

La deuxième partie présente notre modèle d'équilibre général, qui s'inspire d'un modèle d'équilibre général calculable côté offre, et d'un modèle d'équilibre général à générations imbriquées côté demande. Dans cette partie, un premier chapitre présente le lien entre la modélisation adoptée pour répondre à cette question de recherche et la littérature. Autrement dit, nous verrons dans quelle mesure le modèle ressemble à un modèle d'équilibre général calculable (CGE) côté offre et à un modèle à générations imbriquées (OLG) côté demande. Le deuxième chapitre décrit l'intégralité de la modélisation. Le troisième chapitre décrit la paramétrisation et la calibration, avec une section dédiée à la description de la trajectoire d'investissements bas carbone dans le secteur électrique ainsi que la trajectoire des prix de gros de l'électricité associés.

La troisième partie décrit les résultats obtenus quant aux effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels des différents scénarios de financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique. Le premier chapitre et le deuxième chapitre présentent les résultats obtenus. Le

³ Le taux d'intérêt est exogène dans le modèle mais afin de tester la validité de nos résultats nous avons réalisé un test de sensibilité en cas de forte hausse du taux d'intérêt réel. Les résultats sont dans la sous-section : Partie III-Chapitre 3- 7. Test de robustesse sur le taux d'intérêt réel.

⁴ En effet, face à une hausse du taux d'intérêt, le coût du capital augmente (hausse du coût d'usage) entraînant une diminution du stock de capital (dans les trois scénarios). En réaction, le coût du travail augmente moins rapidement (il diminue par rapport au baseline) et la quantité de travail augmente. En somme, la hausse du travail en volume compense la baisse du capital et explique la hausse de la valeur ajoutée à court terme (on a une substitution capital-travail).

troisième chapitre décrit les effets d'une trajectoire d'investissements plus élevés. Le quatrième chapitre décrit les résultats des tests de sensibilité. Le quatrième chapitre clôt la partie sur une discussion.

PARTIE I. Littérature disponible

Nous présentons la littérature traitant du lien entre la transition bas carbone (notamment dans le secteur de l'électricité), la macroéconomie et ses effets redistributifs, dans la mesure où elle peut nous aider à répondre à la question de recherche de cette thèse. Nous tirons les principales leçons de cette littérature pour réaliser une politique environnementale visant à réduire les émissions de carbone tout en préservant l'équité intergénérationnelle, en mettant l'accent sur les investissements dans le secteur de l'électricité.

L'enjeu de la décarbonation du secteur énergétique est important. Premièrement, il s'agit de développer les sources renouvelables, l'hydraulique et peut-être le nucléaire (notamment dans le cas français, où le sujet suscite un débat agité) tout en utilisant moins de combustibles fossiles. Deuxièmement, l'évolution de la demande d'électricité dans les années à venir dépend entre autres des progrès en matière d'efficacité énergétique. Troisièmement, l'électricité à faible teneur en carbone est également nécessaire pour décarboniser d'autres secteurs, en particulier le secteur des transports.

La littérature suggère comment les politiques publiques et les décisions d'investissement des agents dans le secteur de l'énergie peuvent i) avoir un impact sur l'évolution du mix électrique vers des technologies moins intensives en carbone ; ii) influencer la demande d'électricité en suivant à la fois l'évolution des prix de l'énergie et le développement de nouveaux usages de l'électricité (par exemple, les voitures électriques...) ; iii) déclencher des effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels en fonction du mode de financement de ces investissements et des politiques publiques (taxe carbone, subventions, réglementations).

Globalement, la littérature qui m'intéresse pour répondre à ma question de recherche tend à se concentrer sur quatre dimensions d'une politique visant à réduire les émissions de carbone.

Premièrement, l'allocation du volume d'investissements nécessaire pour atteindre la neutralité carbone. Certains auteurs ont mis l'accent sur la mauvaise allocation de l'épargne privée pour expliquer le faible niveau d'investissement dans la qualité environnementale (John et Pecchenino, (1994). D'autres auteurs justifient le faible niveau des investissements environnementaux par l'altruisme (Jouvet, Michel et Pestieau (2000)) ou par les stratégies de court terme des marqueurs politiques (Agénor et al (2018)) ou encore par le climat d'incertitude qui caractérise nos économies (Etner, Caballero et Pindyck (1996) ;

Bloom (2009) ; Jouvét (2001), Baker, Bloom et Davis (2016) ; Heijdra et Heijnen (2018)). Dans le cas du secteur de l'énergie, Siegmeier *et al.* (2017) mentionnent des investissements qui peuvent être dédiés à l'efficacité énergétique par le biais de subventions de recherche.

Deuxièmement, les signaux de prix (à travers la taxe carbone et le prix de l'énergie) peuvent avoir un impact sur les décisions d'investissement des agents. Certains auteurs mettent en relation les coûts technologiques, les coûts de production, les prix de l'énergie et le volume des investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité (Morris et al (2010), Lennox et al (2015), Fragkos et al (2017) ; Hainaut et al (2018) ; Argentiero et al (2018)) ou dans les changements techniques économes en énergie (Hassler et al (2012)). La taxe carbone peut également impliquer un certain schéma de redistribution à travers différents types de compensations qui peuvent viser : i) à investir directement dans les technologies bas carbone et dans les infrastructures (Schwerhoff et al (2017) ; Cao, Wang, et Wang (2017)) ; ii) à financer des subventions aux investissements bas carbone (Rivers et al (2005) ; Dam (2011) ; Acemoglu et al (2012) ; Ahamada, Fodha et Kirat (2017)).

Troisièmement, investir dans l'efficacité énergétique par le biais de subventions à la recherche sur les économies d'énergie fossile peut également freiner la trajectoire des émissions de carbone (Henriet, Maggiar, et Schubert (2014, 2016)) et améliorer les effets macroéconomiques (Fischer et Springborn (2011)).

Quatrièmement, plusieurs modes de financement des investissements bas carbone ont été identifiés dans la littérature (Hainaut et al, 2018 ; Ferry, 2019 ; Blanchard, 2019) mais guère dans un cadre qui étudie les effets redistributifs intergénérationnels, sauf dans le cas de la taxe carbone et de ses dispositifs de recyclage.

Nous étudions alors le cas de l'utilisation de la modélisation OLG pour aborder les effets redistributifs intergénérationnels des investissements bas carbone en nous concentrant sur le secteur électrique. L'importance d'analyser les effets redistributifs intergénérationnels des politiques environnementales dans un cadre OLG a notamment été mentionnée par Solow dès 1974. En effet, les modèles à générations imbriquées permettent d'étudier le comportement des agents au cours des différentes phases de leur vie et l'effet du comportement économique de chaque génération sur toutes les autres. Le modèle comporte plusieurs générations d'agents (les agents n'ont pas un horizon de vie infini). La plupart des modèles à générations imbriquées (notamment les modèles théoriques) comportent deux ou trois générations (jeunes, âges intermédiaires, personnes âgées).

La structure de cette partie est donc la suivante. La section (I) analyse la littérature relative à la nécessité d'investir dans la transition énergétique pour décarboniser l'économie. La section (II) traite des effets d'une taxe carbone et/ou des prix du carbone sur ces investissements. La section (III) traite de la littérature relative à l'amélioration de l'efficacité énergétique, des subventions et de leur impact sur les investissements dans la transition vers une économie à faible émission de carbone. La section (IV) discute du manque relatif de littérature sur les implications des différentes manières de financer les investissements (que ce soit par de la dette publique, ou par une taxe carbone -recyclée ou non). La section (V) soutient que l'analyse précise de la question de la thèse nécessite la construction d'un modèle CGE-OLG (Modèle d'équilibre général comptable à générations imbriquées).

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

1. Littérature sur la question du volume des investissements bas carbone et de leur allocation

Alors que la littérature académique sur la transition vers une économie à faible émission de carbone et ses conséquences économiques est très vaste, beaucoup moins d'articles traitent du volume des investissements nécessaires et de leur répartition sectorielle.

Tout d'abord, une littérature s'est concentrée sur le lien entre les investissements nécessaires à la réduction des émissions de carbone et le taux d'actualisation socio-économique.

Cette littérature mentionne la sensibilité du coût en bien-être - et, en fin de compte, du volume des investissements à faible intensité de carbone - du changement climatique au niveau du taux d'actualisation. Ce lien entre les investissements bas carbone et le taux d'actualisation est évoqué depuis les années 1990, comme le mentionne Padilla (2002). En effet, le niveau du taux d'actualisation est particulièrement important dans le cas des investissements visant à réduire les gaz à effet de serre (Broome, 1992 ; Cline, 1992 ; Nordhaus, 1994 ; Fankhauser, 1994) car un taux d'actualisation élevé implique des efforts moindres pour atténuer les gaz à effet de serre. Ainsi, certains auteurs préconisent un taux d'actualisation social plus faible (Daly et Cobb, 1989 ; Cline, 1993). Pour Cline (1993), le choix du taux d'actualisation n'est pas une question importante pour un projet qui dure cinq à dix ans alors que, par exemple, pour un projet de 200 ans ou plus (comme dans le cas du projet Cigéo d'enfouissement de déchets radioactifs), la différence est extrême. Ainsi, pour l'auteur, à très long terme, le taux d'actualisation sera probablement plus faible qu'à court terme.

En utilisant un modèle OLG, Krysiak (2010) étudie les impacts de différents scénarios qui ne diffèrent que par leurs taux d'actualisation : le scénario Stern, le scénario Nordhaus et leur propre scénario (incorporant un taux de préférence temporelle pure cohérent avec Nordhaus (2008) et une probabilité d'extinction tirée de Stern (2006)). L'objectif de l'auteur est de comparer la valeur actuelle des coûts du changement climatique calculée -avec son schéma d'actualisation- avec la valeur actuelle obtenue avec les approches conventionnelles. Tous les scénarios modélisent un cas où, pour les 250 prochaines années, il n'y a pas de politique climatique et comme mentionné, la seule différence entre les scénarios

est basée sur la valeur du taux d'actualisation. L'auteur calcule les coûts du changement climatique pour l'économie (coût en PIB, en USD) de 2005 à 2205 sans intervention politique, et avec les mêmes trajectoires de production d'émissions et d'investissement dans tous les scénarios. Dans le scénario Nordhaus, les facteurs d'actualisation (0.12 et 0.0004 respectivement pour 2055 et 2205) et la valeur actuelle du changement climatique (22 trillions d'USD 2005) sont inférieurs à ceux du scénario Stern (0.2 et 0.006 respectivement pour 2055 et 2205 et 84 trillions d'USD 2005). Dans le troisième scénario, les résultats sur la valeur actuelle du changement climatique diffèrent entre une situation sans changement démographique (0.15 et 0.0036 respectivement pour 2055 et 2205 et 52 000 milliards d'USD 2005) et un cas avec changement démographique (0.27 et 0.005 respectivement pour 2055 et 2205 et 83 000 milliards d'USD 2005).

À cette sensibilité au taux d'actualisation social du bien-être lié au changement climatique, s'ajoute l'incertitude sur la valeur de ce taux d'actualisation social. Nous n'abordons ici que brièvement cette vaste question. Pour Weitzman (1998), comme le taux d'actualisation prend en compte l'incertitude liée au futur lointain, il peut diminuer au fil du temps, d'une valeur estimée pour la période actuelle à des valeurs très faibles pour les périodes futures. Certains auteurs considèrent un taux d'actualisation temporel relativement faible. La Garnaut Review (2008) utilise 0.05% pour le taux de préférence temporelle pure, proche du Stern Review (2007). En effet, le rapport estime qu'un taux de préférence temporelle pur proche de zéro est approprié car un taux de préférence temporelle pur positif correspond au risque d'extinction de l'humanité au cours d'une année donnée. Au contraire, d'autres préconisent un taux de préférence temporelle pur relativement élevé, comme Nordhaus (1994, 2008) qui a utilisé une valeur égale à 1.5 % ou plus, afin d'obtenir un taux d'actualisation global correspondant au coût global du capital pour l'économie. Comme mentionné par Arrow et al. (2012), "l'incertitude subjective concernant la tendance et la volatilité de la croissance de la consommation, telle que modélisée dans Weitzman (2007, 2004) et Gollier (2008), conduira à une baisse du taux d'actualisation". Gollier (2008) suggère un taux d'actualisation de 4% pour un an ou deux ans et de 1% pour un horizon d'un siècle, d'autres actions pouvant être entreprises pour compenser la sous-accumulation intrinsèque du capital environnemental (due au non-altruisme, à l'incertitude et à la mauvaise allocation de l'épargne). C'est donc aux générations actuelles de fournir des efforts et aux gouvernements actuels de financer les politiques environnementales.

Deuxièmement, certains ouvrages étudient la relation entre un éventuel manque d'altruisme intergénérationnel de la part des agents économiques et des décideurs politiques et un éventuel niveau sous-optimal d'investissements à faible émission de carbone.

En utilisant un modèle de croissance intertemporelle, Jouvét, Michel, et Pestieau (2000) étudient le lien entre l'altruisme ou le non-altruisme et le niveau sous-optimal des investissements déclenchant la réduction de la pollution. Les altruistes (laissant des legs à leurs descendants) ont tendance à investir davantage dans la qualité de l'environnement tout en consommant moins par rapport aux non-altruistes. Les agents altruistes savent que la qualité de l'environnement est bénéfique pour le bien-être de leurs descendants. La situation de "laissez-faire" (c'est-à-dire une situation sans intervention publique) est caractérisée par une sous-contribution à la qualité environnementale de la part de tous les agents et par une suraccumulation de capital (en raison du niveau excessif des legs des altruistes). Dans cet article, pour atteindre le niveau optimal de capital, le gouvernement introduit une taxe sur le capital. Pour que les conditions de laissez-faire restent inchangées pour les agents, une subvention sur leurs contributions à la qualité de l'environnement est nécessaire. Les résultats montrent qu'étant donné qu'ils agissent initialement comme des passagers clandestins, les non-altruistes peuvent recevoir une subvention plus élevée que les altruistes pour un même volume de contribution.

À l'aide d'un modèle de croissance endogène à générations imbriquées (OLG), Agénor *et al.* (2018) étudient les impacts macroéconomiques et de bien-être des réformes du marché du travail, en considérant différents critères. Ils concluent qu'un défi majeur consiste à "créer le consensus politique nécessaire pour faire face à de puissants intérêts particuliers et atténuer les arbitrages dynamiques entre les coûts (à court terme) et les gains (à plus long terme)". Les décideurs politiques peuvent avoir des stratégies à court terme en raison de la durée d'un mandat électoral et peuvent donc remettre à plus tard la mise en place de politiques à long terme. Cette observation peut limiter la mise en place de politiques climatiques, car les politiques environnementales incluent des projets à long terme (investissements principalement). Il est donc nécessaire de trouver des mécanismes permettant de partager les bénéfices de ces politiques entre les générations.

Troisièmement, une autre limite à l'investissement bas carbone qui peut être mentionnée est le niveau d'incertitude de nos économies. À l'aide d'un modèle simple de marché concurrentiel avec des rendements d'échelle constants et un coût d'entrée irrécupérable, Caballero et Pindyck (1996) étudient l'effet de l'incertitude idiosyncrasique sur l'entrée des entreprises sur le marché, l'investissement et les prix. Ils suggèrent qu'un doublement de l'incertitude entraîne une augmentation

de 20% du coût du capital, ce qui conduit à une diminution de l'investissement. Par conséquent, l'incertitude relative concernant l'ampleur du changement climatique futur peut augmenter le coût du capital et peser sur le niveau des investissements à faible émission de carbone. Les politiques optimales appliquées par les décideurs peuvent entraîner des améliorations de Pareto. Sans intervention, l'effet incertain d'un type de capital sur la qualité de l'environnement peut réduire le niveau global des économies par le biais de deux effets principaux (Etner et Jovet (2001). Etner et Jovet (2001) indiquent qu'investir dans des entreprises dont l'impact du capital sur l'environnement est incertain incite les investisseurs à investir plutôt dans des entreprises non polluantes, même si les rendements sont plus faibles. Ainsi, les agents averses au risque réduisent la part de leur capital incertain dans leur portefeuille et augmentent leur consommation, réduisant le niveau global d'épargne (effet direct). Les agents peuvent également augmenter la part de capital neutre (le capital ne produit aucune externalité) dans leur portefeuille, ce qui entraîne une baisse du rendement de leur capital (en supposant que le capital neutre a un rendement plus élevé que le capital incertain) et une diminution de l'épargne si l'effet de substitution domine.

Bloom (2009) aborde la question du lien entre l'incertitude du changement climatique et ses effets macroéconomiques. En développant un modèle avec un second moment variable dans le temps, il trouve qu'une plus grande incertitude conduit les entreprises à interrompre temporairement leurs investissements et leurs embauches. En utilisant un nouvel indice d'incertitude de la politique économique dans un modèle VAR, Baker, Bloom et Davis (2016) trouvent que l'incertitude politique pèse sur l'investissement et l'emploi dans, par exemple, la construction d'infrastructures.

Dans un modèle stylisé d'économie-écologie présentant de multiples équilibres écologiques déterministes à l'état stable, Heijdra et Heijnen (2018) constatent que dans un environnement incertain, les politiques publiques sont nécessaires pour atteindre l'objectif environnemental afin de compenser la sous-accumulation des investissements dans la qualité environnementale qui est observée dans la situation de laisser-faire. En supposant que l'équation d'état de la régénération environnementale est frappée par des chocs aléatoires et que la fonction de régénération est non linéaire, les auteurs constatent que l'économie de marché stochastique non gérée conduit à " des époques de longue durée pendant lesquelles la qualité environnementale reste très élevée alors qu'à d'autres moments, le système écologique est piégé en fluctuant autour d'un équilibre fortement pollué ". Ainsi, l'intervention publique permet d'éviter le piège de la mauvaise qualité car le décideur politique gère l'allocation sur l'intensité du capital et la qualité environnementale préexistantes.

En utilisant un modèle d'équilibre général à générations imbriquées avec des externalités environnementales provenant à la fois de la production et de la consommation, Dao et Dávila (2014) font le lien entre le niveau du taux d'actualisation, le niveau de pollution et le niveau de technologie et d'investissement de maintien de l'environnement. Même avec un faible taux d'actualisation et un régime fiscal et de transfert efficace, le maintien d'un niveau élevé d'investissements verts est nécessaire pour atteindre un équilibre économique à long terme tout en préservant le bien-être intergénérationnel des agents. Dans leur modèle, la pollution provient à la fois des entreprises et des ménages et lorsque le taux d'actualisation est égal à zéro (le bien-être de toutes les générations est considéré de manière égale), le niveau optimal de capital correspond à un niveau réduit de pollution et à un niveau élevé de technologie de préservation de l'environnement.

D'autres mécanismes peuvent permettre d'augmenter le volume des investissements à faible intensité de carbone. Dans une économie caractérisée par une suraccumulation globale de capital mais un niveau insuffisant d'investissement dans la réduction des émissions, Rezai, Foley et Taylor (2012) suggèrent de mettre en place des institutions favorisant la transparence des coûts par un signal de prix approprié. Ce mécanisme peut prendre différentes formes (plafonnement et échange de permis, taxe carbone optimale ou réglementation directe) tout en conduisant à des scénarios avec un niveau réduit d'investissement total en capital pour la génération actuelle mais une augmentation à la fois de la consommation actuelle et des investissements d'atténuation. Les générations futures peuvent profiter d'un niveau de production et de consommation plus élevé tout en bénéficiant d'une meilleure qualité environnementale.

Au-delà de ces études académiques concernant le volume des investissements nécessaires pour atteindre la neutralité carbone, la littérature aborde également la question de la répartition de ces investissements entre les différents secteurs.

La littérature tend à affirmer que les décideurs politiques pourraient stimuler les investissements dans les infrastructures, en particulier dans les secteurs du transport et du bâtiment, car ces secteurs concentrent la majeure partie des émissions. En ce qui concerne le secteur des transports, Schwerhoff et al. (2017) conseillent d'investir dans les transports à faible émission de carbone (rails, pistes cyclables, chargeurs de véhicules électriques, etc.)

Dans le secteur de l'énergie, la littérature explique qu'au-delà de l'investissement dans les technologies bas carbone, le planificateur peut également investir dans des subventions de recherche pour augmenter l'efficacité des technologies bas carbone. Sur la base d'une enquête, Siegmeier *et al.* (2017)

étudient les externalités positives des dépenses publiques dans un cas de politique stricte d'objectif d'atténuation du changement climatique et suggèrent un argument en faveur des subventions de recherche ou des subventions pour les activités de R&D dans le secteur de l'énergie.

Conformément aux conclusions fournies par la littérature, les résultats empiriques de l'Agence internationale de l'énergie (2017) soulignent la question du sous-investissement et abordent la nécessité d'investir des volumes importants pour atteindre l'objectif environnemental suivant. Selon l'Agence, limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale bien en dessous de 2°C nécessite un " doublement des investissements annuels moyens liés à l'énergie par rapport aux niveaux actuels " et " le défi est plus important dans les secteurs d'utilisation finale tels que l'industrie, les transports et les bâtiments ". Ces volumes pourraient être alloués par le biais de subventions aux activités de R&D et d'investissements dans des infrastructures nouvelles ou anciennes (principalement dans les secteurs du bâtiment et des transports, qui émettent le plus de gaz à effet de serre), en plus d'être investis dans des technologies à faible émission de carbone.

Dans l'ensemble, la littérature fournit des résultats intéressants concernant le volume des investissements à faible intensité de carbone à l'échelle globale, mais moins en ce qui concerne le secteur de l'électricité lui-même. Si la classe des modèles bottom-up modélisent le secteur de l'énergie (tout en intégrant le secteur de l'électricité de manière détaillée), ces modèles ne prennent pas en compte les bouclages macroéconomiques et ne permettent pas de mesurer les effets redistributifs intergénérationnels. En l'occurrence, notre modèle est sectoriel, comprenant cinq secteurs (agriculture, énergie, industrie hors énergie, construction, services) dont le secteur de l'énergie, où l'électricité représente 85% de la production primaire en volume et 60 % de la production primaire en valeur du secteur de l'énergie (selon les Service des données et études statistiques, SDES, pour l'année 2020).

2. Taxe carbone, prix de l'énergie et volume d'investissements bas carbone dans la littérature

Selon la littérature, l'utilisation des signaux de prix est un moyen de réduire les émissions de carbone tout en finançant des investissements à faible intensité de carbone. Dans ce cas, il existe deux signaux de prix : la taxe carbone et le prix de l'énergie. Si la taxe carbone est directement gérée par les autorités publiques, ce n'est pas le cas du prix de l'énergie qui est également influencé par les coûts des

technologies et le coût du transport par exemple et qui est donc particulièrement lié aux investissements électriques à faible émission de carbone. La littérature mentionne que le soutien public peut aider à réduire ces coûts de production (et donc influencer le rythme des investissements futurs) par le biais i) de subventions et/ou ii) d'investissements augmentant le progrès technique dans ces technologies, conduisant à une réduction des coûts de production.

2.1. Prix de gros de l'énergie

Dans cette section, nous présentons la littérature analysant les liens entre les coûts énergétiques et les investissements à faible teneur en carbone dans des modèles d'équilibre général.

De nombreuses études expliquent les déterminants des coûts de production et leurs impacts sur les investissements bas carbone. Les coûts de production dans le secteur de l'énergie peuvent influencer les prix de l'énergie et donc le rythme futur des investissements à faible émission de carbone dans le secteur de l'énergie. La littérature montre que les décideurs politiques peuvent influencer ces coûts par le biais de subventions et d'investissements publics directs dans le changement technologique. Nous présentons les résultats des articles en fonction des types de modèles utilisés.

En utilisant un modèle EGC hybride, Bohringer *et al* (2006) ont analysé les effets d'une subvention aux sources d'énergie renouvelables (biomasse, sources éoliennes et solaires) financée par le secteur public par le biais de transferts forfaitaires. Dans cette politique, la production d'électricité à partir du gaz naturel et du pétrole diminue en 2020 par rapport au scénario BAU (« Business as usual »), tandis que celle à partir de l'éolien et de la biomasse augmente. La production d'énergie nucléaire, de charbon et d'hydroélectricité se stabilise. Les subventions accordées aux sources renouvelables font baisser les prix de l'électricité de 2.3 % en 2020, par rapport au scénario BAU. Ce mécanisme fait augmenter la demande d'électricité (de 0.7 % par rapport au scénario BAU). Les émissions de carbone diminuent de 2.6 % par rapport au scénario BAU. La part croissante des énergies renouvelables dans le mix électrique réduit les émissions de carbone car les technologies à faible teneur en carbone remplacent partiellement les technologies fossiles. Cependant, cet effet est partiellement compensé par l'augmentation de la production d'électricité due aux subventions à l'électricité qui a un effet décroissant sur les prix de l'électricité.

À l'aide d'un modèle de système d'équilibre calculable intertemporel, Lennox et al. (2015) démontrent que les investissements dans le changement technologique peuvent réduire les coûts de production, entraînant ainsi une augmentation des investissements dans l'éolien et le solaire. En effet, le changement technique réduit le coût de remplacement des technologies solaires et éoliennes, ce qui entraîne une augmentation de leur taux de location du capital. Cela rend ces technologies moins chères et augmente l'incitation à investir dans ces secteurs.

En utilisant un modèle théorique, Lennox & Witajewski (2014) étudient l'impact des coûts d'obsolescence sur la transition vers une croissance propre. Ils montrent que lorsque les agents sont prospectifs, le coût d'obsolescence plus élevé (via une augmentation du taux de changement technologique spécifique à l'investissement) peut conduire à un effet négatif sur l'investissement à court terme et à un effet positif à long terme.

À l'aide d'un modèle de croissance endogène, Senni et al. (2017) étudient comment les retombées technologiques et l'élasticité de substitution peuvent affecter le coût de la transition énergétique. Cette analyse permet d'évaluer le niveau attendu des investissements électriques bas carbone jusqu'en 2050, car leurs niveaux d'investissements dans le temps sont liés à l'évolution des coûts des technologies bas carbone. En effet, les faibles coûts de production dans le secteur propre incitent à investir dans ce secteur. Une élasticité de substitution plus élevée entre un secteur polluant et un secteur propre, lorsque le secteur polluant est relativement plus productif, entraîne une diminution de la part de capital allouée au secteur propre (au profit du secteur moins productif). Ainsi, le niveau de subvention requis est plus élevé. Dans le cas de l'Allemagne, l'excès de subventions peut être partiellement expliqué par une élasticité de substitution plus élevée que celle prévue. En ce qui concerne les effets économiques, cette politique a un coût du côté de la demande (puisque la subvention est finalement payée par les consommateurs) et du côté de l'offre (par des prix négatifs).

Des volumes d'investissements élevés peuvent également entraîner une hausse des prix de gros de l'énergie, ce qui conduit à une augmentation des prix de l'énergie tout en étant accompagnée d'autres politiques environnementales (comme la taxe sur le carbone, la réglementation). Fragkos et al (2017) étudient les objectifs de décarbonation et leur effet sur l'activité, les politiques et le système énergétique. En utilisant un modèle d'équilibre général calculable en complément du modèle PRIMES, les auteurs simulent un scénario dans lequel l'objectif de neutralité de 2050 est atteint. Dans ce scénario, les mesures pour atteindre l'objectif environnemental (incluant les investissements, la taxe carbone, la réglementation) sont imposées. Les principaux résultats de

toutes les mesures intégrées dans ce scénario sont un changement significatif du mix énergétique, une augmentation du prix de l'électricité pour les utilisateurs finaux mais un faible effet sur le PIB de l'Union européenne (1% par rapport au scénario de référence). Les politiques de décarbonation simulées se traduisent par des améliorations de l'efficacité énergétique et des progrès techniques en matière de réduction des émissions, une pénétration accrue des énergies renouvelables, un passage du carburant au gaz naturel, une augmentation des sources d'énergie renouvelables et des investissements dans l'efficacité énergétique. Les auteurs concluent que pour atteindre l'objectif de neutralité carbone de 2050, l'électrification de la demande finale est décisive. Cela inclut l'électrification des transports mais aussi la décarbonisation de l'approvisionnement en électricité. En ce qui concerne les investissements à faible intensité de carbone dans le secteur de l'énergie et les prix de l'énergie, la simulation révèle différents résultats : i) une baisse des achats d'énergie ; ii) une augmentation du prix moyen de l'électricité pour les utilisateurs finaux en raison de la hausse des prix des importations de combustibles fossiles, des coûts d'investissement dans la production d'électricité, du remplacement des anciens équipements, de la baisse des facteurs de charge et des besoins supplémentaires en capacités de secours ; iii) une augmentation des investissements annuels dans le réseau électrique (lignes électriques, réseaux intelligents, installations de stockage, nouveau réseau à courant continu pour l'exploitation des ressources renouvelables éloignées, etc.)

À l'aide d'un modèle d'équilibre général stochastique dynamique (DSGE), Argentiero et al. (2018) montrent les impacts sur les prix de l'énergie de deux types d'investissements visant à accroître les investissements à faible intensité de carbone dans le secteur de l'énergie. Ils comparent le rapport coût-efficacité de deux instruments (financés par les recettes de la taxe environnementale) : une subvention à la R&D (instruments de pression technologique) ou une subvention du prix des sources d'énergie renouvelables (instruments de pression de la demande). Dans les deux cas, les prix des sources d'énergie renouvelables (SER) et les prix de l'énergie diminuent, tandis que la production d'énergie augmente (surtout dans le cas des investissements en R&D). Les auteurs simulent la date de parité des prix pour chaque scénario (2019 dans le premier cas, et 2028 pour la seconde politique), définie comme l'année à laquelle les sources d'énergie renouvelables deviennent compétitives par rapport aux sources d'énergie fossiles sans soutien financier public (taxe carbone et subvention publique, financement du stock de capital). Enfin, les auteurs soulignent que la maturité encore relativement faible de certaines sources d'énergie renouvelables nécessite d'investir largement sur ces technologies.

Hainaut *et al.* (2018) développent une analyse de l'évolution du coût relatif de chaque technologie et de son impact sur les investissements dans les technologies bas carbone dans le secteur électrique. Les investissements dans le solaire et l'éolien peuvent être analysés comme une combinaison d'effets de volume (ajouts de capacités en MW) et d'effets de prix (évolution du coût unitaire des nouvelles capacités). Au cours de la période 2011-2013, les investissements dans les capacités solaires ont chuté en raison d'une réduction à la fois du volume et des prix, tandis que depuis 2013, la hausse est due à une augmentation du volume, mais les prix sont restés stables. Dans le secteur de l'énergie éolienne, les investissements ont été motivés par les fluctuations de volume, les prix étant restés stables sur la période. Les auteurs ont également fait une estimation du niveau des investissements nécessaires pour atteindre les objectifs nationaux de la France. En effet, les auteurs estiment qu'entre 45 et 70 milliards d'euros d'investissements annuels seraient nécessaires jusqu'en 2030 pour atteindre les objectifs définis par la Stratégie Nationale Bas Carbone et la Programmation pluriannuelle de l'énergie.

Certaines publications étudient l'impact d'un choc de prix de l'énergie sur les décisions d'investissement des agents dans le secteur de l'énergie.

À l'aide d'un modèle DSGE, Dhawan et Jeske (2008) montrent que les ménages absorbent les hausses des prix de l'énergie en réduisant davantage les investissements en biens durables par rapport aux investissements en capital fixe. Ainsi, l'effet sur la production est moins défavorable que prévu. Du côté de l'offre, les auteurs concluent que les fluctuations de la production sont principalement dues à des chocs de productivité.

Hassler et al (2012) estiment l'impact d'un choc de prix de l'énergie sur le changement technique d'économie d'énergie en prenant comme exemple l'augmentation du prix du pétrole dans les années 1970 qui a induit une augmentation significative de l'économie d'énergie comme un mouvement négatif entre l'économie d'énergie et l'économie de capital/travail. Par exemple, dans le cas d'un investissement fixe en R&D qui peut être alloué entre deux secteurs, et où une plus grande part est allouée à un secteur, cela conduit à un taux de croissance plus rapide dans ce secteur. Au contraire, le taux de croissance de l'autre secteur peut se détériorer. Les auteurs démontrent que lorsqu'un intrant est relativement rare ou coûteux, il s'ensuit une augmentation des efforts de R&D. Plus précisément, les auteurs suggèrent que l'économie oriente ses efforts vers l'économie d'intrants afin d'économiser les intrants coûteux ou rares.

Certains articles traitent de l'impact de la réglementation (libéralisation ou norme d'électricité renouvelable) sur le secteur énergétique et l'économie. Une norme de portefeuille renouvelable (ou norme d'électricité renouvelable ou SER) est une politique qui exige un volume minimum d'électricité provenant de sources d'énergies renouvelables, telles que le vent, le soleil et la biomasse.

Atalla et al (2017) montrent que la libéralisation du marché de l'énergie a conduit à un mix électrique avec une part plus importante de sources à faible teneur en carbone mais une plus grande volatilité des prix de l'énergie. Les auteurs prennent le cas de l'Europe (de 1998 à 2014). La part du gaz naturel a augmenté et celle du charbon a diminué, tandis que la part du pétrole est restée plus ou moins stable. Ce changement a entraîné une plus grande volatilité des prix des combustibles fossiles, notamment des prix du gaz naturel qui sont plus volatils que ceux du charbon. Cette évolution vers le gaz naturel conduit à un mix énergétique plus propre, mais au prix d'une volatilité économique accrue. D'après cet article, on peut s'attendre à ce que dans un contexte où le mix énergétique est largement influencé par les politiques énergétiques, les politiques d'incitation permettent une augmentation significative de la part des technologies propres dans le mix énergétique, mais probablement au prix d'une plus grande volatilité, en particulier dans le cas des énergies renouvelables intermittentes.

À l'aide d'un modèle CGE, Morris et al (2010) observent les impacts (en termes de coûts de production, de prix de l'électricité et de bien-être) d'une politique qui impose une part d'énergies renouvelables dans le mix électrique. Les auteurs simulent les effets de trois politiques dans le cas des Etats-Unis : politique de cap-and-trade uniquement, Renewable Portfolio Standard (RPS), cap plus RPS. Dans le dernier cas, ils simulent l'effet de l'introduction d'un RPS pour atteindre 20% d'énergies renouvelables dans le mix électrique en 2020, combiné à un plafond dont l'effet est une réduction des niveaux d'émissions de 80% entre 1990 et 2050. Le coût du bien-être de cette dernière politique est plus élevé que celui d'une politique de plafonnement seule jusqu'en 2035, puis l'évolution du bien-être est identique entre les deux politiques. Cela s'explique par le fait que l'augmentation rapide de la production d'énergie renouvelable crée des coûts d'ajustement supplémentaires à court terme qui disparaissent avec le temps. Finalement, cette politique permet d'atteindre le même volume de réduction des émissions (la trajectoire de réduction des émissions est la même), mais à un coût social beaucoup plus élevé. Concernant la trajectoire du prix en dollars par tonne de CO₂ en 2015, il est estimé à 60 dollars pour la politique de plafonnement seule et à 48 dollars si le RPS est ajouté au plafonnement. En 2050, les estimations sont respectivement de 235 dollars et 191 dollars. En ce qui

concerne les résultats au niveau du mix électrique : i) dans le cas d'un plafonnement seul, les énergies renouvelables ne représentent qu'environ 3 % de la production au cours de la période ; ii) dans le cas d'un plafonnement combiné à un RPS, l'éolien avec appoint (et spécifiquement l'appoint gaz) devient la source renouvelable la plus rentable et la part des énergies renouvelables dans le mix électrique atteint presque 40 % en 2050 car les énergies renouvelables deviennent plus rentables par rapport aux sources fossiles au fur et à mesure que les prix du CO₂ augmentent. Dans ce cas, dans les dernières années de la politique, le développement des énergies renouvelables est plus rentable que le développement du CSC par exemple, iii) dans le cas du RPS uniquement, l'absence de réglementation conduit à une production importante de charbon.

Cette littérature montre l'importance de prendre en compte dans la modélisation les interactions entre les investissements, les coûts de production et les prix qui vont impacter les ménages et les entreprises. En l'occurrence, en me basant sur cette littérature, j'ai développé un modèle de type CGE (Computable general equilibrium model) côté offre afin de prendre en compte les interactions entre les politiques publiques (investissements financés par dette, signal prix carbone, taxe carbone) et l'impact sur les variables macroéconomiques (prix et volumes). La modélisation de type CGE permet de voir les interactions entre la demande de facteurs de production, les coûts et prix de production, les prix à la consommation et l'impact final sur les variables macroéconomiques et sur le bien être des ménages.

2.2. Taxe carbone et investissements bas carbone

Une littérature ancienne a analysé dans quel contexte théorique la taxe pigouvienne peut être préférable à des permis négociables mais dans cet exercice de recherche, l'objectif n'est pas de présenter l'intégralité de cette littérature. Dans un article célèbre, Weitzman (1974) a déterminé les conditions dans lesquelles il est préférable de mettre en place chaque instrument, dans un environnement où les coûts et les bénéfices sont incertains. Plus récemment, certains auteurs (Hoel et Karp, 2002 ; Pizer, 2002 ; Newell et Pizer, 2003 ; et Fell, MacKenzie et Pizer, 2012) ont également évalué quel instrument était le plus approprié en fonction du cas considéré.

Commençons par les implications de la littérature sur le double dividende et le lien avec le volume des investissements nécessaires à la transition bas carbone. Tullock (1967) et Terkla (1984) sont parmi les premiers auteurs à avoir mis l'accent sur les avantages d'un système de recyclage fiscal efficace qui compense le coût total de l'introduction de la taxe environnementale. En 1991, Pearce

a mentionné qu'il serait judicieux de recycler les recettes fiscales sous la forme de taxes à faible distorsion, afin de produire un double dividende qui renforce les investissements. Le premier "dividende" permet de réduire les dommages liés à la pollution par l'effet du signal prix sur les comportements. Le second "dividende" permet un gain collectif, qui peut être mesuré par le PIB, la consommation globale, l'emploi ou le bien-être des agents. Le gain collectif qui en résulte est supérieur au coût de la taxation du carbone. Voir également Goulder (1995).

Plus récemment, Chiroleu-Assouline et Fodha (2006) ont étudié certaines conditions théoriques pour atteindre un double dividende. Premièrement, lorsque les générations actuelles sont impatientes, l'équilibre initial du stock de capital par habitant est plus susceptible de se situer entre la règle d'or modifiée (préférée à la règle d'or car le planificateur social utilise un critère de bien-être actualisé) et la règle d'or (détermine le stock de capital par habitant qui maximise la consommation en régime permanent). Dans ce cas, le stock de capital par habitant (et donc l'investissement) doit diminuer, ce qui ne peut se produire que dans le cas d'une diminution de l'épargne. Deuxièmement, la consommation des différentes générations peut évoluer de manière opposée. En effet, si les deux consommations augmentent, le premier dividende ne peut pas se produire et si les deux consommations diminuent, le second ne peut pas se produire. Cela nécessite que l'élasticité de la consommation soit positive tout en étant plus élevée pour les jeunes (permettant une réduction de la consommation de l'ancienne génération et une augmentation de la consommation des jeunes). Troisièmement, l'augmentation de la taxe sur le travail doit être couplée à une inefficacité de Laffer dans le système fiscal. Dans ce cas, une augmentation de la consommation est possible pour les jeunes car la réduction induite sur le stock de capital par l'augmentation des taxes peut augmenter les taux d'intérêt et donc la consommation (élasticité positive de la consommation). Cet article étudie les effets redistributifs intergénérationnels et les effets sur le stock de capital par tête d'une réforme de la fiscalité environnementale qui augmente le taux de la taxe sur le travail. Cet article apporte un éclairage sur mon sujet de thèse dans la mesure où j'étudie les effets macroéconomiques et redistributifs des modes de financement des investissements bas carbone, sachant que dans les trois scénarios, ces investissements sont financés par une taxe sur le travail ou par une augmentation du prix de l'énergie.

Si l'existence d'un double dividende est largement reconnue par la littérature, le débat porte davantage sur les différentes formes de recyclage des revenus de la taxe carbone. Un recyclage de la taxe de pollution sur le capital polluant sous la forme d'une réduction de la taxe sur le travail sur

les salaires peut conduire à un "second dividende" se traduisant par une augmentation de l'emploi, de l'activité et du bien-être (Bovenberg et Goulder, 2002).

L'analyse de la structure démographique peut justifier quelle forme de recyclage peut être adoptée. Ce lien est analysé par Gonand et Jouvét (2015). Au niveau agrégé, l'arbitrage consommation/épargne est lié à la structure démographique. Ainsi, lorsque la structure démographique est plus concentrée sur des cohortes âgées avec des revenus et des taux d'épargne plus élevés (cas de la France et de l'Allemagne dans leur étude), l'effet du second dividende est plus fort. En effet, une politique redistribuant davantage de revenus à ces cohortes a un effet relativement plus fort sur l'offre de capital. La méthode de redistribution la plus efficace serait de réduire l'impôt sur le revenu plutôt que d'augmenter les dépenses publiques forfaitaires.

Certains économistes étudient le recyclage de la taxe carbone par la réduction d'une autre taxe distorsive, la taxe sur le capital. Dans leur article, utilisant un modèle OLG, Bovenberg et Heijdra (1998) étudient les effets macroéconomiques et redistributifs d'une augmentation de la taxe environnementale sur un stock de capital polluant. Les générations plus âgées subissent des pertes de bien-être non environnemental (elles reçoivent un revenu du capital plus faible) tandis que les jeunes générations subissent des pertes de bien-être très faibles (car elles sont moins dépendantes du revenu du capital), et leur bien-être non environnemental peut même augmenter. Ainsi, si la taxe carbone est recyclée par des transferts forfaitaires, elle peut bénéficier aux jeunes générations dont les revenus dépendent des revenus du travail. Les générations futures reçoivent un stock plus important de capital naturel, mais souffrent de la baisse du stock de capital physique, car la taxe a pour effet de réduire le stock de capital à long terme.

Plus récemment, à l'aide d'un modèle OLG, Carbone et Morgenstern (2013) ont étudié les effets de l'introduction d'une taxe sur le carbone et de l'utilisation de ces recettes pour réduire les impôts sur le capital (avec des échanges d'impôts sans incidence sur les recettes). Sur la base de données empiriques américaines, cette politique permet un gain de bien-être général (un double dividende). En revanche, ils indiquent que le recyclage de l'impôt sous la forme d'une réduction des taxes sur le travail ou d'une réduction de la TVA entraîne une perte de bien-être.

Avec plus de détails concernant les effets sur chaque génération, et en utilisant un modèle OLG, Rausch et Yonezawa (2018) démontrent que pour les générations nées après l'introduction de la taxe, les impacts négatifs sur le bien-être sont les plus faibles dans le cas d'une réduction de l'impôt sur le

capital. Pour les générations nées avant l'introduction de l'impôt, une redistribution forfaitaire favorise les anciennes générations, une réduction de l'impôt sur le travail favorise les très jeunes générations et la réduction de l'impôt sur le capital favorise les générations d'âge moyen. En plus d'être la forme de recyclage la plus efficace pour la grande majorité des générations actuelles et futures (en moyenne), la réduction du coût du capital offre des incitations supplémentaires à investir, ce qui entraîne des effets positifs sur la croissance.

L'économie peut également atteindre un double dividende tout en étant pénalisée par des inégalités persistantes entre les générations : un compromis entre efficacité et équité peut être envisagé. Une partie de la littérature (Howarth, 1998 ; Metcalf, 1999 ; Parry et Williams III, 2010) suggère d'appliquer des politiques moins progressives et les décideurs politiques doivent faire un compromis entre l'efficacité et l'équité. Gonand (2018) suggère que le décideur peut choisir le type de redistribution en fonction de son aversion pour les inégalités intergénérationnelles. En effet, si cette dernière est forte, le planificateur social peut préférer recycler la taxe carbone en augmentant les dépenses publiques par des transferts forfaitaires. Ce résultat est valable même si le recyclage de la taxe carbone par une baisse de l'impôt sur le revenu est économiquement plus favorable (augmentation du PIB), en accord avec la littérature sur le "second dividende". Fried, Novan et Peterman (2018) suggèrent de concevoir différents schémas de recyclage dans le temps en fonction du niveau de revenu des ménages. Par exemple, pour le deuxième quintile de revenu, pendant la période de transition, les transferts forfaitaires ont les effets les plus élevés sur le bien-être, tandis qu'à long terme, le remboursement de l'impôt sur le capital est la meilleure option.

Karp et Rezai (2014) expliquent pourquoi une politique de redistribution permettant l'équité intergénérationnelle pourrait bénéficier principalement aux cohortes actuellement jeunes. Les investissements actuels dans l'atténuation sont bénéfiques pour toutes les générations, sauf pour la jeune génération actuelle. Si les agents âgés perçoivent des revenus croissants du capital, ce n'est pas le cas des jeunes agents. En effet, grâce à la politique environnementale, le prix de l'actif qui est basé sur la valeur future du taux de rente du capital augmente.

Les effets régressifs comme les différents schémas de redistribution de la taxe carbone ont été principalement évoqués par la littérature centrée sur les effets intragénérationnels et il est donc intéressant de le mentionner. Bien que cette thèse se concentre sur les effets intergénérationnels, nous présentons néanmoins cette littérature car le modèle développé dans le cadre de cette thèse inclut

deux types de ménages : les ménages contraints par la liquidité et ceux qui peuvent emprunter sur les marchés (ménages classiques qui peuvent épargner).

Ekins et Dresner (2004) démontrent l'impossibilité dans le cas britannique de compenser complètement les effets régressifs d'une taxe carbone par différents modes de redistribution. Chiroleu-Assouline et Fodha (2009) décrivent une stratégie de recyclage qui privilégie l'équité à court terme en redistribuant des transferts forfaitaires plutôt que de réduire les taxes sur le travail ou de remanier le système fiscal. Des études récentes ont approfondi l'analyse des inégalités intragénérationnelles en examinant plus précisément l'impact du recyclage d'une taxe carbone sur la pauvreté (Davies, Shi et Whalley, 2014) et la manière dont les gouvernements peuvent atténuer les effets régressifs de la taxe (Bento, Goulder, Jacobsen et Von Haefen, 2009 ; Bureau, 2011).

Certains auteurs ont affirmé que les effets régressifs de la taxe carbone sont principalement liés aux critères de localisation géographique des ménages et à leurs niveaux de revenu. Ils ont montré que différents schémas de redistribution des revenus sont disponibles pour permettre une meilleure acceptabilité de la taxe carbone (Douenne, 2018 ; Berry, 2017). Une forme de recyclage fiscal préconisée par certains auteurs est une redistribution forfaitaire bénéficiant aux bas revenus et aux régions les plus pénalisées. Douenne (2018) prouve que le système de taxation de l'énergie en France a des effets redistributifs horizontaux (hétérogénéité au sein des groupes de revenus) et des effets de distribution verticaux (hétérogénéité entre les différents niveaux de revenus). Premièrement, l'élasticité demande/prix est plus forte dans le transport que dans le logement. Ensuite, les effets redistributifs horizontaux de la taxe carbone (liés à des critères de localisation et de revenu) rendent difficile l'établissement de scénarios politiques à mettre en place. Hourcade et Combet (2017) trouvent un coût d'opportunité sur l'emploi et le PIB en choisissant des transferts forfaitaires plutôt qu'une réduction des cotisations sociales. En revanche, les transferts forfaitaires permettent de meilleurs résultats concernant la réduction des inégalités et de la pauvreté (augmentation de la consommation des 5% des plus pauvres).

Certains auteurs conseillent un programme de compensation partagé entre des transferts forfaitaires pour compenser les perdants de la taxe carbone et le financement de la politique de transition vers une économie à faible émission de carbone. À cet égard, une partie des recettes fiscales peut être affectée à des investissements publics à faible intensité de carbone, au financement public de la R&D ou à des subventions (aux investissements privés à faible intensité de carbone et à la R&D privée). Parmi les mécanismes de redistribution, les dividendes climatiques (pour compenser

l'effet régressif de la taxe carbone pour les plus pauvres), les réductions d'impôts et les investissements dans les infrastructures (Schwerhoff et al, 2017) peuvent être envisagés. Au-delà de l'application d'une compensation hybride entre redistribution forfaitaire et investissements en R&D, Dam (2011) recommande d'augmenter le soutien public à l'innovation et aux investissements verts par le biais de subventions aux investissements bas carbone et de subventions à l'innovation dans le secteur énergétique (Dam, 2011). Ahamada, Fodha et Kirat (2017) montrent que l'impact du prix du carbone peut varier selon les régions, car elles sont hétérogènes en termes de revenus : dans ce cas, la régressivité de la taxe peut être corrigée par l'application d'une taxe hétérogène selon la localisation des ménages. Pour changer les comportements à long terme et atteindre un objectif environnemental ambitieux, un simple remboursement peut ne pas suffire et une option serait de subventionner de nouveaux investissements verts dans les technologies environnementales pour accélérer la transition énergétique. Investir pour améliorer l'efficacité des technologies de réduction de la pollution permet d'atteindre un équilibre économique stable à long terme caractérisé par un faible niveau de pollution (Cao, Wang et Wang, 2017) tout en assurant un niveau élevé de revenu du capital mais à condition que les décideurs politiques : i) mettent en œuvre des réglementations strictes sur les entreprises polluantes ; ii) appliquent une taxe carbone sur les ménages et iii) investissent davantage dans des technologies efficaces de réduction de la pollution.

La taxe environnementale peut entraîner un effet vertueux sur les décisions d'investissement financier lorsque les investisseurs augmentent le volume des investissements verts par rapport aux autres investissements, entraînant ainsi un verdissement de leur portefeuille de capital.

Pour Siegmeier, Mattauch et Edenhofer (2015) la tarification du carbone conduit à un transfert d'investissement (du stock de ressources fossiles vers le capital productif) dans le seul cas d'une sous accumulation de capital. Il en résulte une réduction des coûts de la politique climatique, une augmentation du bien-être et du stock de capital ainsi qu'une baisse des taux d'intérêt, ce qui entraîne un ralentissement de l'extraction. Si la sous accumulation du capital s'explique par l'altruisme intergénérationnel imparfait, l'optimum social peut être atteint si la mise aux enchères des permis -plus la part des permis mis aux enchères est élevée, plus les investissements sont détournés des stocks de ressources fossiles -génère des revenus suffisants, supérieurs aux investissements technologiques, qui sont redistribués au profit des jeunes plutôt que de manière forfaitaire.

Cet effet de transfert s'explique largement par une diminution du rendement des actifs pour le capital taxé polluant (Schwerhoff et al., 2017). L'objectif des entreprises étant de maximiser leur profit, un

taux de taxation de la pollution plus élevé sur la production incite les investisseurs à remplacer le niveau de capital polluant par du capital propre (David, 2010). Simultanément, si le volume de capital et le niveau de pollution augmentent tous deux avec la productivité du capital, la mise en place d'une taxe carbone pèse sur le capital (et donc sur la croissance économique). Dam (2011) suggère également que le niveau de pollution est défini comme l'un des paramètres déterminant la valeur de l'entreprise, ce qui explique la préférence des agents pour les investissements verts. Ce type de mécanisme fonctionne surtout pour les catégories les plus riches de la population.

Selon Acemoglu et al (2012), la neutralité carbone peut être approchée par une combinaison de taxes sur le carbone et de subventions visant à réorienter l'innovation vers des intrants propres (c'est-à-dire des combustibles non fossiles). La perte de bien-être (mesurée par la réduction de la consommation) est : i) faible lorsque l'élasticité de substitution entre les sources sales et propres est élevée, car elle ne nécessite qu'une faible taxe sur le carbone, ce qui est suffisant pour orienter la R&D vers les sources vertes ; ii) élevée lorsque le taux d'actualisation est élevé. Les auteurs soulignent ainsi la nécessité de ne pas retarder ces interventions car le retard peut être coûteux en termes de PIB. Enfin, leurs résultats montrent que, dans la plupart des situations, le niveau de la taxe carbone est limité dans la régulation environnementale optimale, car les subventions à la R&D sont suffisantes pour réorienter l'innovation vers les technologies propres.

Une partie de la littérature étudie l'interaction entre le secteur de l'énergie et une combinaison de différentes politiques environnementales qui complètent la taxe carbone.

Les effets des chocs énergétiques sur le bien-être dépendent du schéma de régulation installé dans le pays. Dissou et Karnizova (2016) analysent l'effet d'un choc énergétique vs non énergétique sur le bien-être des agents dans une économie qui applique une taxe carbone (par rapport à une politique de cap-and-trade). Les auteurs utilisent un modèle DGSE pour évaluer les effets de bien-être de la politique de taxe carbone par rapport à la politique de plafonnement en présence de chocs. Ils ne trouvent aucune différence en termes d'effets de bien-être lorsque le choc provient du secteur non énergétique (coûts de bien-être positifs et identiques pour les deux politiques). Au contraire, dans le cas d'un choc de production énergétique, même si la politique de plafonnement a une volatilité plus faible que la politique fiscale environnementale, son coût sur le bien-être est plus élevé.

Les modèles hybrides (combinant les approches descendantes et ascendantes) permettent d'étudier le lien entre les technologies du secteur énergétique, les politiques énergétiques et environnementales et

leurs impacts macroéconomiques. Cependant, ces modèles présentent une limite importante car ils ne sont pas destinés à évaluer les effets intergénérationnels de ces politiques. A l'aide d'un modèle hybride, Rivers et Jaccard (2005) montrent que trois instruments de politique environnementale (taxe carbone, subventions technologiques et programme d'information) permettent d'obtenir une évolution positive du mix électrique vers des technologies moins intensives en carbone. Le modèle hybride utilisé dans cet article évalue les interactions entre la demande et l'offre d'énergie et la performance économique de secteurs spécifiques. Les auteurs effectuent une analyse des politiques visant à adopter des technologies alternatives (chaudières et systèmes de cogénération) pour la production de vapeur au Canada. Ils testent différentes politiques (programme d'information, subvention technologique, taxe sur le dioxyde de carbone). Toutes les politiques ont l'avantage d'augmenter la part de la cogénération par rapport au statu quo. Le programme d'information (visant à diffuser des connaissances sur la cogénération) augmente la part de la cogénération d'environ 5 %, tandis que la taxe de 50 \$/tonne de CO₂ l'augmente de 6 à 10 %. La subvention a l'effet le plus important sur la nouvelle part de marché de la cogénération (augmentation de 19% à 26%).

Fischer et Springborn (2011) démontrent que l'effet positif d'un choc de productivité sur l'investissement est plus important dans une économie qui applique une taxe carbone (par rapport à un dispositif de type *cap-and-trade*). Au moyen d'un modèle d'équilibre général dynamique et stochastique sur la productivité future, ils montrent que dans le cadre d'une politique de taxe sur les émissions, les variables économiques sont beaucoup plus volatiles que dans le cadre de toute autre politique (plafonnement des émissions, objectif d'intensité de carbone en sortie). Les auteurs justifient ce résultat comme suit : i) "le coefficient représentant l'effet de la déviation du facteur de productivité sur le capital de la période suivante est le plus grand pour la taxe";ii) "la sensibilité à la productivité stochastique se vérifie dynamiquement dans les simulations : la volatilité de chaque variable, et finalement de la production et de l'utilité, est la plus grande sous la taxe". L'investissement optimal est donc beaucoup plus sensible aux variations de productivité que dans le cadre de toute autre politique. Ainsi, lorsqu'un choc positif de productivité se produit, l'effet positif sur l'investissement est encore plus important lorsque les décideurs appliquent une politique de taxe environnementale.

La littérature évaluant les effets redistributifs intergénérationnels des politiques environnementales ne se concentre que sur un seul mode de financement, à savoir la taxe carbone et ses effets redistributifs. La littérature mentionnée ci-dessus aborde rarement les modalités de financement des investissements de la transition bas carbone et ses conséquences en

équilibre général. Plus précisément, seul l'outil fiscal est analysé alors qu'il ne représente qu'un des différents types de financement de la transition bas carbone. Dès lors, intégrer différents modes de financement tout en analysant ses effets redistributifs macroéconomiques et intergénérationnels est un point qui a été, à notre connaissance, plutôt négligé jusqu'à présent dans la littérature.

La littérature qui étudie les effets redistributifs intergénérationnels de la taxe carbone et de son mode de recyclage nous intéresse dans la mesure où dans notre modèle, nous finançons en partie ces investissements par de la taxe - ou par un signal prix carbone payé par les entreprises-. Et dans le cas d'un financement des investissements bas carbone par dette publique, cette dernière est partiellement remboursée sous forme de hausse de l'impôt générique sur le revenu des agents à moyen terme. Les mécanismes sous-jacents sont donc proches de cette littérature, bien que dans le cas de notre question de recherche, il s'agit d'un mode de financement des investissements et que les investissements eux-mêmes ont aussi des effets macroéconomiques et redistributifs qui leur sont propres.

Nous nous inspirons de cette littérature pour la modélisation de l'interaction entre le volet offre et le volet demande (transmission par les volumes et les prix). La littérature citée utilise des modèles à générations imbriquées pour pouvoir correctement capter les effets redistributifs intergénérationnels de ces politiques. C'est en partie en se basant sur cette littérature que le choix de développer un modèle incluant des éléments OLG et CGE a été construit.

3. Les investissements dans la R&D bas carbone

Cette thèse vise à étudier les impacts macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels de différentes formes de financement d'une trajectoire exogène d'investissements bas carbone dans le secteur électrique en France à l'horizon 2050. Les effets de ces investissements bas carbone ne peuvent être découplés du progrès technique du secteur énergétique et de l'efficacité de ces technologies bas carbone. En effet, afin de mieux comprendre les mécanismes induits dans la section des résultats, il nous a semblé important d'étudier la littérature qui traite des politiques visant à améliorer l'efficacité des technologies bas-carbone dans le secteur énergétique.

Selon Aghion et Howitt (1998), toute subvention directe à la recherche et au développement entraîne un effet permanent sur le taux de croissance de l'économie. Pour les auteurs, le taux d'investissement affecte le *learning by doing* qui peut améliorer le taux de progrès technologique. Ainsi, subventionner la recherche et le développement ou les investissements à faible émission de carbone crée des effets d'apprentissage dans la production de nouvelles technologies.

À travers un modèle de croissance exogène, Henriët, Maggiar, et Schubert (2014, 2016) étudient la possibilité d'atteindre l'objectif du " Facteur 4 " de réduire d'au moins 75% les émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2050, par rapport au niveau de 1990. Ils confirment que cet objectif peut être difficile à atteindre sans une forte augmentation du progrès technique en matière d'économie d'énergie, basée sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et le remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables. Pour obtenir ce résultat, diverses simulations sont effectuées. Elles aboutissent à deux résultats principaux : i) au-delà de l'application d'un niveau approprié de taxe sur le carbone, il est nécessaire d'augmenter le progrès technique en matière d'économie d'énergie par des subventions supplémentaires à la recherche sur les économies d'énergie fossile ; ii) une augmentation significative du taux de progrès technique en matière d'économie d'énergie entraîne une diminution du progrès technique en matière d'économie de main-d'œuvre, qui devient presque nulle. Ainsi, il semble que l'accélération du progrès technique pour économiser l'énergie fossile soit un facteur clé pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, même si l'impact sur la production peut être préjudiciable.

Smulders et al (2003) étudient les effets sur l'économie et sur l'efficacité énergétique de deux types de politiques : soit une réduction exogène du niveau d'énergie utilisé, soit une diminution du taux de croissance de l'énergie utilisée. Dans les deux cas, les auteurs trouvent une trajectoire d'équilibre qui coïncide avec la réalité empirique (dans le cas des Etats-Unis, étudiés dans

cet article), avec l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'augmentation de la consommation d'énergie par habitant, la diminution à la fois de la part des coûts énergétiques dans le PIB et des prix de l'énergie par unité de coût du travail.

Les auteurs constatent plusieurs résultats lorsque l'énergie devient plus rare : (i) les prix de l'énergie et la part des coûts énergétiques dans la production augmentent ; ii) les producteurs sont prêts à payer des prix plus élevés, ce qui stimule l'innovation dans le domaine de l'énergie ; iii) les économies d'énergie réduisent les niveaux de production à court et à long terme. En effet, des niveaux inférieurs de consommation d'énergie, sans affecter les niveaux exogènes de travail et de technologie, conduisent à des niveaux inférieurs de revenu (par habitant) ; iv) alors que le changement de niveau n'a pas d'impact sur la croissance à long terme, le changement de croissance énergétique réduit la croissance économique à court et à long terme. En effet, une réduction du taux de croissance de la consommation d'énergie entraîne une baisse de la croissance à long terme, non seulement par l'effet des sources de croissance comme dans la section précédente (en réduisant une des trois sources de croissance au sens de la comptabilité de la croissance), mais aussi par une réduction de l'effort de recherche.

Cette littérature définit les déterminants et les effets du progrès technique. Les résultats des articles nous apprennent, entre autres, que les investissements dans l'efficacité énergétique augmentent le progrès technique énergétique ce qui entraîne une baisse des coûts des technologies et donc une réduction des prix de l'énergie.

Notre modèle prendra en compte le progrès technique propre à chaque secteur. Cette littérature nous rappelle qu'il est important de considérer les effets du progrès technique sur l'efficacité des investissements d'un secteur. Dans la partie tests de sensibilité, nous étudions l'impact d'une hausse du progrès technique dans le secteur de l'énergie, afin de vérifier que le modèle est en ligne avec les conclusions de cette littérature -ce qui est le cas-.

Une partie de la littérature étudie l'effet rebond. L'effet rebond est le phénomène par lequel les économies d'énergie anticipées par l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou totalement compensées suite à une adaptation du comportement de la société. Pour Hunt et al. (2014) "les effets rebonds se produisent lorsque, en raison des réponses comportementales des consommateurs à la baisse du prix implicite des services énergétiques qui en résulte, les améliorations de l'efficacité énergétique se traduisent par des économies d'énergie qui sont souvent inférieures à celles suggérées par les calculs techniques." À l'aide d'une analyse empirique illustrative utilisant des données de séries chronologiques britanniques, les auteurs étudient dans quelle mesure les effets de rebond peuvent différer des élasticités-prix. Ils constatent que les effets de rebond directs pourraient être

sensiblement différents de la valeur négative des élasticités-prix estimées standard. Il semble donc peu judicieux de persister à interpréter les élasticités-prix comme des représentations significatives des effets de rebond spécifiques.

Rausch et Schwerin (2018) développent un modèle de croissance en équilibre général avec capital et utilisation de l'énergie pour tester l'hypothèse selon laquelle l'utilisation de l'énergie à l'échelle de l'économie augmente avec l'efficacité énergétique. Ils démontrent qu'une augmentation de l'efficacité énergétique n'implique pas nécessairement une réduction de la consommation d'énergie. En effet, la réduction induite du coût de l'énergie entraîne une augmentation de la demande d'équipement, conduisant à une augmentation de l'énergie utilisée. Comme le capital d'équipement (véhicules économes en carburant par exemple) est plus efficace sur le plan énergétique, cela entraîne une augmentation de la demande de ce capital (en raison de la baisse du coût du capital) et donc de l'énergie utilisée. C'est l'effet "rebond". En utilisant un modèle DSGE basé sur les données américaines de 1960 à 2011, ils montrent que la réduction attendue de la consommation d'énergie induite par l'efficacité énergétique (les économies d'énergie) a été compensée par l'effet rebond pendant cette période (en moyenne par an). Les auteurs concluent qu'une politique environnementale uniquement basée sur une augmentation de l'efficacité énergétique n'est pas suffisante pour réduire la consommation d'énergie. Pour pallier cette insuffisance, les décideurs peuvent compléter cette politique par la mise en place d'une taxe sur le capital sale et d'incitations à la promotion des technologies d'énergie propre. Ainsi, pour obtenir des gains d'efficacité énergétique, des volumes importants d'investissement dans la recherche et le développement sont réellement nécessaires. En effet, la littérature montre que l'effet rebond atténue de près de la moitié les effets de l'efficacité énergétique sur la demande d'énergie et donc sur les émissions de gaz à effet de serre.

Une partie de la revue de littérature montre que l'effet de la taxe carbone peut mener à une baisse de la consommation et de la pollution. Néanmoins, la littérature traitant de l'effet rebond démontre les limites de cette conclusion. Il apparaît important de comparer nos résultats au regard de cette littérature. La modélisation ainsi intégrée permet de constater l'interaction entre les nouvelles technologies bas carbone -dans le secteur électrique-, la demande d'énergie des entreprises et la consommation d'énergie des ménages. Toutefois, nous étudions seulement le bien-être non environnemental et nous ne regardons pas l'effet sur la qualité de l'environnement.

4. La littérature qui traite des effets redistributifs intergénérationnels et de la manière de financer les investissements dans une transition énergétique à faible émission de carbone est peu développée

Analyser en détail les modalités actuelles de financement des investissements de la transition énergétique semble nécessaire. En effet, ces volumes impactent le taux d'accumulation du capital sur le long terme, et donc la croissance, et impliquent des arbitrages potentiels entre les générations actuelles et futures.

Un champ de recherche assez limité étudie les interactions entre les recettes fiscales environnementales et un programme de consolidation de la dette publique. La littérature fait valoir la possibilité pour une économie de réaliser un double dividende tout en atteignant la stabilité fiscale. Au lieu de dépenser les recettes par une réduction des distorsions provenant d'autres taxes, une autre possibilité serait d'employer ces flux de recettes pour réduire la dette nationale (réduction du ratio dette/PIB). L'effet qui en découle est une augmentation de la qualité environnementale et du bien-être, tout en permettant la stabilité de la dette à un niveau constant. Enfin, ces recettes supplémentaires pourraient également financer des politiques de réduction des émissions. Cela peut être une solution pour réaliser une transition énergétique efficace tout en respectant les exigences budgétaires. Réduire le déficit plus rapidement permet de réduire la nécessité de nouvelles augmentations d'impôts à l'avenir (Carbone, Morgenstern et al, 2013). Indépendamment des questions environnementales, cette politique permet de réduire la dette. Selon Rausch (2013), l'utilisation des recettes de la taxe carbone pour réduire le déficit public implique un assouplissement des déficits publics futurs et le remboursement de la dette. Il en résulte une réduction des obligations de paiement des intérêts (service de la dette). Des niveaux plus élevés de qualité environnementale et de consommation globale peuvent être atteints à l'équilibre. Ainsi, dans un environnement où de nombreux pays sont confrontés à des contraintes de soutenabilité de la dette, un ratio dette-production plus faible permet d'atteindre un troisième dividende (Fodha, Seegmuller et Yamagami, 2014).

Selon certaines études, l'endettement public peut permettre d'atteindre à la fois l'équité intergénérationnelle et la réalisation de l'objectif environnemental. L'objectif est en effet

d'inclure les générations futures pour partager la charge du coût de la réduction de la dette. Des gains de bien-être peuvent émerger de la combinaison d'une politique climatique avec d'autres politiques publiques ayant des objectifs non environnementaux. L'utilisation de la dette publique pour financer les politiques de réduction des émissions apparaît comme un moyen de protéger la génération actuelle contre le risque d'une réduction du bien-être. En effet, les générations futures peuvent payer la charge d'une taxe plus élevée mais bénéficier d'un meilleur environnement. Ces politiques conduisent à des améliorations de Pareto car chaque génération reçoit un niveau de bien-être qui est, au moins, aussi bon qu'en l'absence de toute politique climatique. Ce mécanisme a été introduit pour la première fois dans un modèle théorique développé par John et al. (1995). Les auteurs analysent les effets d'un système de taxes (payées par la jeune génération) dont le but est de maintenir et d'améliorer la qualité de l'environnement alors que la consommation des individus âgés détériore l'environnement. Le planificateur peut permettre à l'économie d'atteindre le niveau optimal de capital et de qualité environnementale. Pour concevoir le schéma taxe-transfert améliorant le Pareto, les bénéficiaires de la politique peuvent envoyer des transferts à la jeune génération qui supporte la taxe. Mais dans ce modèle, les bénéficiaires peuvent ne pas être encore en vie.

Pour permettre un mécanisme d'emprunt pour les générations futures, il est possible d'émettre des obligations à l'intention de la génération actuelle qui ne bénéficie pas d'une meilleure qualité environnementale (Bovenberg et Heijdra, 1998, 2002). L'objectif est de redistribuer efficacement les coûts et les avantages de la politique environnementale entre les générations. Ces transferts peuvent être des paiements forfaitaires (Heijdra, Kooiman et Ligthart, 2006). Les générations futures, susceptibles de bénéficier d'une meilleure qualité environnementale, peuvent alors réimprégner la dette.

Kotlikoff et al (2019) décrivent avec plus de détails ce mécanisme de transfert pour chaque génération. Les transferts sont les plus élevés pour les anciennes générations (car elles ne bénéficieront pas des résultats positifs de la politique climatique). Les générations nées quelques décennies après la politique reçoivent également des transferts car elles supportent un prix de l'énergie plus élevé. Sans cette redistribution, les générations actuelles subissent une perte de bien-être tandis que les générations futures bénéficient d'un gain de bien-être.

Pour Blanchard (2019), la différence entre le taux d'intérêt et le taux de croissance de l'économie détermine si une dette est soutenable ou non. Ainsi, l'accumulation de dettes peut être souhaitable si le taux d'intérêt reste inférieur au taux de croissance de l'économie (l'accumulation de richesse permet

ainsi de financer le service de la dette). Ainsi, le recours à l'endettement est bénéfique s'il finance des dépenses qui soutiennent la croissance et, par conséquent, le niveau de vie des générations futures.

Par ailleurs, **la littérature a mis en évidence un manque de flexibilité des marchés financiers pour le financement des projets environnementaux. En fait, plusieurs articles visent à donner des solutions alternatives.** Dans le cas de la France, ce point est important à observer car les investissements pour freiner les émissions de carbone dans le secteur de l'énergie sont stimulés par des investissements publics, mais restent principalement des investissements privés.

Selon Louche et al (2019), le secteur financier est composé de quatre approches dominantes : i) un biais court-termiste ; ii) la prévisibilité de l'avenir (alors que l'incertitude caractérise le changement climatique qui conduit à un manque d'action) ; iii) l'efficacité des prix (alors qu'il y a un manque d'information et des incertitudes concernant les conséquences climatiques) ; iv) les rendements ajustés au risque (difficile d'évaluer le retour sur investissement), alors que les auteurs préconisent un système avec plus de flexibilité pour intégrer les facteurs non financiers dans la prise de décision d'investissement. Ils suggèrent quatre approches alternatives : i) le long terme, car il existe une contradiction entre le visage du marché financier et la vision à long terme du changement climatique. Une solution pour augmenter les investissements à faible émission de carbone est de réglementer les pratiques de divulgation afin d'analyser les conséquences à long terme du changement climatique sur les actifs des agents. Ils prennent notamment l'exemple de l'article 173 de la loi sur la transition énergétique qui définit les exigences des propriétaires d'actifs concernant les critères ESG (y compris les risques climatiques) dans leur gestion financière ; ii) l'interconnexion des systèmes (les marchés de capitaux ne peuvent pas être déconnectés de la société et du social car les impacts environnementaux peuvent être incorporés dans tout projet) ; iii) la dynamique du prix du carbone avec l'utilisation de notations environnementales qui réduisent les spreads des obligations souveraines et permettent d'évaluer le risque pays. Or, pour compléter les notations financières traditionnelles, les investisseurs utilisent de nouvelles notations qui incluent des informations sur les risques climatiques ; iv) l'actionnariat actif défini comme " le mécanisme utilisé par les actionnaires pour exprimer leur mécontentement vis-à-vis de la performance ESG d'une entreprise (Goodman, Louche, Cranenburgh, & Arenas, 2014) ". Les auteurs prennent l'exemple des chargés de relations avec les investisseurs (IRO) mais soulignent que l'inclusion des impacts environnementaux n'a commencé que récemment.

* * *

Cette partie a exploré les enseignements de la littérature sur les interactions entre les investissements à faible intensité de carbone dans le secteur de l'énergie/électricité, les politiques relatives au prix de l'énergie, leurs modes de financement et leurs effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels.

Tout d'abord, nous utilisons les informations fournies par la littérature sur la nécessité de financer des volumes élevés d'investissements et les questions soulevées par leur affectation, en nous concentrant sur le secteur de l'énergie. Deuxièmement, au-delà des investissements, les signaux de prix tels que la taxe sur le carbone et les prix de l'énergie sont liés à l'évolution des investissements à faible intensité de carbone. Les prix de l'énergie sont influencés à la fois par les coûts de production et les coûts de transport qui influencent les futurs investissements dans les énergies à faible émission de carbone. Les décideurs politiques appliquent également d'autres signaux de prix par le biais d'une taxe sur le carbone équitable (transferts forfaitaires pour compenser les perdants) et efficace (réduction des taxes ayant un effet de distorsion), dont les recettes peuvent être partiellement affectées à l'augmentation des investissements dans les technologies à faible émission de carbone, dans les infrastructures (publiques ou privées par le biais de subventions) et le financement du progrès technique (R&D publique ou subventions à la R&D privée).

Troisièmement, une partie de la littérature étudie la nécessité de renforcer le progrès technique en matière d'économie d'énergie (par des subventions à la recherche sur les économies d'énergie fossile), sur la base de l'amélioration de l'efficacité énergétique et du remplacement des combustibles fossiles par des énergies renouvelables, pour atteindre un objectif environnemental ambitieux.

Concernant les modes de financement, différents leviers existent (autofinancement, politique fiscale, dette privée et/ou publique). La littérature étudiant les effets redistributifs intergénérationnels analyse principalement la taxe carbone et ses modes de recyclage. Une partie de la littérature suggère également de partager le coût entre les générations en émettant de la dette. La question de l'interaction entre dette publique et équité intergénérationnelle est d'actualité (Blanchard, 2019) et le modèle développé dans cette thèse s'y intéresse dans le cadre de la transition bas carbone dans le secteur de l'électricité en France.

CHAPITRE 2 : SPÉCIFICITÉS DES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

1. Caractéristiques des modèles à générations imbriquées

Les auteurs justifient leur utilisation du modèle OLG par sa structure démographique qui permet d'analyser avec précision dans quelle mesure "les actions des agents ont des conséquences qui leur survivent".

Maurice Allais en 1947 et Paul Samuelson en 1958 sont les premiers auteurs à avoir développé des modèles avec des générations d'âge différents et qui coexistent. Ils ont étudié le lien entre la démographie et le transfert intergénérationnel de revenus. Leurs recherches ont porté sur l'impact 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 la retraite (cf. Auerbach et Kotlikoff, 1987). Peter Diamond (1965) est celui qui a popularisé les modèles de générations imbriquées.⁵

Nous étudions le cas de l'utilisation de la modélisation OLG pour aborder les effets redistributifs intergénérationnels des investissements à faible émission de carbone, en nous concentrant sur le secteur de l'électricité. Tout d'abord, les modèles à générations imbriquées modélisent plusieurs générations d'agents au lieu de conserver l'hypothèse d'une durée de vie infinie. Au contraire, le cadre de modélisation des agents à durée de vie infinie (ILA) repose sur l'hypothèse selon laquelle les générations futures peuvent être représentées par un seul consommateur/ménage vivant sur une période infinie. Cet agent représentatif décide directement des investissements pour toutes les générations présentes et futures. En réalité, si certaines générations acceptent de payer le coût de la transition énergétique, elles doivent également accepter de ne pas en tirer tous les bénéfices. Les décisions d'investissement des agents évoluent en fonction de ces arbitrages intergénérationnels et des transferts monétaires générés d'une génération à l'autre. Le cadre OLG semble donc plus approprié

⁵ Cette revue de littérature est citée par D. Corbier (2020).

pour obtenir une analyse plus détaillée sur les effets redistributifs macroéconomiques et intergénérationnels des investissements et des politiques visant à atteindre une économie à faible émission de carbone.⁶

Ces modèles permettent de représenter l'arbitrage entre la consommation et l'épargne de différentes cohortes d'âge différent vivant la même année. Cet arbitrage détermine alors la dynamique agrégée de l'intensité capitalistique d'une économie de long terme, permettant une analyse précise de tous les effets entre générations. Ainsi, les modèles OLG permettent une analyse des externalités intergénérationnelles des politiques, une comparaison des coûts et des bénéfices des politiques pour les cohortes actuelles et futures. L'importance de l'analyse des effets redistributifs intergénérationnels des politiques environnementales (Solow, 1956) dans un cadre OLG a été mentionnée par Solow en 1974.

Les modèles à générations imbriquées présentent différents avantages.

Ils permettent d'étudier l'évolution des variables sur le long terme. C'est le taux de croissance potentiel de l'économie qui est étudié dans ce type de modèles. Il s'agit donc d'étudier les effets structurels des chocs ou des politiques et non les effets conjoncturels.

Ces modèles ont aussi l'avantage d'étudier les effets redistributifs intergénérationnels de différentes politiques sur le long terme. Ainsi, tout choc impactera différemment les différentes générations d'agents dans la mesure où chaque génération a des comportements de consommation et d'épargne différents.

Toutefois, comme tout modèle macroéconomique, les modèles à générations imbriquées comportent quelques limites. Premièrement, leur degré de détail sectoriel ou technologique n'est pas aussi important que dans un modèle technico-économique, de type « ingénieur » qui permet une sophistication technologique plus importante. Par exemple, les modèles TIMES et POLES décrivent finement le système énergétique. Ces modèles permettent notamment de fournir en détail le niveau d'offre d'énergie, des technologies utilisées, du mix énergétique et des émissions émises. Ainsi, en fonction de l'environnement économique, de la disponibilité des ressources et des technologies

⁶ Dans les modèles avec des agents à horizon de vie infini, l'introduction d'une taxe sur les émissions de CO2 implique un coût socio-économique important à court terme (Rasmussen, 2003). Au contraire, dans les modèles OLG, les coûts économiques sont plus faibles pour les cohortes actuelles. Pour les auteurs, la vitesse de transition plus lente qui caractérise ces modèles fournit sans doute des résultats plus réalistes.

disponibles, le modèle définit la structure du système énergétique. Toutefois, ces modèles n'ont pas l'avantage de fournir un bouclage macroéconomique et ne prennent donc pas en compte la simultanéité des comportements des agents économiques.

Deuxièmement, les modèles à générations imbriquées sont déterministes et non stochastiques. En effet, dans les modèles à générations imbriquées, les anticipations des ménages sont supposées rationnelles. Il n'existe pas d'indétermination de l'équilibre. Les agents anticipent, notamment l'évolution des futurs prix, contrairement aux modèles stochastiques, où l'on modélise une distribution des prix d'équilibre. Autrement dit, dans ces derniers, certains paramètres sont déterminés de manière aléatoire.

Ce critère limite l'étude du caractère incertain des politiques et des chocs.

Une autre difficulté concerne la calibration des données empiriques. En effet, dans le cas de modèles à générations imbriquées empiriques qui incluent différentes générations, il est nécessaire d'avoir une base de données précise en termes de classes d'âge (les données sur le cycle de vie sont importantes) ou alors d'effectuer des hypothèses sur les paramètres, basées sur les données passées ou sur la revue de littérature. Or, ces données statistiques sont difficiles à trouver lorsque l'on souhaite adopter un certain niveau de désagrégation. Ainsi, toute donnée manquante suppose d'effectuer des hypothèses sur sa valeur numérique. De fait, en général, le recours à des tests de sensibilité sur la valeur des paramètres est souvent utilisé.

2. Caractéristiques des modèles d'équilibre général calculable

La littérature s'accorde sur le fait que le modèle de Johansen (1960) est le tout premier modèle d'équilibre général calculable (CGE pour « Computable general equilibrium »). L'apport de Johansen a été d'identifier le comportement d'agents individuels. Ces modèles se distinguent de la modélisation en équilibre partiel car ils montrent l'interdépendance des différents marchés et des comportements des agents.

Plus largement, un modèle d'équilibre général calculable est un modèle de simulation visant à donner une représentation de l'ensemble des transactions d'une économie de marché.

Puis, les modèles néo-classiques de Shoven et Whalley ont été développés et intègrent dans leur modélisation une désagrégation pour les agents privés (ménages et entreprises), la contrainte fiscale de l'État et le reste du monde. Ces modèles d'équilibre général calculable ont initialement été développés pour étudier les politiques de libéralisation commerciale dans les années 1970. De manière générale, les économistes ont développé les modèles CGE dans le but d'évaluer les impacts des politiques structurelles et des chocs économiques/technologiques sur l'économie (Wing, 2004). Dans le cadre des politiques énergétiques, Dale Jorgenson (1974) est le premier à avoir développé un modèle d'équilibre général calculable en mesurant l'impact des changements des prix des énergies.

Les modèles d'équilibre général calculable ont la particularité de calquer le cadre comptable en combinant une matrice input-output ou une matrice de comptabilité sociale avec des équations de comportement des agents (souvent des équations de demande de facteurs de production).

Ce sont des modèles dans lesquels l'économie est décomposée en divers secteurs d'activité (Borges, 1986). En effet, les CGE représentent de manière désagrégée l'économie dans un cadre macro-économique, permettant d'étudier les impacts sur les divers secteurs et agents. Cette modélisation permet de tenir compte des interactions sectorielles. Ainsi, par exemple, on peut voir l'influence d'une politique sectorielle sur les autres secteurs.

La matrice de comptabilité sociale permet de détailler l'économie de manière très fine et donner lieu à des analyses précises par catégorie d'agents. Elle permet par exemple de travailler sur les questions de distribution, de revenus d'un groupe particulier, ou sur les problématiques de pauvreté avec un découpage par type de ménages par exemple (par âge, par niveau de revenu).

Les modèles d'équilibre général calculable ont différents atouts.

L'atout principal de ces modèles est le degré de désagrégation permettant d'étudier les effets des politiques et les réallocations intersectorielles face aux chocs. Cette désagrégation permet de déterminer en détail la réallocation des ressources et de redistribution, suite aux décisions de politiques publiques ou suite à un choc. La désagrégation peut par exemple, se manifester au niveau sectoriel, avec une différenciation fine des produits (substitutions imparfaites, différenciation entre biens domestiques et étrangers, différenciation des facteurs de production, etc).

Ces modèles ont aussi la particularité de pouvoir être facilement intégrés ou combinés avec un modèle à générations imbriquées, permettant ainsi d'avoir un degré de désagrégation important côté offre, mais aussi côté ménages avec une hétérogénéité des comportements des agents en fonction de leurs

âges (Kotlikoff et al., 2007, Rausch, 2013). Par exemple, Rausch (2013), « combine des éléments d'un modèle de type OLG à la Auerbach & Kotlikoff (1987) avec ceux des modèles d'économie d'énergie utilisés pour étudier les questions de politique climatique (Paltsev et al, 2005, Caron et al, 2012) ».

Aussi, ces modèles sont non stochastiques dans le sens où ils ne prennent pas en compte l'incertitude inhérente aux politiques ou aux chocs.

Côté demande, comme la plupart des modèles en équilibre général, des simplifications sont réalisées. En particulier, du fait de l'utilisation de ménages représentatifs, le découpage générationnel est souvent ignoré (excepté dans le cas des OLG-CGEs comme mentionné précédemment). Plus particulièrement, souvent, un agent représentatif avec un horizon de vie infini est modélisé, ce qui est éloigné de la réalité empirique, dans la mesure où chaque individu a une espérance de vie finie. Ainsi, ce type de modélisation empêche de comparer les effets redistributifs intergénérationnels, c'est à dire, l'effet des politiques sur les différentes générations d'agents, comme le font les OLGs.

Les résultats des modèles CGE dépendent aussi fortement des choix de modélisation tels que le choix du calibrage et des paramètres liées aux comportements des agents économiques.

Ainsi, en termes de prévision, les modèles macro-économétriques ainsi que les modèles de type VAR semblent être les plus fiables d'un point de vue empirique (Collard et Fève, 2008).

PARTIE II : UN MODÈLE EMPIRIQUE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL A GÉNÉRATIONS IMBRIQUÉES SUR DONNÉES FRANÇAISES APPLIQUÉ AU CAS DES INVESTISSEMENTS BAS CARBONE DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE

Cette partie présente en détail le modèle CGE-OLG employé dans cette thèse pour répondre à la question de recherche posée. Le chapitre 1 présente et justifie différents choix de modélisation pour créer un modèle macroéconomique utilisé pour étudier les effets des investissements à faible teneur en carbone dans le secteur de l'électricité. Le chapitre 2 présente le modèle en détails (équations). Le chapitre 3 présente le paramétrage et la calibration.

CHAPITRE 1 : QUELQUES CHOIX DE MODÉLISATION

Le modèle développé comporte un découpage sectoriel (cinq secteurs : agriculture, industrie hors énergie, énergie, construction, services) et générationnel (quinze générations d'agents avec un pas temporel quinquennal, en commençant par la génération des 15-19 ans et en terminant par la génération des 85 ans et plus). Ce chapitre explicite en quoi notre modèle intègre des éléments de modèle EGC et en quoi il intègre des éléments de modèle OLG afin de répondre adéquatement à la question posée.

1. Modélisation de l'offre : secteurs économiques et lien avec la littérature

Sur le volet de la modélisation de l'offre, notre modèle est proche des modèles d'équilibre général calculable. Le choix a été de calquer le plus possible notre modélisation sur la comptabilité nationale. Ainsi, tout comme dans les modèles d'équilibre général calculable, on utilise la matrice de comptabilité sociale (MCS). Une matrice de comptabilité sociale (MCS) représente les flux de toutes les transactions économiques qui ont lieu dans une économie. Il s'agit d'une représentation matricielle des comptes nationaux. Elle est en général créée pour un pays donné et une seule année. Elle est donc d'essence statique. Pour une même année, cette matrice présente différents comptes (de production, de distribution, de redistribution et d'utilisation des revenus).

La demande de facteurs de production est issue des conditions du premier ordre des fonctions de production et/ou de valeur ajoutée. En l'occurrence, le modèle construit dans le cadre de cette thèse introduit les demandes de facteurs qui sont issues des conditions de premier ordre des fonctions de production, de valeur ajoutée et de consommations intermédiaires, qui sont des fonctions de type CES (à élasticité de substitution constante).

Bien qu'il s'agisse d'un exercice de simulation et non de prévision, il est toujours plus intéressant, lorsque l'on s'inscrit dans un cadre empirique, d'obtenir des résultats qui soient d'autant plus proches de la comptabilité nationale (lorsque l'année de référence n'est pas marquée par des facteurs cycliques, comme c'est le cas pour notre année de base, 2017). Ainsi, la production nationale dans le modèle est déterminée de manière comptable par l'égalité entre la production et les composantes de demande de la production.

Du côté de la détermination des prix, les équations de prix du modèle sont des équations de type comptable pour obtenir les données empiriques précises pour notre année de base au moment de la calibration (2017⁷).

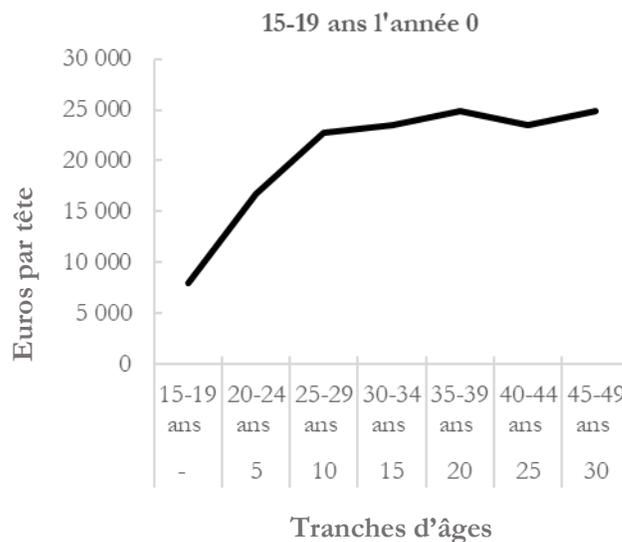
Dans la plupart des modèles d'équilibre général calculables, le comportement d'un ménage de la période actuelle dépend de son comportement à la période passée et l'équilibre est obtenu à chaque

⁷ Année choisie car l'output gap est relativement proche de 0. On choisit cette année car ces données macroéconomiques ne sont donc pas modifiées par le cycle économique.

période. Toutefois, ces modèles EGC ne modélisent souvent qu'un ménage représentatif sur un horizon temporel infini (Johansen, 1960 ; Evans, 1971 ; Gerlagh et der Zwann, 2003 ; Boringer et Loschel, 2006, Capros et al, 2013 ; Paltsev, 2015). Cette modélisation n'étant pas assez désagrégée pour répondre à la question posée sur les effets redistributifs intergénérationnels, j'ai été amenée à m'inspirer davantage des modèles à générations imbriquées pour modéliser le bloc de la demande.

2. Modélisation des ménages et lien avec la littérature

Nous avons adopté une modélisation qui nous permet de voir à pas quinquennal l'évolution des quinze générations sur la période considérée. Dans la mesure où le modèle s'étend de l'année 0 à l'année 33 (calibré sur 2017 pour l'année 0, et visant 2050), il n'est pas possible de voir le bien-être de toutes les générations sur tout leur cycle de vie. Par exemple, un agent qui a 20 ans l'année 0, en aura 53 l'année 33. Ainsi, nous étudions son bien-être sur la période considérée, mais pas son bien-être avant ces 20 ans et après ses 50 ans dans le modèle (Graphique 1).



Sources : INSEE, 2017; SRCV (Statistiques sur les ressources et conditions de vie)

Graphique 1 : Montant moyen de consommation annuel en euros par tête pour la génération des 15-19 ans née l'année 0

Note de lecture : Le chiffrage correspond aux montants de consommation en euros pour un agent représentatif d'une génération. Pour 2017, afin de reconstituer le montant agrégé de la consommation des ménages (1223.7 Md€), on procède en plusieurs étapes. Pour chaque génération, on reprend le montant de consommation d'un agent représentatif de la génération en euros (7903 euros pour la première génération). Puis, on multiplie ce chiffre par la population de la génération (0.0039 milliards pour la première génération) pour obtenir le montant de consommation de la génération considérée (31 milliards d'euros pour la première génération). Lorsqu'on effectue le même calcul pour toutes les générations, on retombe bien sur le chiffre agrégé de 1223.7 milliards d'euros.

Souvent, les données de cycle de vie et notamment l'accumulation du capital jouent un rôle clé dans les modèles à générations imbriquées. La plupart des modèles à générations imbriquées s'attachent à montrer la dynamique du capital par tête, ce qui requiert de calculer un stock de capital par cohorte. Empiriquement, ces informations ne sont pas toujours disponibles, surtout lorsqu'il s'agit d'obtenir un découpage par âge. Pour obtenir le stock de capital par tête en comptabilité nationale française, on se réfère aux actifs par âge. Plus précisément, le capital par unité de travail efficient est représenté par les actifs des ménages. Grâce à la base de données SRCV (Statistiques sur les ressources et conditions de vie), il est possible d'avoir les actifs par génération par unité de travail efficient (décrit en détail dans la section calibration 4.1 du Chapitre 3). L'exploitation des données nationales nous donne la répartition des actifs par génération par unité de travail efficient suivante (dans le scénario de base, pour l'année de base, 2017):

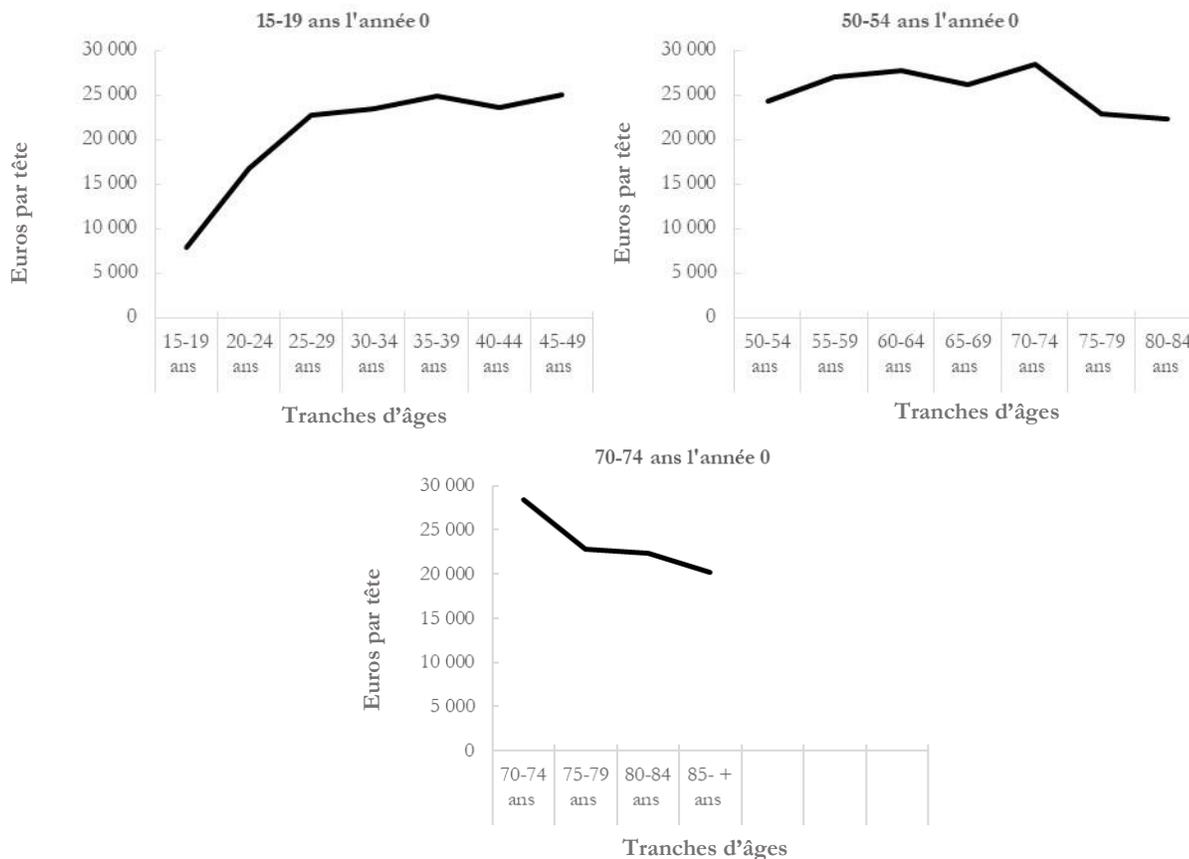


Sources : INSEE, 2017; SRCV

Graphique 2: Montant des actifs en euros par tête pour toutes les générations l'année 0

Note de lecture : Le chiffrage correspond aux montants d'actifs en euros pour un agent représentatif d'une génération. Pour 2017, afin de reconstituer le montant agrégé des actifs des ménages (3644.95 Md€), on procède en plusieurs étapes. Pour chaque génération, on reprend le montant des actifs d'un agent représentatif de la génération en euros (12845 euros pour la première génération). Puis, on multiplie ce chiffre par la population de la génération (0.0039 milliards pour la première génération) pour obtenir le montant des actifs de la génération considérée (51 milliards d'euros pour la première génération). Lorsqu'on effectue le même calcul pour toutes les générations, on retombe bien sur le chiffre agrégé de 3644.95 milliards d'euros.

Dans les commentaires des résultats du modèle qui vont suivre, nous commenterons en particulier trois générations sur la période : une jeune génération (15-19 ans en 2017), une génération d'âge intermédiaire (50-54 ans en 2017), une génération âgée (70-74 ans en 2017).



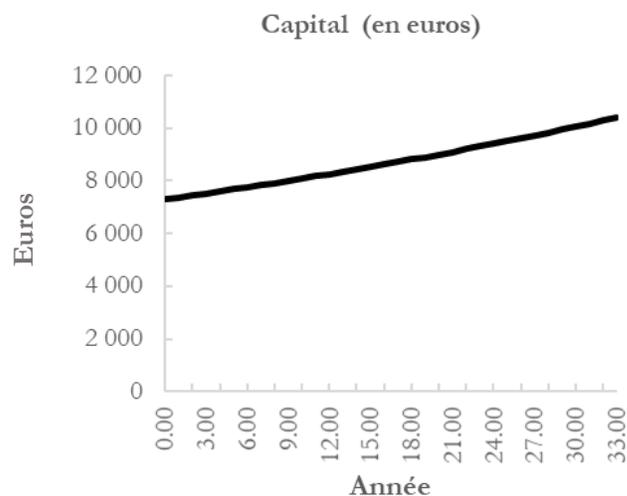
Sources : INSEE, 2017; SRCV

Graphique 3: Montant de consommation en euros par tête pour toutes les générations l'année 0

Note de lecture : Le chiffrage correspond aux montants de consommation en euros par tête. Pour 2017, afin de reconstituer le montant agrégé de la consommation des ménages (1223.7 Md€), on procède en plusieurs étapes. Pour chaque génération, on reprend le montant de consommation d'un agent représentatif de la génération en euros (7903 euros pour la première génération). Puis, on multiplie ce chiffre par la population de la génération (0.0039 milliards pour la première génération) pour obtenir le montant de consommation de la génération considérée (31 milliards d'euros pour la première génération). Lorsqu'on effectue le même calcul pour toutes les générations, on retombe bien sur le chiffre agrégé de 1223.7 milliards d'euros.

Concernant la lecture des graphiques, prenons l'exemple du graphique illustrant l'évolution de la consommation dans le scénario de base pour la génération des individus qui ont 15-19 ans l'année 0. L'année 5, ils ont 20-24 ans, l'année 10, ils ont 25-29 ans et l'année 30 ils ont 45-49 ans. Dans la mesure où la période étudiée s'étend sur 34 ans (de 2017 à 2050), il n'est pas possible d'étudier le comportement d'une génération sur ses 85 ans de vie. Ce choix de modélisation n'est pas un problème dans la mesure où la question de recherche posée traite des effets redistributifs des modes de financement d'une trajectoire d'investissements sur une période bien précise (30 ans), le but étant de voir sur cette période considérée exclusivement, l'impact différencié pour chaque génération.

Le graphique suivant apporte des informations sur la dynamique du capital dans le scénario de base. Dans ce scénario de base, il n'existe aucun choc d'investissement (et donc pas de choc de financement). La seule chose qui influe sur les variables est la trajectoire du taux de progrès technique (1% par an, tiré des données passées) et la trajectoire de croissance démographique de la population (Nations Unies).



Sources : INSEE, 2017.

Graphique 4: Graphique illustrant la dynamique du capital (en euros)

Note de lecture : Sur l'axe des abscisses, on trouve les années, et sur l'axe des ordonnées, on trouve les montants en euros de la population agrégée.

La croissance du stock de capital net (utilisé par les entreprises et détenu par les ménages) dans le temps est positive (1.08% en moyenne sur la période) car déterminée entre autre par la croissance de la population et du taux de progrès technique dans le temps qui est positive (les autres déterminants tel que les prix restent constants en l'absence de choc).

Notre modélisation permet ainsi de suivre une génération sur la période étudiée (lecture des résultats en diagonale comme montré dans le Tableau 1). Ce choix de modélisation permet d'étudier les effets redistributifs intergénérationnels de deux manières : soit le changement de comportement d'une classe d'âge sur toute la période (en étudiant sa consommation, ses montants d'actifs, de revenu disponible nets et bruts) - dans ce cas, il ne s'agit alors *pas* des mêmes individus chaque année – soit en suivant au long du cycle de vie d'une génération d'individus nés la même année (diagonale grisée dans le Tableau 1). Par exemple, si nous souhaitons suivre les 50-54 ans l'année 0 et voir leur bien-être à la fin

de la période, nous allons regarder le bien-être (consommation dans notre modèle) des 80-84 ans à l'année 30.

Tableau 1⁸ : Lecture des effets redistributifs des différentes générations de ménages

Generation/ Year	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15
0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
15	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
19	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
22	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
23	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
24	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
25	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
27	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
28	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
29	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
30	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
31	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
32	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
33	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Note de lecture : Ce tableau montre le bien-être (donné par la consommation) d'un groupe d'âge (les 15-24 ans pour la première génération) sur toute la période. Cette information est intéressante pour les décideurs publics car elle permet de voir comment le bien-être d'un groupe d'âge particulier évolue dans le temps, et surtout, face à un choc. On note bien que dans cette grille de lecture, les individus ne sont pas les mêmes chaque année. En effet, les individus appartenant au groupe d'âge des 15-19 ans l'année 0 sont différents des individus appartenant au groupe d'âge des 15-19 ans l'année 15. Par exemple, ceux qui ont 19 ans l'année 0 auront 20 ans l'année 1 et feront partie du groupe d'âge suivant (G2 dans le tableau). Lorsque l'on observe maintenant la diagonale grisée, au contraire, dans ce cas, on note une génération d'agent tout au long de leur cycle de vie. Ainsi, si on veut observer un groupe d'individus particuliers nés sur une période précise, il faut adopter cette lecture des résultats en diagonale. Par exemple, dans le cas des 15-24 ans l'année 0, si l'on veut observer leur bien être l'année 15, il faudra regarder le niveau de consommation des 30-34 ans l'année 15.

⁸ Dans ce tableau, deux grilles de lecture sont possibles. La lecture en colonne permet de suivre les individus appartenant au même groupe d'âge tout au long de la période. Dans le cas de la seconde colonne, par exemple, les individus de la première génération (15-19 ans) l'année 0 sont différents de ceux de l'année 30 par exemple. La lecture en diagonale (cellules grisées) permet de suivre une génération d'agents tout au long de son cycle de vie, ce qui permet de suivre les mêmes individus sur la période étudiée.

CHAPITRE 2 : LE MODELE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

La dynamique du modèle reflète les interactions en équilibre général entre les comportements économiques de différentes générations de ménages, les politiques d'investissement à faible émission de carbone sur les entreprises et les ménages, et les réponses optimales des agents privés aux signaux de prix (salaires, prix de l'énergie par le biais d'un prix du carbone ou d'une hausse des prix de l'électricité) en ce qui concerne leur offre et leur demande de travail et de capital.

Le niveau des investissements, le signal prix et les taxes prélevées sur les agents privés influencent la dynamique agrégée à travers le prix de l'énergie et la dynamique des investissements. Ainsi, ils affectent le niveau de la demande énergétique et non énergétique, la consommation intermédiaire et le capital.

Le cadre OLG en équilibre général permet d'introduire une relation entre les politiques fiscales, la dynamique du capital, la démographie des salaires et le bien-être non environnemental des ménages.

1. Le programme des ménages⁹

Consommation des ménages.

Le modèle à générations imbriquées présenté ici modélise le comportement de 15 agents représentatifs, des plus jeunes 15-19 ans aux plus âgés vivant à l'horizon 2050. Chaque individu représentatif d'une génération, né à la période g ($g \leq t$), ne connaît pas avec certitude sa durée de vie T . À chaque période, il fait face à une probabilité p de mourir. La probabilité de survie d'un individu né à la période g est :

$$\varphi(g, \dots, t) = (1 - p)^{t-g}$$

⁹ Étalonnage du modèle et compte central à l'état stationnaire : Le modèle est simulé entre 2017 et 2050. Un individu représentatif de la génération $g=1$ est âgé de 15 à 19 ans en 2017 ($t=0$). Il sera âgé de 48 à 52 ans en 2050. Le modèle admet

15 types d'agents représentatifs. La population totale est la somme des populations par génération :
$$N_t = \sum_{g=1}^{g=G} N_{g,t} .$$

La population s'accroît en fonction de la mortalité $1 - \phi$, des taux de naissance et d'immigration

$N_{t+1} = N_t \phi + \chi_1 N_t \phi + \chi_2 N_t \phi$. $N_t \phi$ est la population précédente encore en vie. $\chi_1 N_t \phi$ est la population née dans la période et $\chi_2 N_t \phi$ le flux net d'immigration. La population totale croît au taux n : $(1+n) = \phi(1 + \chi_1 + \chi_2)$.

La fonction de survie φ peut être considérée comme une mesure du degré de myopie de la génération. L'agent représentatif d'une génération maximise une fonction d'utilité espérée $U_{g,t}$ dont le coefficient absolu pour le risque constant (cf. Botman et al, 2006, Kumhof et al, 2010) :

$$E(U_{g,t}) = \sum_{t=g}^{t=g+T} (\beta(1-p))^{t-g} \frac{(u_{g,t})^{1-\gamma}}{1-\gamma}$$

Avec γ le coefficient d'aversion au risque et $1/\gamma$ l'élasticité de substitution inter-temporelle. Si $\gamma = 1$, la fonction d'utilité devient logarithmique. β est le facteur d'actualisation de l'utilité. La fonction d'utilité de chaque période est une CES de la consommation $C_{g,t}$ et du temps de loisir $l_{g,t}$:

$$u(C_{g,t}, l_{g,t}) = (\omega_c c_{g,t}^\rho + \omega_H (l_{g,t})^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$$

$C_{g,t}$ est la consommation de la génération g durant la période t . $l_{g,t}$ représente le temps de loisir. ω_c et ω_H sont les paramètres de la fonction d'utilité.

Avec σ l'élasticité de substitution entre la consommation et le loisir :

$$\sigma = \frac{1}{1-\rho}$$

Les heures de travail $H_{g,t}$ et le loisir $l_{g,t}$ sont liés par la contrainte :

$$H_{g,t} = 1 - l_{g,t}$$

Comme chaque individu représentatif ne connaît pas par avance sa date de décès, la construction des contraintes de budget repose sur l'existence d'un marché de l'assurance (Blanchard, 1985) qui permet d'éviter les défauts de paiement des ménages débiteurs et fait payer une prime pour chaque agent qui ne décède pas. En notant $A_{g,t}$ le patrimoine financier net réel, on supposera que si l'individu représentatif emprunte un montant nominal $-A_{g,t-1}$, il versera des annuités d'un montant $-(\bar{r}_t + \pi_{g,t})A_{g,t}$ avec \bar{r}_t le taux de rendement réel du capital et $\pi_{g,t}$ la prime d'assurance. S'il décède avant le remboursement de la totalité de la somme empruntée, l'assurance couvre le solde dû. À l'opposé, si l'individu épargne une somme $A_{g,t-1}$, il perçoit à chaque période $(\bar{r}_t + \pi_{g,t})A_{g,t}$, mais en cas de décès son patrimoine est versé à l'assureur. Le taux de rendement du capital de chaque génération est :

$$r_{g,t} = \bar{r}_t + \pi_{g,t}$$

Pour une population de grande taille, le système d'assurance collecte avec certitude une fraction $p = 1 - \varphi$ du patrimoine des ménages (la fraction des ménages qui disparaissent). Le système d'assurance

est supposé être parfait fonctionnant sans coût, redistribuant ce prélèvement à l'ensemble des ménages encore en vie (une fraction $(1 - p)$) :

$(1 - p)\pi_{g,t} = (1 + \bar{r}_t)p$. La prime reçue par chaque agent représentatif encore vivant s'exprime alors comme une fraction de la richesse :

$$\pi_{g,t} = \frac{p(1 + \bar{r}_t)}{1 - p}$$

L'expression du taux de rendement réel du capital se simplifie à :

$$r_{g,t} = \bar{r}_t + \pi_{g,t} \approx \frac{\bar{r}_t + p}{1 - p}$$

La contrainte d'accumulation de la richesse financière (avec $A_{g,t}$ le patrimoine financier net réel) est :

$$A_{g,t+1} = A_{g,t} + \tau_t^A r_{g,t} A_{g,t} + \tau_t^H W_{g,t} H_{g,t} - (1 + \tau_t^C) C_{g,t}$$

Avec $W_{g,t}$ le salaire réel super-brut (qui inclut non seulement les cotisations patronales mais également les cotisations salariales), $H_{g,t}$ les heures de travail, et τ_t^C le taux de TVA. τ_t^H est le coin socialo-fiscal qui comprend les trois prélèvements sur le salaire que sont les cotisations sociales τ_t^W , l'impôt sur le revenu τ_t^Y et les taxes sur la consommation τ_t^C .

$$\tau_t^H = \frac{(1 - \tau_t^W)(1 - \tau_t^Y)}{(1 + \tau_t^C)} \approx 1 - \tau_t^W - \tau_t^Y - \tau_t^C$$

Le salaire brut reçu par le salarié de la génération g est $W_{g,t}/(1 + \tau_t^P)$ avec τ_t^P le taux des cotisations patronales. Le salaire net perçu par l'agent est $W_{g,t}(1 - \tau_t^S)/(1 + \tau_t^P)$ avec τ_t^S les cotisations salariées. Ainsi les cotisations sociales τ_t^W sont approximativement la somme des cotisations salariées et des cotisations patronales $\tau_t^W \approx \tau_t^S + \tau_t^P$. Le salaire réel disponible que le salarié reçoit in fine après avoir payé la TVA et l'impôt sur le revenu est $W_t \tau_t^H$. De la même manière, on définit les prélèvements sur le patrimoine financier comme suit :

$$\tau_t^A = \frac{(1 - \tau_t^r)(1 - \tau_t^Y)}{(1 + \tau_t^C)} \approx 1 - \tau_t^r - \tau_t^Y - \tau_t^C$$

Soit $V_t(A_{g,t})$ la valeur de la richesse financière. L'équation de Bellman est alors :

$$V_t(A_{g,t}) = u(C_{g,t}, l_{g,t}) + \beta(1 - p)V_{t+1}(A_{g,t+1})$$

On pose $\lambda_{g,t}$ l'utilité marginale de la richesse :

$$\lambda_{g,t} = V'_{g,t}(A_{g,t})$$

Les conditions du premier ordre sont alors :

$$u_c = \lambda_{g,t}(1 + \tau_t^C)$$

$$u_l = \lambda_{g,t}\tau_t^H W_{g,t}$$

$$\lambda_{g,t} = \beta(1 - p)(1 + \tau_t^A r_{g,t})\lambda_{g,t+1}$$

u_c , u_l sont respectivement les utilités marginales de la consommation, du loisir et de la richesse financière. Les équations d'Euler de la consommation et du loisir sont respectivement :

$$\frac{C_{g,t+1}}{C_{g,t}} = \Phi_t$$

$$\frac{l_{g,t+1}}{l_{g,t}} = \left(\frac{W_{g,t+1}\tau_{t+1}^H}{W_{g,t}\tau_t^H} \right)^{-\sigma} \Phi_t$$

Avec :

$$\Phi_t = [\beta(1 - p)(1 + r_t \tau_t^A)]^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{\omega_c^\sigma + \omega_H^{1-\sigma} (W_{g,t+1}\tau_{t+1}^H)^{1-\sigma}}{\omega_c^\sigma + \omega_H^{1-\sigma} (W_{g,t}\tau_t^H)^{1-\sigma}} \right)^{\frac{1-\sigma\gamma}{\gamma(\sigma-1)}}$$

L'offre d'heure de travail est obtenue à partir du taux marginal de substitution entre la consommation et le loisir :

$$H_{g,t} = 1 - l_{g,t} = 1 - \left[\frac{\omega_H}{\omega_c} \right]^\sigma \times C_{g,t} \times (W_{g,t}\tau_t^H)^{-\sigma}$$

$$\ln(H_{g,t}) = \ln(C_{g,t}) + \sigma \times \ln(W_{g,t}\tau_t^H) + cst$$

Nous allons maintenant exprimer la consommation des ménages comme une fraction de la richesse.

Notons $R_{g,t}$ la richesse totale, c'est-à-dire la somme du capital humain et de la richesse financière :

$$R_{g,t} = \sum_{j=t}^T \frac{(1 - p)^{j-t}}{\prod_{i=t}^{j-1} (1 + r_{g,i}\tau_i^A)} C_{g,j}$$

Par récurrence, on obtient :

$$R_{g,t+1} = \frac{1 + r_{g,t}\tau_t^A}{1 - p} (R_{g,t} - C_{g,t})$$

Soit $\omega_{g,t+1}$ la propension à consommer la richesse totale $R_{g,t+1}$.

$$C_{g,t+1} = \omega_{g,t+1} R_{g,t+1} = \Phi_t \omega_{g,t} R_{g,t}$$

Ce qui permet d'obtenir :

$$\omega_{g,t}^{-1} = \Phi_t \omega_{g,t+1}^{-1} \frac{R_{g,t}}{R_{g,t+1}} = \Phi_t \omega_{g,t+1}^{-1} \frac{1 - p}{(1 - \omega_{g,t})(1 + r_{g,t}\tau_t^A)}$$

On obtient finalement après développement une équation de récurrence qui décrit comment les propensions à consommer les richesses évoluent dans le temps.

$$\omega_{g,t}^{-1} = 1 + \phi_t \omega_{g,t+1}^{-1} \frac{1-p}{1+r_{g,t}\tau_t^A}$$

L'équation d'Euler s'exprime :

$$\frac{C_{g,t+1}}{C_{g,t}} = \frac{\omega_{g,t+1} R_{g,t+1}}{\omega_{g,t} R_{g,t}} = \phi_{g,t}$$

En régime de croissance équilibrée, on a :

$$\phi_{g,t} = (1+g) = [\beta(1-p)(1+r_{g,t}\tau_t^A)]^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{\omega_c^\sigma + \omega_H^{1-\sigma}(1+\pi)^{1-\sigma}}{\omega_c^\sigma + \omega_H^{1-\sigma}} \right)^{\frac{1-\sigma\gamma}{\gamma(\sigma-1)}}$$

Les propensions moyennes à consommer ont été calibrées afin de reproduire à l'équilibre stationnaire la distribution de la consommation en fonction de la richesse et l'offre de travail de l'année 2017.

$$\bar{\omega}_g = \frac{\bar{C}_g}{\bar{R}_g}$$

$$\frac{\bar{H}_g}{\bar{C}_g} = \left[\frac{\omega_H}{\omega_c} \right]^\sigma (\bar{W}_g \bar{\tau}^H)^{-\sigma}$$

À l'équilibre stationnaire, on a également :

$$\bar{\phi} = 1 = [\beta(1-\bar{p})(1+\bar{\tau}^A \bar{r}_g)]^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$\beta = \frac{1}{(1-p)(1+\bar{\tau}^A \bar{r}_g)}$$

$$\bar{\omega}_g = 1 - \frac{1-p}{1+\bar{\tau}^A \bar{r}_g} \approx p + \bar{\tau}^A \bar{r}_g$$

Il est supposé qu'une fraction des ménages appartient à la catégorie des ménages non-classiques qui consomment l'ensemble de leur revenu et par conséquent n'épargnent pas et ne disposent pas de patrimoine. Leurs salaires sont supposés être identiques à ceux des ménages classiques. La consommation des ménages non-classiques ($C_{g,t}^*$) est alors déterminée par la simple relation (rule-of-thumb consumers):

$$C_{g,t}^* = \omega_{g,t}^*(Y_{g,t} - T_{g,t})$$

$Y_{g,t}$ et $T_{g,t}$ sont respectivement le revenu disponible brut et le montant des taxes sur le revenu. Ainsi, la différence ($Y_{g,t} - T_{g,t}$) donne le revenu disponible net. $\omega_{g,t}^*$ représente la propension à consommer le revenu pour les ménages non-classiques.

La consommation agrégée est alors : $C_{g,t} + C_{g,t}^* = \lambda \omega_{g,t} R_{g,t} + (1 - \lambda) \omega_{g,t}^* (Y_{g,t} - T_{g,t})$, avec λ la part des ménages classiques.

Après avoir déterminé la consommation agrégée, l'individu représentatif détermine le panier de biens de consommation $C_{g,l,t}$ qu'il adresse à chaque $l=1 \dots L$ branche de l'économie. Pour cela, il minimise

le coût pour une demande agrégée donnée, c'est-à-dire :

$$\min_l \sum_{l=1}^{l=L} p_{l,t} C_{g,l,t}$$

$$C_{g,t} = \left(\sum_{l=1}^{l=L} v_l^{\frac{1}{\sigma}} C_{g,l,t}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Sous la contrainte :

Ce programme permet d'obtenir des fonctions demande et une frontière de prix :

$$C_{g,l,t} = \left(\frac{p_{t,l}}{p_t} \right)^{-\sigma} C_{g,t} \quad p_t = \left(\sum_{l=1}^{l=L} v_l C_{g,l,t}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

De la même manière, l'individu représentatif de chaque génération répartit son temps entre les

différentes branches de l'économie en maximisant son revenu salarial :

$$\max_l \sum_{l=1}^{l=L} W_{l,t} H_{g,l,t}$$

$$H_{g,t} = \left(\sum_{l=1}^{l=L} v_l^{\frac{1}{\sigma}} H_{g,l,t}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Sous la contrainte

Ce qui permet d'obtenir les offres de travail et le salaire moyen de l'économie :

$$H_{g,l,t} = \left(\frac{W_{t,l}}{W_t} \right)^{-\sigma} H_{g,t}$$

$$W_{g,t} = \left(\sum_{l=1}^{l=L} v_l W_{g,l,t}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

L'agrégation prend en compte la taille de chaque cohorte :

$$\Omega_t = \sum_{g=-\infty}^{t-1} N_{g,t} \times \Omega_{g,t} \quad ; \quad C_t = \sum_{g=-\infty}^{t-1} N_{g,t} \times C_{g,t} \quad ; \quad A_{g,t+1} = e_t F_{g,t+1} + B_{g,t+1}$$

2. Les entreprises

On suppose que les entreprises sont en concurrence parfaite dans chacun des cinq secteurs : agriculture, industrie non énergétique, énergie, construction et services. Ceci nous ramène au cas d'une entreprise représentative opérant dans chaque secteur de production. La fonction de production de chaque secteur (s) peut ainsi être représentée par l'équation d'équilibre sur le marché des biens.

De nombreux modèles économiques s'appuient sur les fonctions de production CES pour décrire l'offre d'une économie. Ces fonctions de production CES peuvent inclure seulement deux facteurs de production avec un facteur capital et un facteur travail (Van De Klundert, 1983) ou plus, en tenant compte de l'énergie (voir Manne et Richels (1992), Kemfert (1998), Gonand et Jovet (2015), Henriot et al (2016) entre autres). Certains modèles combinent quatre facteurs de production, comme Rausch (2013) qui inclut, le capital, le travail, les ressources naturelles et les intrants intermédiaires produits.

La fonction de production utilisée dans cet article est une CES avec trois niveaux d'imbrication (*nested CES*) : le premier reliant le stock de capital et de travail pour composer la valeur ajoutée ; le second reliant la demande d'énergie et la consommation intermédiaire non énergétique pour composer les consommations intermédiaires ; le troisième reliant le composite de la valeur ajoutée avec la consommation intermédiaire. Sur ce point, notre modèle s'inspire principalement de Bovenberg et Goulder (1996).

Pour chaque branche (indexée par (b)) (agriculture, industrie non énergétique, industrie énergétique, construction et services), le module K-L de la fonction de valeur ajoutée emboîtée représente la valeur ajoutée par branche à l'année (t) tel que :

$$z_{b,t} = AZ_b \left[\alpha k_b (k_{b,t})^{\frac{\sigma_{KL}-1}{\sigma_{KL}}} + \alpha l_b (h_{b,t} l_{b,t})^{\frac{\sigma_{KL}-1}{\sigma_{KL}}} \right]^{\frac{\sigma_{KL}}{\sigma_{KL}-1}} \quad (1)$$

Le paramètre σ_{KL} est l'élasticité de substitution entre le capital et le travail ; αk_b et αl_b sont des paramètres de pondération ; AZ_b est le progrès technique ; $k_{b,t}$ est le stock de capital physique du secteur privé ; $l_{b,t}$ est la force de travail totale ; $h_{b,t}$ est le nombre annuel moyen d'heures travaillées. Ainsi, le produit $h_{b,t} l_{b,t}$ correspond au nombre total d'heures travaillées. La maximisation du profit de la fonction de production sous sa forme intensive donne les prix optimaux des facteurs, à savoir le coût d'équilibre du capital physique et le salaire brut d'équilibre par unité de travail efficace.

Le module E-V de la fonction de production emboîtée est la consommation intermédiaire par chaque branche (b) à chaque année (t) tel que :

$$ic_{b,t} = AIC_b \left[\alpha e_b (e_{b,t})^{\frac{\sigma_{ev}-1}{\sigma_{ev}}} + \alpha v_b (v_{b,t})^{\frac{\sigma_{ev}-1}{\sigma_{ev}}} \right]^{\frac{\sigma_{ev}}{\sigma_{ev}-1}} \quad (2)$$

Le paramètre σ_{EV} est l'élasticité de substitution entre la demande d'énergie et la consommation intermédiaire non énergétique ; αe_b et αv_b sont des paramètres de pondération ; AIC_b est une constante de calibration ; $e_{b,t}$ est la demande d'énergie ; $v_{b,t}$ est la consommation intermédiaire non énergétique.

En joignant la consommation intermédiaire ($ic_{b,t}$) et la valeur ajoutée ($z_{b,t}$) dans une fonction CES, on obtient la fonction de production ($y_{b,t}$) telle que :

$$y_{b,t} = A_b \left[\alpha z_b (z_{b,t})^{\frac{\sigma_{KLEV}-1}{\sigma_{KLEV}}} + \alpha ic_b (ic_{b,t})^{\frac{\sigma_{KLEV}-1}{\sigma_{KLEV}}} \right]^{\frac{\sigma_{KLEV}}{\sigma_{KLEV}-1}} \quad (3)$$

Le paramètre σ_{KLEV} est l'élasticité de substitution entre la valeur ajoutée et la consommation intermédiaire ; αz_b et αic_b sont des paramètres de pondération ; A_b est une constante de calibration ; $ic_{b,t}$ est la consommation intermédiaire ; $z_{b,t}$ est la valeur ajoutée.

Comme dans Bovenberg et Goulder (1996), les fonctions CES de chaque branche ont la même structure, les seules différences étant le paramétrage spécifique à chaque branche (voir section 2.4.). Une branche à forte intensité énergétique (comme le secteur de l'énergie) est relativement plus sensible aux chocs sur les marchés de l'énergie. De même, un choc sur le marché des capitaux pour le capital influence relativement plus une branche avec une plus grande intensité de capital, et la fraction des ménages qui possèdent relativement plus de capital.

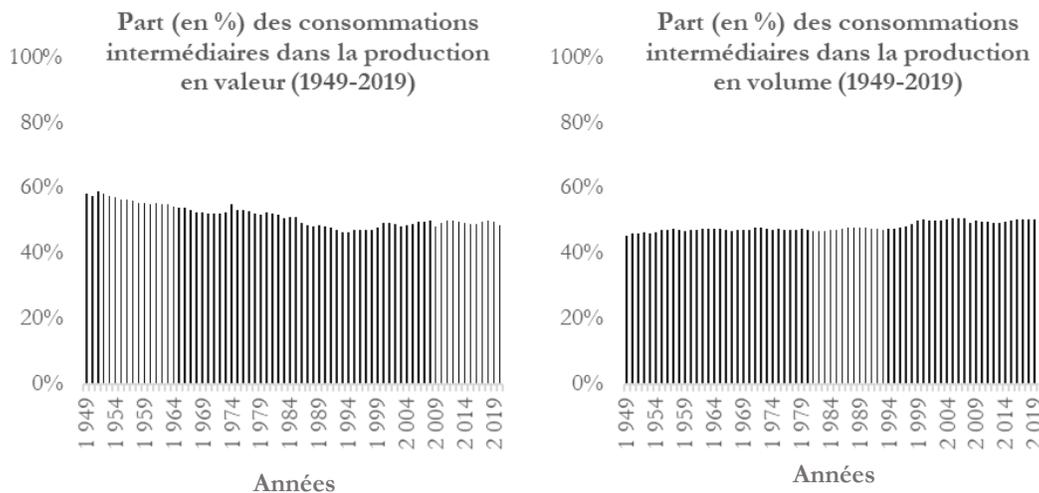
Élasticité de substitution entre le travail et le capital : Le modèle EGC récursif-dynamique Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) pour l'ensemble de l'économie mondiale (Paltsev, 2005) utilise la revue de la littérature et les travaux menés par Cossa (2004) pour sa calibration des élasticités. Comme le mentionne Paltsev (2005), la capacité technique à faire des compromis est résumée par les élasticités de substitution. Dans un article plus récent (Paltsev, 2017), il ajoute que dans le cas où une nouvelle technologie devient compétitive, il y a un effet de substitution avec l'autre intrant (le plus conventionnel). En termes de données, ils utilisent la même élasticité de substitution entre le travail et le capital dans leur fonction de production, pour tous les secteurs, égale à 1. Gechert et al

(2019) ont estimé les élasticités de substitution entre le capital et le travail pour les régions PECO et Ouest et l'UE27. Ils ont trouvé respectivement 0.41 pour les PECO, 0.49 pour les pays de l'Ouest et 0.56 pour l'UE27.

Sur la base de données françaises, Combet et al (2014), utilisent un modèle EGC standard avec une fonction KLEM emboîtée qui agrège deux facteurs de production primaires : capital, travail, avec deux biens, l'énergie et un bien composite.

Les élasticités de substitution caractérisant l'arbitrage entre valeur ajoutée KL, énergie E et production composite M pour chacun des deux secteurs représentés (production composite et production d'énergie) sont issues de la littérature. Ainsi, la substitution du capital K au travail L est fixé dans notre modèle à 0.5 et la substitution de la valeur ajoutée Z aux consommations intermédiaires est fixée à 0.1.

Les facteurs de production sont complémentaires lorsque, pour produire une certaine quantité, il faut utiliser une quantité fixe de travail et de capital. Dans le cas de la production française, nous observons que les facteurs de productions (la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires) sont proches de la complémentarité (substituabilité faible) car la part dans la production est relativement constante dans le temps (Graphique 5).



Sources : INSEE, 2017.

Graphique 5: Part (en %) des consommations intermédiaires dans la production en valeur et en volume (1949-2019)

Sur des données empiriques françaises, le modèle économétrique MESANGE (2010) estime les élasticités de substitution entre facteurs de production pour différents secteurs de l'économie. La valeur de l'élasticité de substitution entre le travail et le capital change peu d'une version à l'autre : 0,5 dans la version actuelle. Le modèle qui sous-tend le comportement des entreprises est tiré de Allard-Prigent

et al (2002). Il décrit une économie avec n biens différenciés ($i = 1, \dots, n$) produits à partir du travail et du capital selon une fonction CES (c'est-à-dire, avec une élasticité de substitution constante entre le capital et le travail) K-EL, pour « K » le stock de capital physique, « E » le progrès technique et « L » le facteur travail. La valeur de l'élasticité de long terme de l'emploi manufacturier à son coût réel (qui est aussi l'élasticité de substitution entre le capital et le travail) est fixée à 0.75. La valeur de l'élasticité de long terme de l'emploi non manufacturier à son coût réel (qui est aussi l'élasticité de substitution entre le capital et le travail) est estimée à 0.43.

Comme notre ventilation sectorielle est différente (pas deux mais cinq secteurs), nous avons préféré adopter une élasticité de substitution identique pour tous les secteurs (2010) et égale à l'élasticité totale estimée à 0.5 dans leur version la plus récente (pour l'ensemble de l'économie). Des analyses de sensibilité seront faites sur ce paramètre.

Élasticité de substitution entre l'énergie et la valeur ajoutée : Dans Paltsev (2016), pour l'élasticité de substitution entre l'énergie et la valeur ajoutée, les auteurs estiment une valeur comprise entre 0.6 et 1 (selon les pays). Dans Paltsev (2017), pour l'élasticité de substitution entre l'énergie et la valeur ajoutée, les auteurs estiment une valeur de 0.4 dans la plupart des secteurs, et de 0.5 pour l'énergie et les autres industries. En utilisant un modèle OLG, Rausch (2013) a construit des fonctions CES emboîtées (capital, travail, énergie-matériaux) avec les mêmes élasticités de substitution pour chaque secteur (d'après Paltsev, 2005).

La modélisation de chaque secteur de production est partiellement identique dans la mesure où les élasticités de substitution entre les facteurs de production dans la fonction de production sont les mêmes. Cependant, les impacts sectoriels diffèrent entre les secteurs dans la mesure où les autres paramètres (calibrés) diffèrent d'un secteur à l'autre. En effet, l'intensité capitaliste et le progrès technique (dans le cas de la fonction de valeur ajoutée) ou le paramètre de pondération dans le cas de la fonction de production de type CES sont différents d'un secteur à l'autre. L'analyse des effets d'éviction doit tenir compte du fait qu'il n'y a pas de différence sectorielle dans les élasticités de substitution).

Dans ce modèle, la dynamique de l'investissement reflète l'accumulation du capital :

$$k_{b,t+1} = k_{b,t}(1 - \delta_{0,b} - \gamma_{rate} - n) + inv_{b,t} \quad (4)$$

où $k_{b,t}$ est le stock de capital physique de la branche (b) à l'année (t) ; $\delta_{0,b}$ est la dépréciation du capital ; γ_{rate} est le taux de croissance du progrès technique ; n est le taux de croissance de la population ; $inv_{b,t}$ est l'investissement. Chaque variable est exprimée par travailleur efficace.

Tous les prix (non énergétiques) du modèle sont modélisés de manière comptable : prix de la valeur ajoutée, de la production domestique, de production totale, des consommations intermédiaires, de l'énergie, de l'investissement, et salaires. Ainsi, le prix des ressources est déterminé par :

$$pr_{s,t} = (pynat_{s,t} y_{s,t} + pimp_{s,t} m_{s,t}) / (y_{s,t} + m_{s,t}) \quad (5)$$

$pr_{s,t}$ est le prix des ressources, $pynat_{s,t}$ est le prix de la production domestique, $y_{s,t}$ représente la production domestique, $pimp_{s,t}$ est le prix des importations, $m_{s,t}$ représente les importations.

Le prix de la valeur ajoutée est déterminé par :

$$(1 - tz0_b - tsz0_b) pz_{b,t} z_{b,t} = (1 + tw0_{b,t}) (w_{b,t} h_{b,t} l_{b,t}) + pinv_{b,t} (r0 + delta0_b + \tau^r) k_{b,t} \quad (6)$$

$tz0_b$ est le taux des autres impôts sur la production par branche¹⁰, $tsz0_b$ est le taux des autres subventions sur la production par branche¹¹. $pz_{b,t} z_{b,t}$ représentent respectivement le prix et le volume de la valeur ajoutée pour une branche. $tw0_b$ est le taux des cotisations patronales calculé à partir de la rémunération des salariés et de la masse salariale données par la comptabilité nationale (INSEE 6 .205). $w_{b,t} h_{b,t} l_{b,t}$ représentent respectivement le salaire horaire, les heures travaillées par tête et le volume de travail par branche. $pinv_{b,t}$ et $k_{b,t}$ représentent respectivement le prix de l'investissement et le volume de capital pour une branche. $r0$ représente le taux d'intérêt de l'économie et $delta0_b$ la dépréciation du capital par branche. τ^r est le taux de la taxe sur le capital.

Le prix de l'investissement et le prix de production sont déterminés par le prix des ressources, calibré sur l'année de base (2017).

¹⁰ D29 dans la comptabilité nationale de l'INSEE.

¹¹ D39 dans la comptabilité nationale de l'INSEE.

Tableau 2 : Paramètres du modèle pour les entreprises¹²

Paramètres des entreprises	Valeur				
	Agriculture	Secteur manufacturier	Energie	Construction	Service
Élasticité de substitution entre :					
le capital et le travail	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
la demande d'énergie et la consommation intermédiaire non énergétique	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
la valeur ajoutée et la consommation intermédiaire	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Répartition optimale: du capital dans la valeur ajoutée	0.18	0.05	0.37	0.01	0.11
de la consommation intermédiaire non énergétique dans la consommation intermédiaire	0.99	0.99	0.16	1	1
la valeur ajoutée dans la fonction de production	0.01	0.00	0.00	0.01	0.97
le progrès technique	0.07	0.09	0.15	0.06	0.07
Paramètres de la :					
Fonction de consommation intermédiaire	1.22	1.15	1.74	1.07	1.12
Fonction de production	1.70	1.50	1.37	1.74	1.81

3. Demande et prix de l'énergie

La demande d'énergie dans la branche (b) à l'année (t) dépend notamment de AIC_b , $\alpha e_b (= 1 - \alpha v_b)$, et σ_{EV} , des prix des consommations intermédiaires ($pic_{b,t}$) et du prix de l'énergie ($pe_{b,t}$), telle que :

$$\log(e_{b,t}) = (\sigma_{ev} - 1) \log(AIC_b) + \sigma_{ev} \log(pic_{b,t}) - \sigma_{ev} \log(pe_{b,t}) + \log(ic_{b,t}) + \sigma_{ev} \log(1 - \alpha v_b) \quad (7)$$

¹² Les paramètres de la fonction de consommation intermédiaire et de la fonction de production sont les constantes de calibration AIC_b et A_b décrites page 74.

Le paramètre σ_{EV} est l'élasticité de substitution entre la demande d'énergie et la consommation intermédiaire non énergétique ; αv_b est un paramètre de pondération ; $A_{IC,b}$ est un paramètre de calibration ; $pic_{b,t}$ est le prix de la consommation intermédiaire ; $pe_{b,t}$ est le prix de l'énergie ; $^{13}e_{b,t}$ est la demande d'énergie ; $ic_{b,t}$ est la consommation intermédiaire.

L'activité de la branche énergie est relativement plus affectée par un signal de prix du carbone pour les entreprises que les autres branches. La consommation intermédiaire de la branche énergie dépend principalement de la demande énergétique de chaque branche. Les branches non-énergétiques sont influencées par la demande non-énergétique. Ainsi, la production est relativement plus affectée dans la branche énergie en cas d'augmentation du signal prix du carbone sur les entreprises.

Ainsi, la part de l'énergie dans les consommations intermédiaires de la branche énergie est importante (50 %). Autrement dit, pour produire l'équivalent d'un euro d'énergie, il faut 0.5 € d'énergie.

Tableau 3: Consommations interbranches en 2017 (en % de la production totale de la branche)

	Agriculture	Secteur manufacturier	Energie	Construction	Service
Agriculture	20 %	0 %	6 %	0 %	0 %
Secteur manufacturier	6 %	50 %	5 %	2 %	2 %
Energie	26 %	10 %	44 %	26 %	7 %
Construction	0 %	1 %	0 %	17 %	1 %
Service	7 %	11 %	14 %	15 %	31 %

L'impact d'un choc diffère également d'une branche à l'autre puisque les paramètres diffèrent entre les branches. Dans la branche énergie, l'intensité énergétique et le paramètre de calibration $AIC_{b,t}$, sont plus forts que dans les autres branches, ce qui compense partiellement l'effet négatif du prix de l'énergie sur la demande d'énergie de la branche énergie. L'intensité capitalistique est également plus élevée dans la branche énergie, ce qui amplifie l'impact d'un choc positif sur la demande de capital de la branche énergie. Tous ces mécanismes seront analysés empiriquement et plus en détail dans la section 3 ci-dessous qui présente les résultats.

Dans la littérature, le signal du prix du carbone sur les entreprises peut être prélevé : i) sur le stock de pollution lié au stock de capital ou à la production (comme dans Bovenberg et Heijdra, 1998 ; Heijdra

¹³ $pci_{s,b,t} = pr_{s,t} + \text{residue}(s, b)$; $pe_{b,t} = pe_{energy,b,t} (1 + cpf_t + wpf_t)$

, 2006 ; Hoel et Karp, 2002 ; Chiroleu-Assouline et Fodha , 2006, 2009) ; ii) sur les émissions de carbone (Rausch et Yonezawa, 2018 ; Rausch, 2013) ; iii) elle peut également concerner les quantités, produites (Fell, MacKenzie et Pizer, 2012) ou vendues (Fodha, Seegmuller et Yamagami, 2014) ; iv) ou les prix des combustibles fossiles (Davies, Shi et Whalley, 2014).

Notre modèle inclut deux prix de l'énergie comme dans Fried, Novan et Peterman (2018) par exemple : un prix de l'énergie payé par les entreprises, et un prix de l'énergie payé par les consommateurs finaux. Tous deux sont liés de manière endogène au prix du carbone dans le modèle.

Dans ce contexte, le prix de l'énergie payé par les entreprises ($pe_{b,t}$) dans chaque branche (agriculture, industrie non-énergétique, énergie, construction et services) dépend du prix des ressources énergétiques¹⁴ hors taxes ($pci_{energy,b,t}$) qui est issue d'une fonction CES du prix de production et des importations, auquel se rajoute les marges de transport et de distribution, le prix du signal carbone payé par toutes les entreprises (cpf_t)¹⁵, l'augmentation du prix de gros de l'énergie payé par l'entreprise (wpf_t) qui est identique dans toutes les branches et les autres taxes :

$$pe_{b,t} = pci_{energy,b,t} (1 + cpf_t + wpf_t) \quad (8)$$

Ainsi, une hausse du coût de production des branches de l'énergie (gaz, pétrole, etc.) et/ou des coûts des importations augmente le prix des ressources ($pci_{energy,b,t}$) qui se transmet au prix de l'énergie $pe_{b,t}$.

L'augmentation des prix de gros payés par les entreprises (wpf_t) est calculée par IHS Markit, et est en ligne avec la trajectoire d'investissement dans le secteur de l'électricité (voir présentation détaillée des scénarios).

¹⁴ Les ressources énergétiques sont la somme de la production et des importations énergétiques.

¹⁵ Conformément aux considérations du FMI (Chen et al, 2020), nos simulations supposent la mise en place d'une tarification uniforme du carbone pour les entreprises par une extension du système actuel de quotas de carbone de l'EU-ETS à toutes les branches d'activité. Ainsi, notre modèle applique un prix uniforme du carbone pour toutes les branches. La demande énergétique étant différente selon les branches, l'impact d'une hausse du prix du carbone sur les entreprises peut être différent d'une branche à l'autre.

4. Les finances publiques

Les recettes publiques (rev_t) dans le modèle consistent en des recettes non fiscales ($othrev_t$) et des recettes fiscales qui sont endogènes (tr_t), telles que :

$$tr_t = tw_t + ty_t + tc_t + to_t \quad (9)$$

$$rev_t = tr_t + othrev_t \quad (10)$$

tw_t représente les revenus de la taxation du travail, ty_t représente les revenus provenant de l'impôt sur la production, tc_t représente les revenus provenant de l'imposition de la consommation et to_t représente d'autres recettes fiscales.

Les autres catégories de revenus publics (tels que la production ou les transferts publics) sont exogènes ($othrev_t$).

Les dépenses publiques (exp_t) sont ici exogènes :

$$exp_t = cexp_t + iexp_t + ben_t + oexp_t \quad (11)$$

où $cexp_t$ représente les dépenses courantes, $iexp_t$ représente les investissements, $iben_t$ représente les avantages et $oexp_t$ représente d'autres dépenses. Il est financé soit par les recettes publiques, soit par la dette publique.

La dette publique est :

$$Bond_{t+1} = Bond_t(1 + r_t) + Primd_t \quad (12)$$

avec $Primd_t = exp_t - rev_t$.

Nous nous intéressons dans les paragraphes qui suivent aux recettes fiscales issues de la fiscalité de l'énergie.

Le montant total issu des recettes de la fiscalité de l'énergie est de 44 milliards d'euros en 2017 (hors contributions TVA, Eurostat). Dans la comptabilité nationale, ce montant est comptabilisé dans le poste D2 « Impôts sur la production et les importations ». Dans le modèle, les taxes sur la production et les importations sont compris dans les prix de production national. Ainsi, une hausse de ses taxes accroît le prix de production des entreprises. Les données d'Eurostat et de la Cour des comptes ont permis d'effectuer l'analyse suivante. On constate que le poids de la fiscalité de l'énergie incombe

surtout aux ménages (55 %). Quand on effectue une lecture par secteur (sur les 45% hors ménages), c'est le secteur des services qui est le plus lourdement taxé.

Une autre lecture est donnée par le taux d'imposition implicite de l'énergie. Il s'agit du poids de la fiscalité de l'énergie en pourcentage de la consommation finale, par secteur.

Les ménages sont les plus imposés pour chaque unité d'énergie finale consommée car leur usage des transports est fortement carboné, comme le montre les données du Service de la donnée et des études statistiques. L'industrie est moins taxée car le secteur est soumis au système EU ETS.

La fiscalité de l'énergie peut aussi se décomposer en plusieurs postes : la TICPE (taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques), la CSPE (Contribution au service public de l'électricité), les impôts sur l'énergie électrique et les autres taxes sur l'énergie dont la TICGN (taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel) et la TICC (taxe intérieure de consommation sur les houilles, lignites et coke). La TICPE représente ainsi 67 % des recettes de la fiscalité de l'énergie (2017).

CHAPITRE 3 : PARAMÉTRISATION ET CALIBRATION

1. Paramétrisation des investissements

Dans le secteur de l'électricité, les investissements sont donnés de manière exogène sur l'ensemble de l'horizon temporel (tableau 4). Le volume total des investissements sur la période est de 266 Md€.

Tableau 4: Chiffrage des coûts d'investissements à partir du mix d'IHS Markit et du chiffrage de RTE et de l'IAE (milliards d'euros).

2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	
0.16	1.11	2.92	3.94	4.79	4.93	5.02	5.12	5.22	5.40	
2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	
5.79	6.88	7.79	8.64	9.44	9.73	9.91	10.18	10.81	11.65	
2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
11.89	11.83	11.89	12.07	12.43	12.25	12.45	11.25	10.96	10.94	11.20

Pour pouvoir déterminer la trajectoire d'investissements, plusieurs étapes sont nécessaires. Dans un premier temps, nous prenons le scénario de mix électrique d'IHS Markit (« August 2020 Planning Case Data for European power »), qui nous permet de tracer une trajectoire des nouvelles capacités sur les trente prochaines années, et pour chaque technologie nécessaire pour produire de l'électricité (hydraulique, éolienne, solaire, pétrole, gaz, charbon, nucléaire...). Cette trajectoire est cohérente avec celle des pouvoirs publics qui s'attache au chiffrage de I4CE dans la SNBC. En se basant sur les données du « *Panorama des financements climat* » (I4CE, 2020), le chiffrage d'investissements électriques bas carbone par an en moyenne dans leur scénario sur la période 2019-2050 est entre 8.3 et 9.3 milliards d'euros par an en moyenne sur la période, proche de notre chiffrage d'IHS Markit (8.31 milliards).

Puis, nous calculons les coûts CAPEX (de l'anglais *capital expenditures*) qui correspondent aux dépenses d'investissement (aux dépenses en capital fixe). Pour les calculer, on prend les coûts CAPEX en euros par GW donnés par l'IEA (*International Energy Agency*) et par RTE (Bilan prévisionnel 2017) et on les multiplie par les capacités données par notre scénario d'IHS Markit, pour chaque technologie. Ensuite, pour obtenir les montants CAPEX amortis, nous prenons en compte également le taux d'actualisation,

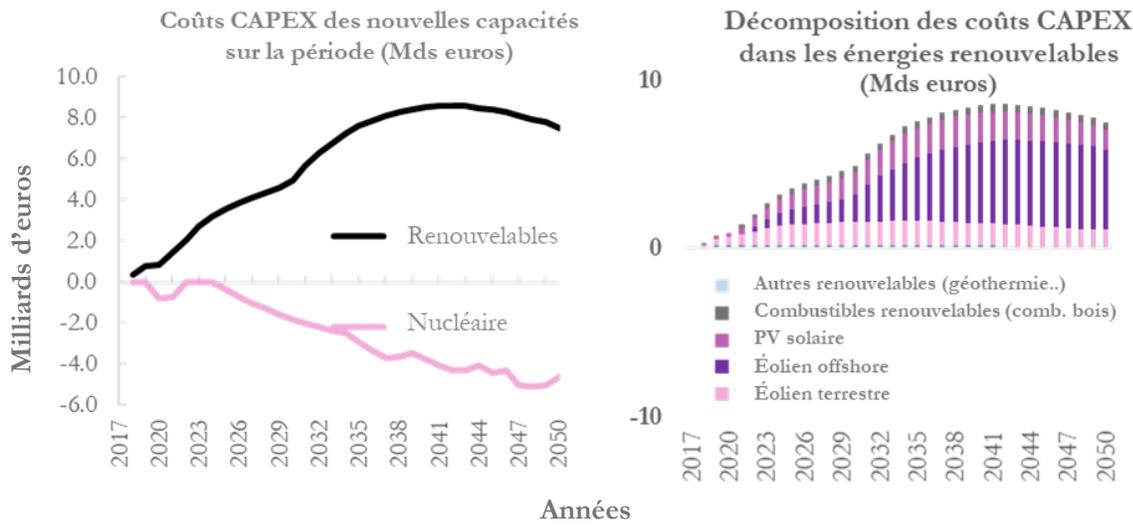
ainsi que la durée de vie des installations, dont le chiffrage nous a donné par RTE (Bilan prévisionnel 2017). Le tableau ci-dessous montre le chiffrage en question :

Tableau 5: Hypothèses et chiffrage RTE pour le calcul des coûts CAPEX et OPEX

Technologie	Éolien terrestre	Éolien en mer posé	Éolien flottant ⁶	Hydrolien marin	Photo-voltaïque au sol	Photo-voltaïque grandes toitures	Photo-voltaïque toitures résidentielles ⁶	STEP	Cogénération bois-énergie	Cogénération biogaz	Incinération des déchets
Taux d'actualisation	7% ⁷	2025 : 7% 2030 : 5% 2035 : 5%	2025 : 9% 2030 : 7% 2035 : 7%	11%	7% ⁷	7% ⁷	7% ⁷	11%	9%	9%	9%
Durée de vie des installations (ans)	> 2020 : 25 2030 : 30 2035 : 30	2025 : 25 2030 : 30 2035 : 30	2025 : 25 2030 : 30 2035 : 30	25	25	25	25	75	20	20	25
Coût d'investissement (€/kW)	1400	4100	6400	6800	1100	1300	2200	1325	4000	8000	6500
Coût fixe d'exploitation (€/kW.an)	47	150	190	250	30	50	70	18	-	-	100
Coût variable d'exploitation (€/MWh)	-	-	-	-	-	-	-	turb. : 0,2 pomp. : 3,1	15	90	-
Variation du coût d'investissement entre 2017 et 2035	-15%	-40%	-47%	-18%	-50%	-50%	-50%	0%	0%	25%	0%
Variation du coût d'exploitation entre 2017 et 2035	-15%	-33%	-57%	-18%	-50%	-50%	-50%	0%	0%	25%	0%
Facteur de charge moyen en France	25%	32%	-	33%	13%	13%	13%	-	51%	51%	50%

Sources : RTE (Bilan prévisionnel 2017)

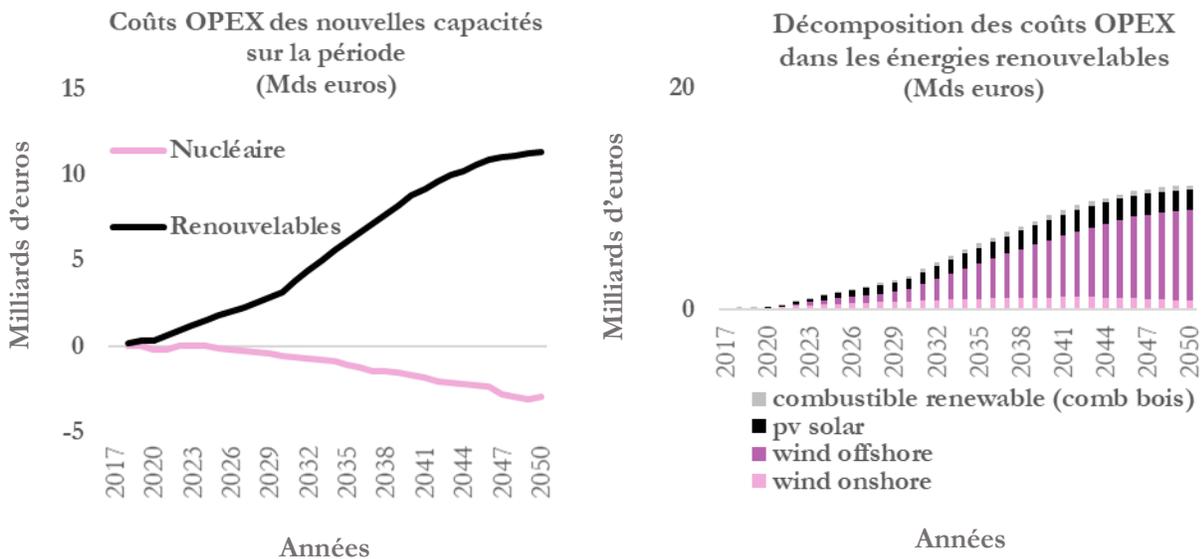
Ainsi, en cumulé, les montants de CAPEX amortis par technologie sur la période sont représentés dans le **Graphique 6** ci-dessous. Concernant le nucléaire, on voit bien que les coûts CAPEX diminuent (de 87 milliards d'euros la période 2019-2050), en lien avec le démantèlement de centrales nucléaires (en tout, on obtient une diminution de 29 GW sur la période 2019-2050). Cette trajectoire permet d'atteindre l'objectif de la loi énergie-climat de réduire de la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50% avant 2035, rappelé dans les publications des pouvoirs publics français (SNBC et PPE).



Sources : Calcul à partir des données de l'IEA, de RTE et d'IHS Markit

Graphique 6: Coûts CAPEX d'ici 2050 des nouvelles capacités de production d'électricité en vue de la neutralité carbone (en se basant sur le mix d'IHS Markit)

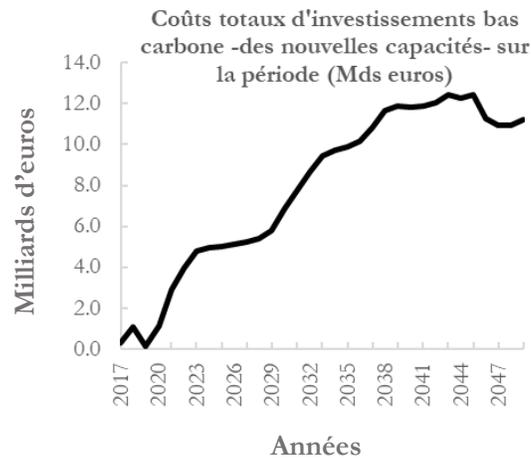
Concernant les coûts OPEX, on multiplie les coûts fixes d'exploitation en euros par GW par an donnés par RTE, par le chiffrage des nouvelles capacités sur la période. Ainsi, en cumulé, on obtient les montants OPEX par technologie suivants sur la période :



Sources : Calcul à partir des données de l'IEA, de RTE et d'IHS Markit

Graphique 7: Coûts OPEX d'ici 2050 (en se basant sur le mix d'IHS Markit)

Il suffit d'agréger ses coûts pour obtenir la trajectoire finale des coûts d'investissement totaux sur la période :



Sources : Calcul à partir des données de l'IEA, de RTE et d'IHS Markit

Graphique 8: Coûts des nouvelles capacités

Tableau 6 : Chiffrage des coûts d'investissement à partir du mix d'IHS Markit et du chiffrage de RTE et de l'IAE

Période	Somme	Moyenne
2019-2029	44	4
2030-2039	97	10
2040-2050	125	11
2019-2050	266	8.31

Dans cet exercice de recherche, l'important est d'obtenir un jeu de simulation d'investissement, de financement, et de voir les effets agrégés qui en découlent (effets sur la croissance et effets redistributifs intergénérationnels).

2. Paramétrisation des prix de gros de l'électricité associés à la trajectoire d'investissements

Nous avons pris en compte la trajectoire des prix de grosse associée à la chronique d'investissements telle que calculée par IHS Markit. En moyenne, on note une augmentation des prix de gros (prix de base annuel moyen) sur la période qui s'étend de 2020 à 2050, en lien notamment avec le prix des matières premières¹⁶.

Plusieurs raisons expliqueraient cette croissance du prix des commodités sur la période selon IHS Markit. Dans le *merit order* français, le gaz et le charbon sont régulièrement des producteurs marginaux qui, à ce titre, influencent directement les prix sur le marché de gros. Or, la détermination du prix du gaz en France est liée au marché mondial du gaz. De ce fait, les autres pays auraient une marginalité du gaz plus importante, ce qui impacterait la France. IHS Markit prévoit, dès 2030, un rattrapage de la demande sur la production à partir de 2030 (entraînant une augmentation du prix). Ainsi, au-delà de 2030, les prix du gaz devraient augmenter en ligne avec l'évolution du coût marginal de long terme aux Etats-Unis. La hausse du prix du gaz s'expliquerait aussi par une hausse de sa demande liée à la hausse de la demande d'hydrogène sur la période. En effet, l'hydrogène bleu (obtenu lorsque le CO2 émis est capté puis réutilisé ou stocké) nécessite du gaz, justifiant alors cette augmentation. Toutefois, l'augmentation des prix ne serait pas aussi forte que l'augmentation des prix du gaz, dans la mesure où le marché ne serait plus entièrement corrélé au gaz, surtout avec la plus forte pénétration des renouvelables.

Cette croissance du prix des matières premières s'expliquerait aussi par l'évolution du prix du charbon (qui resterait plutôt constant sur la période) et du prix du carbone (sur le marché EU ETS) qui augmenterait sur la période (source : prévisions d'IHS Markit).

Concernant la part du nucléaire, elle resterait constante jusqu'en 2027 dans le scénario d'IHS Markit. Puis, elle diminuerait jusqu'en 2050. Toutefois, 16 GW de capacités ont été ajoutées sur la période (EPR) et la réduction s'expliquerait par le démantèlement des anciennes centrales.

¹⁶ La variante N03 teste l'effet de prix significativement plus élevé sur nos simulations.

Au niveau de la trajectoire des prix, au début de la période, on a une augmentation de la demande d'énergie renouvelable et de nucléaire qui resterait constante. La capacité a donc un coût marginal assez bas. Puis, le coût marginal augmenterait à partir de 2027 car la capacité nucléaire est supposée diminuer et le prix du gaz augmenter¹⁷-comme expliqué précédemment-.

Cet argumentaire et la publication de ces données datent de février 2021 (source : IHS Markit). Il s'agit d'une prévision de source extérieure et, **pour rappel, dans le cadre de cette question de recherche, l'objectif n'est pas tant de discuter ces prévisions que d'étudier les effets de différents scénarios de financement d'une même trajectoire d'investissement.**

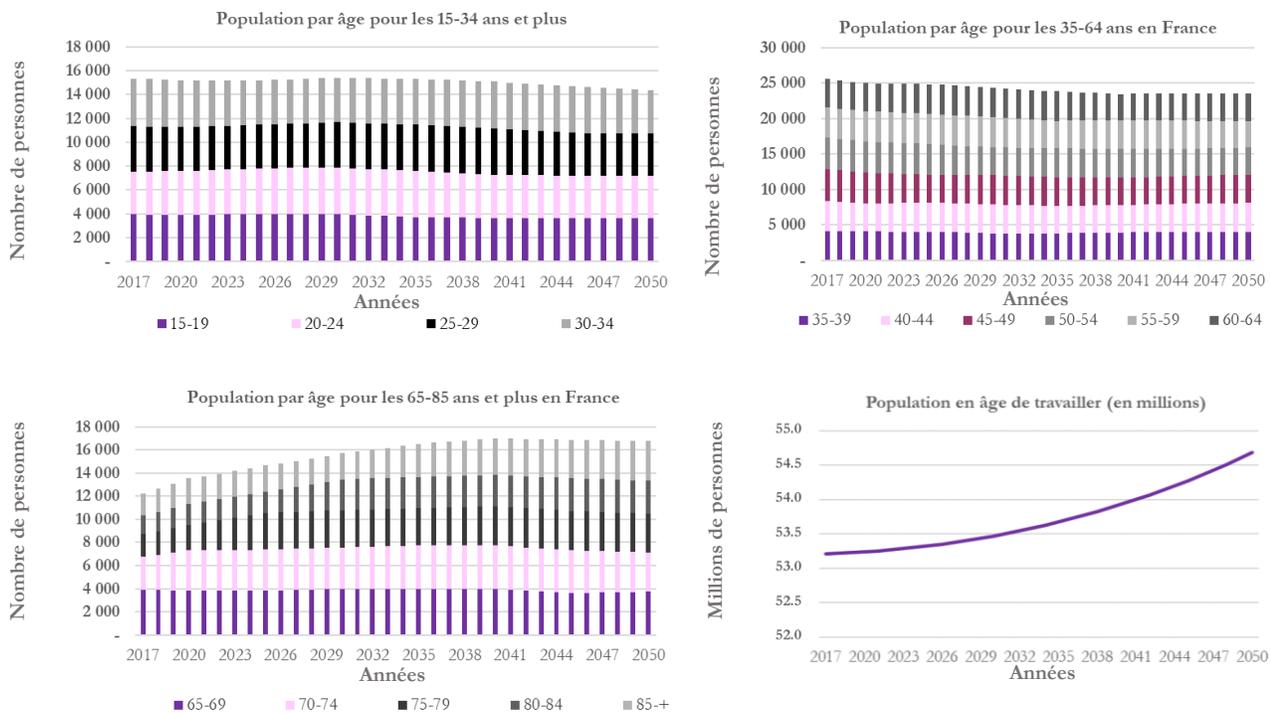
Ces valeurs peuvent paraître faibles au regard des dernières hausses de prix (relatives à la période post-covid) mais les projections disponibles suggèrent que les hausses récentes sont transitoires. Dans leur dernière publication (Février 2022), IHS Markit prévoit une hausse du prix de gros de l'électricité très forte les années suivant la crise du COVID, puis un rétablissement à la normale, pour atteindre une valeur de 47.8 euros le MWh en 2050, contre 45.5 euros le MWh dans leur prévisions précédentes (Février 2021).

3. Autres paramètres exogènes

3.1. Taux de progrès technique et croissance de la population

La population par âge et la population totale pour l'année 2017 sont données par le Bureau International du Travail (pour les individus âgés de 15 ans et plus). Pour les autres années (de 2018 à 2050), on utilise les prévisions de l'Organisation des Nations Unies (World Population Prospects 2019) qui apporte également une répartition de la population par âge sur la période. On note que l'évolution démographique s'opère surtout pour les vieilles générations, dont la part dans la population totale augmente d'année en année (sur période 2017-2050).

¹⁷ d'une valeur d'environ 25 euros par MWh (prix réel de 2017) en 2027 à plus de 30 euros par MWh en 2050



Sources: Bureau International du Travail, Organisation des Nations Unies (World Population Prospects 2019)

Graphique 9: Projections démographiques par âge et total

En agrégé, on obtient la courbe de croissance de la population (4^e graphique). Pour 2017, on prend les données de la population en âge de travailler (mais ce n'est pas de la population active), données par le bureau international du travail. Puis, pour le reste de la période, j'ai utilisé les données de projection des Nations Unies.

Le taux de croissance de la productivité est basé sur des données historiques et est fixé à 1%. Plus précisément, elle correspond à une valeur donnée dans une publication de l'INSEE qui effectue une estimation de la productivité globale des facteurs (PGF) usuelle.

3.2. Paramétrisation du taux d'intérêt moyen sur le stock de dette publique

Pour notre année de base, le taux moyen sur la dette publique nominale est de 1.67% (calcul à partir des données de l'INSEE sur la dette publique et le déficit au sens de Maastricht). Nous gardons donc cette valeur pour les années suivantes, qui reste proche de la moyenne des valeurs historiques.

Dans notre modèle qui étudie l'effet macroéconomique d'une accumulation de dette publique finançant des investissements bas carbone, la question peut se poser de savoir si cet endettement croissant est de nature à modifier significativement les taux d'intérêt à long terme.

La littérature suggère qu'il est difficile d'affirmer un effet positif significatif de la dette publique sur le taux d'intérêt à long terme, surtout dans le cas français. En effet, de nombreux articles académiques étudient le lien entre la dette publique et les taux d'intérêt, sur données empiriques. L'effet du déficit public sur le taux d'intérêt de long terme a particulièrement été étudié dans le cas américain. Les résultats diffèrent entre les papiers académiques et les conclusions montrent que l'impact du déficit public sur le taux d'intérêt de long terme est soit négatif (Evans, 1985), soit inexistant (Mehra, 1992), soit positif (Correia, 1995 ; Hoelscher, 1986). Plus précisément, en utilisant leur modèle de taux d'intérêt (tiré du modèle de Hoelscher (1986)) et adoptant une méthodologie empirique pour étudier le lien entre déficits et taux d'intérêts, Mehra (1992) montre que le lien trouvé entre les déficits et les taux à long terme en utilisant des séries de prévisions d'inflation à un an est biaisé. Au contraire, à l'aide d'une régression économétrique, Correia-Nunes et al (1995) montrent que les taux d'intérêt à long terme augmentent lorsque les déficits budgétaires sont plus importants. Les auteurs étudient les données de 1970 à 1993 (au niveau mondial) et trouvent une relation statistiquement forte et robuste. À travers des analyses empiriques transnationales pour un panel de 16 pays de l'OCDE sur plusieurs décennies, Ardagna et al (2004) étudient le lien entre dette, déficits et le taux d'intérêt de long terme. Ils trouvent que l'effet de la dette sur les taux d'intérêt n'est pas linéaire. Plus précisément, ce n'est que pour les pays dont le niveau d'endettement est supérieur à la moyenne qu'une augmentation de la dette affecte le taux d'intérêt. La politique budgétaire mondiale est également importante: une augmentation du total des emprunts publics de l'OCDE augmente les taux d'intérêt de chaque pays. Cependant, la politique budgétaire intérieure continue d'affecter les taux d'intérêt intérieurs même après avoir pris en compte les dettes et les déficits mondiaux. Dans le cas européen, Chinn et al (2007) montrent qu'au cours des trois dernières décennies, les taux d'intérêt à court et à long terme ont été davantage tirés dans le cas américain que dans le cas européen.

Pour ces raisons et au vu de la littérature empirique, le taux d'intérêt sur la dette publique est fixe dans notre modèle.

3.3. Autres paramètres

Le tableau 7 présente les valeurs numériques utilisées pour les principaux paramètres exogènes :

Tableau 7: Autres paramètres utilisés dans le modèle

Paramètres	Valeur				
	Agriculture	Industrie hors énergie	Energie	Construction	Services
Paramètre dans la :					
Fonction de consommation intermédiaire	1.22	1.15	1.74	1.07	1.12
Fonction de production	1.70	1.50	1.37	1.74	1.81
Dépréciation du capital	0.10	0.18	0.10	0.16	0.05
Taux de croissance du progrès technique	1.0 ^t				
Taux d'intérêt réel sur la dette (%)	0.6%				
Paramètres pour les ménages :					
Coefficient aversion au risque	2				
Taux d'actualisation	0.98				
Elasticité de substitution travail/consommation	0				
La probabilité de survie d'un individu né à la période g	(0.08) ^{t-g}				

4. Calibration

4.1. Consommation et actifs par génération

La consommation par groupe d'âge

Dans le cadre de cet exercice de recherche, nous cherchons à coller au maximum aux données de comptabilité nationale. Or, la comptabilité nationale ne donne pas de données de consommation par âge ou par groupe d'âges. La SRCV (« Statistiques sur les ressources et les conditions de vie ») ne donne pas de consommation par génération de manière agrégée. En revanche, elle donne des données par âge concernant la consommation d'électricité, de gaz, d'eau et de chauffage. Elle ne fournit pas de données sur la répartition par âge des autres postes de consommation.

Ainsi, nous utilisons des proxys afin que le modèle puisse calculer la consommation par génération, la consommation par secteur et la consommation avec un découpage générationnel et sectoriel. La consommation par génération est définie comme la somme, pour tous les secteurs, de la consommation par secteur et par âge. La consommation par âge et par secteur est calculée en multipliant la consommation par secteur (donnée par la comptabilité nationale française) par un coefficient de répartition de la consommation par génération (lui-même fourni à partir des données de comptabilité nationale)¹⁸.

Dans le cadre de ce travail, la dépense de consommation par unité de consommation en pourcentage du niveau de vie a été appliquée sur toute période étudiée (2017-2050) et avec notre découpage générationnel plus détaillé (15 générations).¹⁹ ²⁰ Lorsque l'on multiplie la population par la consommation moyenne par génération en 2017 (en milliards d'euros), on obtient :

¹⁸ En l'absence de données, nous faisons l'hypothèse que cette clé de répartition est la même pour toutes les générations. Ce coefficient est donc constant dans le temps, il n'est pas endogénéisé.

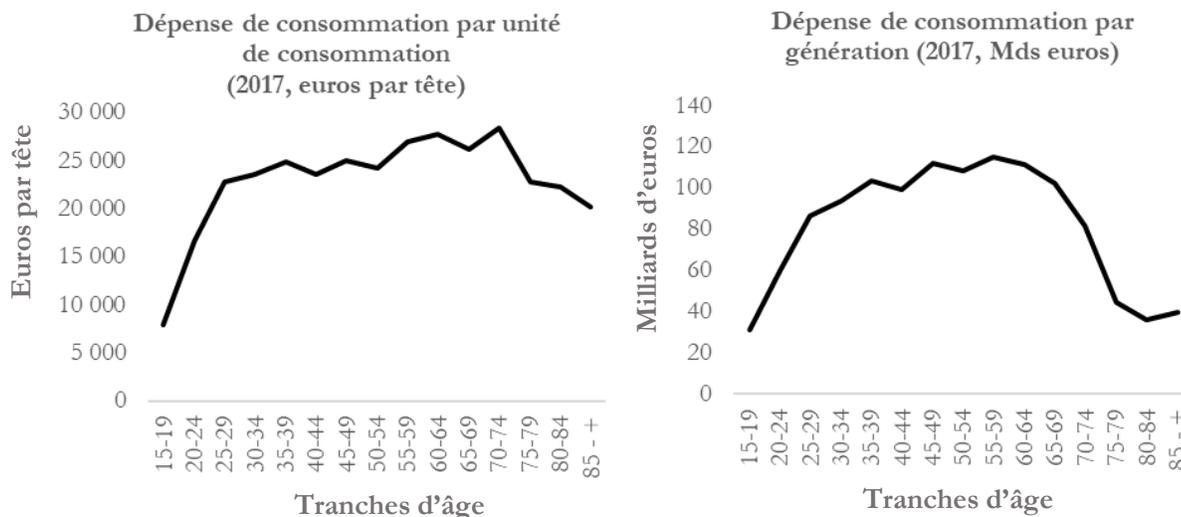
D'autres enquêtes ont été mobilisées pour construire la base de données. Une première enquête¹⁸ de l'INSEE définit les dépenses de consommation par unité de consommation, permettant ainsi de définir les dépenses de consommation par unité de consommation en pourcentage du niveau de vie. L'on rejoint ici un constat empirique souvent rappelé par les chercheurs. Dans plusieurs études, la consommation apparaît même comme un proxy du niveau de vie. Ainsi, Hippolyte d'Albis & Ikpidi Badji (« Les inégalités de niveaux de vie entre les générations en France », 2017), montrent que « le niveau de vie des ménages est apprécié avec le revenu disponible ou la consommation privée par unité de consommation, en isolant ou non les dépenses de logement et les loyers implicites. » C'est aussi ce que l'on constate dans cette enquête de l'INSEE, excepté pour les 70 ans et plus (le niveau de vie augmente mais la consommation diminue) qui privilégient l'épargne à la consommation. En partant d'une analyse des données de la SRCV (Statistiques sur les ressources et les conditions de vie) de 2018 et en transposant les échelles à notre année de base (2017), on trouve un taux d'épargne pour les plus de 70 ans de 25% du niveau de vie.

¹⁹ Pour rappel, dans notre modèle, le découpage est à pas quinquennal. Ainsi, lorsque nous trouvons un pourcentage (de dépense de consommation par unité de consommation en pourcentage du niveau de vie) pour la génération des moins de 30 ans, nous le dupliquons pour les générations suivantes du modèle : 15-19 ans, 20-24 ans et les 25-29 ans. Ainsi, on obtient bien les dépenses de consommation des ménages par unité de consommation et par génération en pourcentage du niveau de vie pour nos quinze générations.

²⁰ *Justification de la répartition du niveau de vie par âge.* L'enquête SRCV 2018 donne une répartition du niveau de vie par ménage par âge (en fonction de l'âge de la personne de référence à la date de l'enquête). Les générations âgées ont un niveau de vie relativement élevé. L'enquête « Plus d'épargne chez les plus aisés, plus de dépenses contraintes chez les plus modestes » publiée par l'INSEE en 2020 montre que la part des revenus du patrimoine composent près de 30 % du revenu disponible brut des 70 ans ou plus (dont la moitié correspond aux ménages propriétaires de leur résidence principale), contre 7 % chez les moins de 30 ans. La même enquête révèle que chez les moins de 60 ans, les revenus d'activité constituent la source essentielle de revenu (86 % du RDB). Ce point est important pour les analyses d'effets de redistribution intergénérationnels qui vont suivre.

D'autres auteurs justifient le niveau de vie élevé des plus âgées par les montants des retraites, l'augmentation du revenu des actifs avec l'âge que les agents cumulent et un niveau de patrimoine de plus en plus élevé avec l'âge (Arrondel et al., 2014), ce qui se traduit par une augmentation des niveaux de revenus d'actifs au fil des générations (Navaux, 2016).

Un rapport de l'INSEE (« Les revenus et le patrimoine des ménages », édition 2018) analyse le niveau de vie et la pauvreté des personnes en fonction de leur âge en 2015. Encore une fois, l'évolution semble correspondre aux statistiques de la



Sources: INSEE, SRCV.

Graphique 10 : Dépenses de consommation par agent représentatif d'une générations (en euros) et par génération (Mds euros)

On voit bien ici que la consommation par génération dépend de la structure démographique (de la population par génération) et de la consommation moyenne d'un agent représentatif par génération (dont l'évolution a été décrite ci-dessus).²¹

SRCV 2018 pour le niveau de vie. Ainsi, les personnes âgées de 18 à 24 ans ont le niveau de vie le plus faible parmi les adultes, particulièrement pour les cas qui ont des personnes à charge car ils apportent souvent peu de revenus tout en augmentant le nombre d'unités de consommation. Et parmi ceux qui disposent d'un logement personnel, ils sont pénalisés par des revenus d'activité bien inférieurs à l'ensemble de la population adulte.

Enfin, il est important de préciser que la clé de répartition du niveau de vie par génération donnée par la SRCV est utilisée pour répartir le revenu national net et le revenu disponible brut par génération dans notre modèle.

La hausse du niveau de vie des individus plus âgés peut s'expliquer par les raisons invoquées par d'Albis et al (2017) : la montée en puissance du système de retraite par répartition ou l'augmentation des revenus d'actifs. D'autre part, le niveau de patrimoine est de plus en plus concentré aux âges élevés (Arrondel et al., 2014), ce qui se traduit par une augmentation des niveaux de revenus d'actifs au fil des générations (Navaux, 2016) .

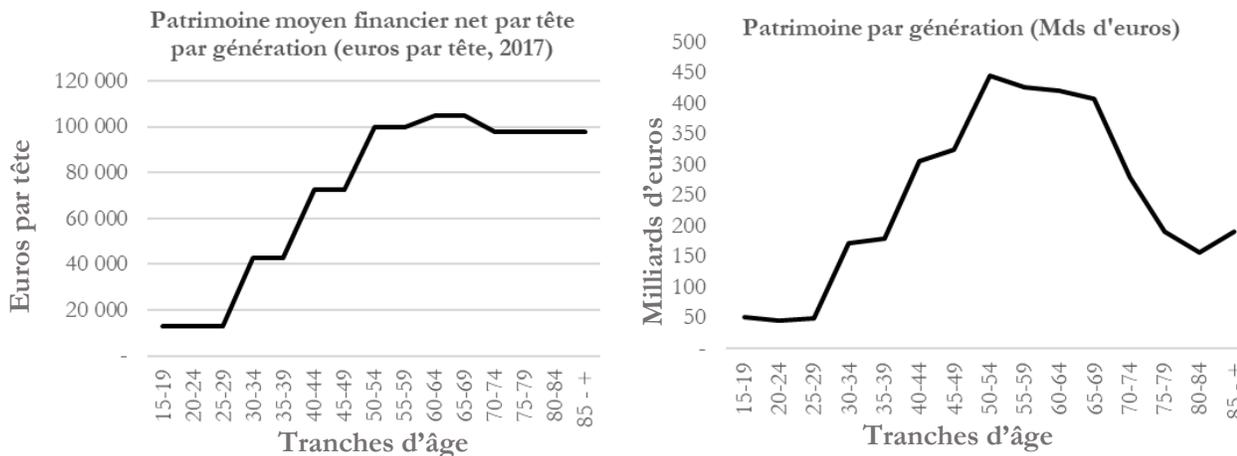
²¹ On note une baisse de la consommation pour les âges supérieurs à 64 ans. En effet, selon d'Albis, Bonnet et al (2017), cette rupture « est liée aux évolutions démographiques, les individus âgés de 65 ans ou moins appartenant aux générations nombreuses du baby-boom ». Pour eux il s'agit des 65 ans et moins car ils analysent l'année 2011. Pour 2017, il s'agit des 71 ans et moins. L'existence d'une baisse de la consommation autour de la retraite est documentée au UK (Banks, Blundell et Tanner 1998), aux USA (Bernheim, Skinner et Weinberg 2001) et en Italie (Battistin et al. 2009). D'ailleurs, Aguiar et Hurst (2005 et 2007) ou Hurd et Rohwedder (2006) soulignent que la baisse des dépenses au moment de la retraite n'est pas due à des problèmes de liquidité.

Concernant la distribution de la consommation par âge - notre modèle est en accord avec les résultats de plusieurs articles car la plupart d'entre eux montrent qu'en général, la distribution de la consommation par âge suit une courbe en cloche. Dans le cas du Royaume-Uni, en utilisant le cadre du modèle de cycle de vie et des données sur les ménages britanniques au cours des 25 dernières années, Banks, Blundell et Tanner (1998) montrent que la consommation suit généralement une courbe en cloche. Cependant, dans ce cas particulier du Royaume-Uni, on observe une augmentation de la consommation après 65 ans, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on regarde les données de la comptabilité nationale française. Les auteurs

Actifs par génération

L'INSEE donne le montant du patrimoine net moyen du ménage selon l'âge de la personne de référence du ménage (Source : Insee, enquête « Histoire de vie et Patrimoine 2017-2018 »). En réalité, l'enquête donne des montants par tranche d'âge avec un découpage générationnel plus agrégé que l'on réplique sur plusieurs générations pour obtenir notre découpage générationnel plus détaillé. Nous pouvons ensuite calculer la répartition du patrimoine par tranche d'âge selon notre clé de répartition en multipliant le patrimoine net moyen du ménage selon l'âge de la personne de référence par sa population. À l'aide d'un produit en croix, nous adaptons le chiffrage du patrimoine net par génération pour l'année 2017. Puis, on divise par la population par génération pour trouver pour chaque génération, le patrimoine net moyen du ménage selon l'âge de la personne de référence du ménage en 2017. Ainsi, la méthode est adaptée au découpage générationnel du modèle (à savoir, quinze générations). Le premier graphique ci-dessous montre la répartition pour 2017, permettant de trouver la répartition du patrimoine par génération pour 2017 – second graphique, obtenu en multipliant par la population par génération-.

expliquent en partie cette baisse de la consommation autour de l'âge de la retraite par les " changements anticipés dans la démographie des ménages et le statut sur le marché du travail - c'est-à-dire par la non-séparabilité de la consommation et des loisirs ". Cette preuve suggère fortement que des chocs non anticipés se produisent au moment de la retraite. Au contraire, dans le cas des États-Unis, la trajectoire de consommation semble plutôt diminuer lorsque les agents passent l'âge de la retraite, ce qui est plus conforme aux résultats de la compatibilité nationale française. Sur la base de données empiriques et en utilisant un modèle de cycle de vie, Bernheim, Skinner et Weinberg (2001) montrent que la consommation peut diminuer de manière discontinue au moment de la retraite. Ceci est en accord avec notre résultat dans le cas de la France puisque la consommation est assez élevée lorsque les agents travaillent puis diminue lorsque l'âge de la retraite approche. Parmi les facteurs expliquant cette baisse de la consommation autour de l'âge de la retraite, les auteurs avancent plusieurs facteurs tels que : i) l'existence de dépenses liées au travail et/ou des préférences pour des substituts de loisirs ; ii) des compléments et des événements inattendus qui affectent le moment de la retraite, comme une détérioration soudaine de la santé ou une perte d'emploi. Dans le cas de l'Italie, Battistin et al (2009) étudient l'ampleur de la baisse de consommation associée à la retraite en Italie dans un cadre de discontinuité de régression tout en utilisant les données de l'enquête de la Banque d'Italie sur le revenu et la richesse des ménages. Ils montrent que la retraite est liée à une baisse significative du nombre d'enfants adultes vivant avec leurs parents. Ceci explique la baisse de la consommation à la retraite.



Sources: INSEE.

Graphique 11: Description du patrimoine financier par tranches d'âges

La répartition différente s'explique par l'effet démographique qui est comptabilisé dans le patrimoine par génération. Cette structure démographique est très utile et importante à détailler en vue des analyses d'effets de redistribution intergénérationnels qui vont suivre.

4.2. Calibration relative aux ménages et en fonction du type de ménages (classiques ou non-classiques)

Dans le modèle, nous avons un salaire par secteur, un nombre d'heures travaillées par tête et par secteur et un nombre de travailleurs par secteur. Ces données sont données par la comptabilité nationale.²² Les

²² Pour trouver le nombre de travailleurs par branche engagé dans la production, on se réfère au tableau 6.208 de l'INSEE (Emploi intérieur total par branche en nombre de personnes et en milliers de personnes).

Pour trouver le volume d'heures travaillées par travailleur et par branche, on se réfère au tableau 6.213 de l'INSEE (Volume total d'heures travaillées par branche, en millions d'heures annuelles par branche) et au tableau 6.208 cité précédemment. Ainsi on divise le volume total d'heures travaillées par branche avec le nombre de travailleurs par branche.

Pour trouver le salaire horaire par branche, on se réfère à deux tableaux. Le premier est le tableau de l'INSEE 6.205 (Salaires et traitements bruts des salariés par branche à prix courants, en milliards d'euros) qui représente l'ensemble de la masse salariale (sans cotisations patronales) par branche. Le second est le tableau des heures travaillées par branche (heures travaillées par travailleur multiplié par le nombre de travailleurs). Ce tableau est le numéro 6.213 (volume total d'heures travaillées par branche, en millions d'heures annuelles par branche). Pour calculer le salaire horaire par branche, on calcule le ratio des valeurs des deux tableaux, soit le ratio entre la masse salariale par branche et le volume d'heures travaillées par branche. Pour trouver le nombre de travailleurs par branche et par génération, on se réfère à la base de données SRCV, qui, à partir de son échantillon représentatif de la population, donne une répartition du nombre de travailleurs par âge par

détails de la calibration des prestations sociales reçues et des impôts payés pour les quinze générations du modèle sont disponibles sur demande : ils utilisent aussi les données fournies par la SRCV 2018, après quelques retraitements.

Calibration du taux d'intérêt appliqué aux revenus des ménages

Ce taux d'intérêt appliqué aux revenus des ménages est calibré sur données empiriques françaises. Il est le ratio entre les revenus de la propriété des ménages pour l'année de base 2017 (77 milliards d'euros) et le montant des actifs des ménages (3644.9 milliards d'euros). On obtient alors un taux de référence de 2,1%. Plus le taux augmente, plus les revenus des ménages sont accrus.

Calibration de la part des ménages avec contrainte de liquidité (vs ménages classiques)

Un ménage non-contraint par ses liquidités et qui peut optimiser de façon intertemporelle, est appelé ménage classique. Un ménage classique est défini comme un ménage qui a accès aux marchés du capital et qui peut optimiser intertemporellement entre sa consommation présente et sa consommation future. Ainsi, un ménage classique peut amortir l'effet d'un choc dans le temps. Le ménage classique est propriétaire de l'entreprise représentative, et son épargne est la source principale d'accumulation du capital (Kydland et Prescott(1982), Kim et Loungani (1992)).

Au contraire, les ménages non-classiques (avec contrainte de liquidité) ont peu de revenu et sont contraints par leurs liquidités. Plus précisément, un ménage non-classique est défini comme un ménage qui fait face à des contraintes fortes de liquidité et qui optimise intratemporellement entre la consommation et le loisir. Il n'a pas accès aux marchés de capitaux et ne peut s'endetter. Il est supposé qu'une fraction des ménages appartient à la catégorie des ménages non-classiques qui consomment quasiment l'ensemble (ou une grande partie) de leur revenu et par conséquent épargnent très peu.

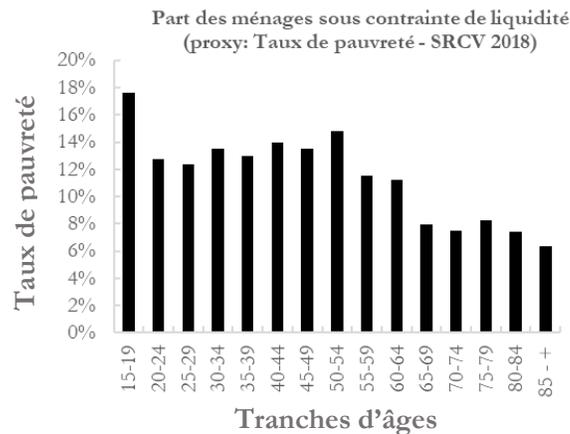
branche. On applique cette clé de répartition aux données de la comptabilité nationale par branche de l'année de base (2017).

Pour trouver le volume d'heures de travail par branche et par génération, on se réfère à la base de données SRCV qui, à partir de son échantillon représentatif de la population, donne une répartition des heures travaillées totales par âge par branche (volume d'heures travaillées par tête multiplié par le nombre de travailleurs par branche). On applique cette clé de répartition aux données de la comptabilité nationale par branche de l'année de base (2017). Pour obtenir le volume d'heures de travail par branche et par génération, on calcule le ratio entre le volume d'heures travaillées totales par génération par branche, que l'on divise par le nombre de travailleurs par branche et par génération.

Pour obtenir le salaire horaire par branche et par génération, on se réfère à la base de données SRCV, qui, à partir de son échantillon représentatif de la population, donne une répartition des salaires horaires par âge par branche. On applique ainsi cette clé de répartition aux données de la comptabilité nationale par branche de l'année de base (2017).

Leurs salaires sont supposés être identiques à ceux des ménages classiques (Jacquinot.P & Mihoubi F. (2001)). Toutefois, nous effectuons une différence de revenus du travail entre les générations en introduisant un profil de rémunération du travail (calibré la comptabilité nationale française), de forme concave tout au long du cycle de vie d'un individu (Faruqee, Hamid, et al. (1997), Gonand et al (2015)).

Pour pouvoir différencier la part des ménages classiques et non-classiques, plusieurs distinctions sont effectuées (et décrites dans la définition de la consommation agrégée, dans la partie « Programme du ménage »), basées sur les données de la base de données SRCV (Statistiques sur les Ressources et Conditions de Vie) la plus récente (2018). Nous avons choisi d'approximer la part des ménages qui subissent des contraintes de liquidité en utilisant comme proxy le taux de pauvreté par âge (SRCV, 2018). Ainsi, la part des ménages non-classiques (qui subissent des contraintes de liquidité) est déterminée par le taux de pauvreté. Bien entendu, cette part est différente d'une génération à l'autre. Autrement dit, la part des ménages classiques (vs non-classiques) est différente pour les quinze générations de notre modèle. L'enquête SRCV 2018 indique que le taux de pauvreté en conditions de vie concerne 18% des 15-19 ans qui est le taux le plus élevé de toutes les générations.



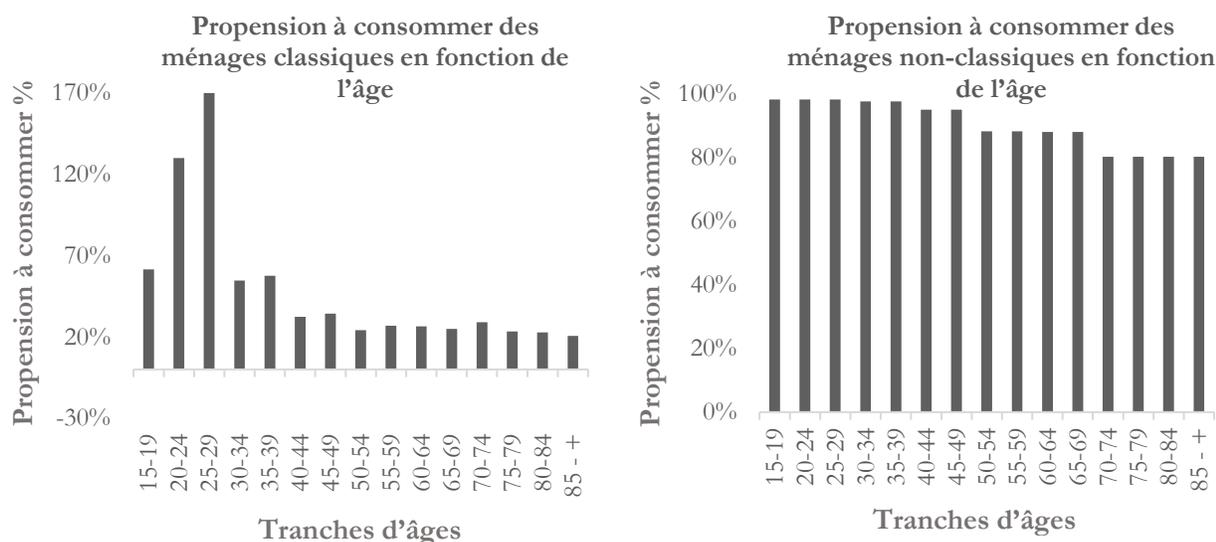
Sources : SRCV (2018)

Graphique 12 : Part des ménages pauvres pour chaque génération (selon la SRCV de 2018)

Propension à consommer par âge en fonction du type de ménage

La propension à consommer des ménages classiques -qui n'ont pas de contraintes de liquidité- est calculée en effectuant le ratio entre consommation par génération et actifs par génération. Chez les ménages classiques, la propension à consommer est relativement plus élevée chez les ménages plus jeunes. La propension à consommer des ménages non-classiques -qui ont des contraintes de liquidité-

est approximée par le ratio entre consommation par génération et revenu disponible net par génération. Chez les ménages plus pauvres (11% des ménages, lorsque l'on regarde la pauvreté en conditions de vie), la propension à consommer diminue avec l'âge. Ainsi, la consommation d'un agent représentatif d'une génération en fonction de sa catégorie (classique ou non-classique) suit les répartitions suivantes:



Sources : SRCV (2018), INSEE (2017).

Graphique 13: Propension à consommer des ménages classiques (rapport de la consommation au patrimoine) et des ménages non-classiques (rapport de la consommation au revenu courant) en fonction de l'âge²³.

23 Pour les ménages classiques, il s'agit d'une propension à consommer par rapport à la richesse des ménages, alors que pour les comptes nationaux qui ne font pas la distinction entre ménages pauvres et ménages plus riches, le calcul est effectué par rapport aux revenus disponibles brut (ce que nous regardons pour les ménages non-classiques). À partir de 45 ans et plus, la propension à consommer est de 30% environ. Nos chiffres sont tirés de la base de données SRCV.

PARTIE III : EFFETS MACROÉCONOMIQUES ET REDISTRIBUTIFS INTERGÉNÉRATIONNELS DES INVESTISSEMENTS BAS CARBONE DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE SELON LEUR MODE DE FINANCEMENT

CHAPITRE 1 : EFFETS AGRÉGÉS

1. Scénario de référence (*baseline*)

1.1. Description du scénario

Dans ce qui suit, nous présentons le compte central et l'équilibre stationnaire du modèle. Il s'agit du scénario de référence par rapport auquel les politiques publiques simulées seront comparées. L'état stationnaire du modèle a été calibré pour l'année 2017. Le modèle est résolu en termes de variables intensives. Celles-ci sont obtenues en déflatant les variables en quantité par la population et le progrès technique, et les variables nominales par les prix étrangers. Les variables intensives sont constantes le long du sentier de long terme (Solow (1956)).

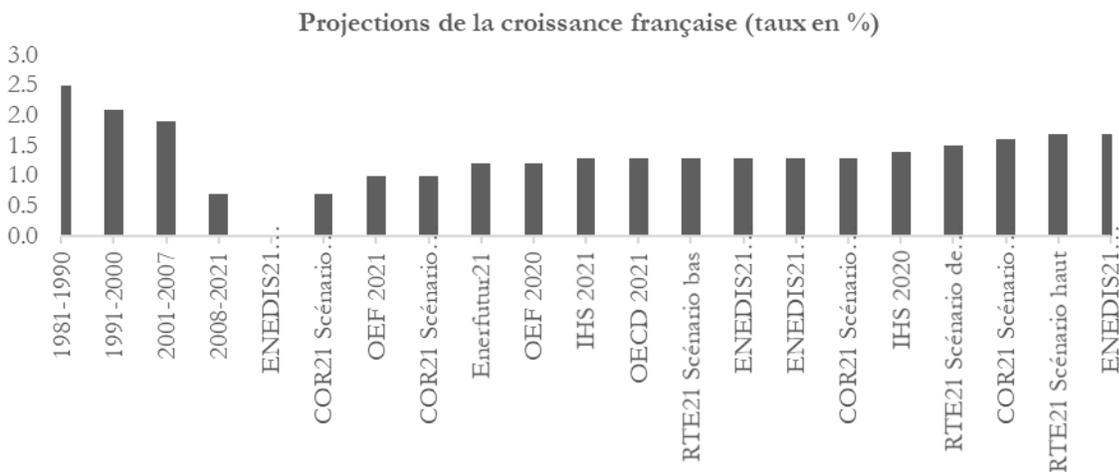
Le modèle est projeté jusqu'en 2050 pour une croissance démographique de 0.1% par an et une croissance de la productivité totale des facteurs de 1% par an. Ce scénario prolonge la croissance économique tendancielle en prenant en compte le scénario d'évolution de la population, de la structure par âge et les évolutions du progrès technique.

Concernant le progrès technique, le taux de croissance de la productivité totale des facteurs qui détermine aussi l'évolution du PIB (Partie II - Chapitre 3 – 3.1), est estimé à partir d'une analyse

statistique sur données historiques à 1% par an. Ce taux de croissance de la productivité totale des facteurs est donc fixé à 1% (à partir de données de l'INSEE et de statistiques du gouvernement²⁴).

Compte tenu des hypothèses démographiques et de productivité retenues, la croissance du PIB en moyenne annuelle sur la période 2017-2050 est de 1.1%. Elle est cohérente avec les projections de long terme de la croissance française publiées par les différentes institutions qui avoisinent 1% par an sur la période 2027-2050 (proche des 1.1% sur la période dans notre modèle baseline) : 0.8% pour Oxford Economics, 1.2% pour IHS Markit, 1.2% pour l'OCDE, et entre 1% et 1.3% (pour ces scénarios intermédiaires) pour le Conseil d'orientation des retraites (COR).

Tableau 8: Projections de la croissance française sur la période 2022-2050 (différentes sources : OCDE, RTE, IHS Markit, ENEDIS, Enerfuture, COR21, OEF)



Notre scénario baseline correspond à une situation sans trajectoire d'investissements bas carbone supplémentaires dans le secteur de l'électricité. Aucun financement supplémentaire n'est nécessaire, donc ce scénario de référence n'inclut pas de croissance de la taxe carbone pour les ménages, ni de croissance du signal prix carbone pour les entreprises, ni de dette publique supplémentaire, ni de croissance d'un impôt destiné à un financement particulier.

La croissance calculée est équilibrée : l'ensemble des variables en volume du modèle évoluent au même rythme de 1.1% par an. Comme le stock de capital augmente au même rythme que le PIB, l'économie

²⁴ JUILLET. 2017. N°57. Croissance de la productivité en France : le rôle de réallocation des parts de marché entre entreprises, https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/note_danalyse_ndeg57_web-croissance_de_la_productivite_en_france.pdf

peut continuer à croître de manière équilibrée sans compromettre les capacités de production. La loi de parité d'achat relative est vérifiée : les prix domestiques évoluent au même rythme que le prix étranger, si bien que le prix relatif des biens nationaux par rapport aux prix étrangers est constant. À long terme, le taux de change réel d'équilibre de long terme est constant et la compétitivité-prix cesse alors d'être une variable pertinente.

Tableau 9: Ensemble des variables exprimées en base 2014 (pour les prix) et en milliards d'euros constants (autres variables) (année de base : 2017)

Scénario Baseline				
	Année			
Données en extensif (en milliards d'euros)	5	10	30	Taux de croissance de l'année 5 à 30
Tous les secteurs sont inclus dans le calcul agrégé				
Offre de travail (nombre de travailleurs)	32264.79	33980.84	42278.85	1%
Demande de travail (nombre de travailleurs)	29335.08	30895.32	38439.85	1%
Investissements privés (hors transition énergétique)	536.09	564.61	702.48	1%
Stock de capital privé	8214.18	8651.07	10763.63	1%
Valeur ajoutée (PIB)	2110.79	2223.06	2765.92	1%
Énergie (consommée par les entreprises)	231	243.28	302.69	1%
Consommations intermédiaires non énergétiques	1904.56	2005.85	2495.68	1%
Consommations intermédiaires totales	2135.55	2249.14	2798.37	1%
Production	4245.24	4471.03	5562.83	1%
Consommation des ménages	1287.53	1356.01	1687.14	1%
Exportations	746.01	785.69	977.55	1%
Importations	793.73	835.95	1040.09	1%
Solde commercial net valeur (%PIB)	-0.098	-0.098	-0.098	0%
Revenu national net réel (déflaté par le prix à la consommation)	1580	1664	2071	1%
Revenu disponible net réel (déflaté par le prix à la consommation)	1405.14	1479.87	1841.25	1%
Richesse réelle nette (déflatée par le prix à la consommation)	3784	3985	4959	1%
Taux d'épargne (%)	8.4	8.4	8.4	0%
Consommation d'énergie des ménages	108.11	113.84	141.5	1%
Dette publique en % du PIB	98.3	98.3	98.3	0%
Déficit public en % du PIB	-3	-3	-3	0%

Le déficit commercial net en pourcentage du PIB se stabilise dans le temps - à cause de la croissance équilibrée et de la parité de pouvoir d'achat relative-.

La hausse combinée de l'offre de travail, du stock de capital et de leurs prix respectifs (salaires réels et prix réel de l'investissement) entraîne une hausse des revenus du travail et du capital pour les ménages (taux de croissance nominal de 2% par an en moyenne). La richesse réelle par tête efficiente, tout comme le revenu disponible réel net augmentent de 1.1% par an en moyenne sur la période. Ainsi, la hausse des prix réels à la consommation est compensée par la hausse de la richesse réelle des ménages, ce qui entraîne une hausse de la consommation (de 1.1% par an en moyenne sur la période²⁵).

La consommation d'énergie augmente de 1.1% par an en moyenne sur la période car on suppose que la répartition sectorielle de la consommation des ménages est constante (calibrée sur l'année de base, 2017, fixée autour de 8% de la consommation totale des ménages).

En croissance équilibrée, le taux d'épargne reste constant sur la période, calculé comme étant le ratio entre l'épargne et le revenu disponible net des ménages.

En matière de finances publiques, les recettes publiques augmentent sous l'effet de la hausse des revenus du travail, des revenus du capital et de la hausse de la production des entreprises (hausse de la production en volume et des prix réels). Au final, on a une croissance des recettes publiques, en termes nominaux, de 2% par an en moyenne sur la période.²⁶

Ce modèle comprend la plupart des taux fiscaux (avec les taux apparents calculés par le ratio entre les recettes de l'impôts et la base fiscale) dont les impôts sur les produits, sur la production, sur les importations, les impôts sur le revenu et le patrimoine et les cotisations sociales.

²⁵ La prise en compte d'une influence positive de la richesse sur la consommation introduit une force de rappel qui empêche les agents d'accumuler une richesse infinie (Autume, 2001). Il existe ainsi une force de rappel, ramenant le rapport entre richesse financière et revenu des ménages vers une valeur stationnaire.

²⁶ Toutes les variables nominales évoluent à un rythme de 2%. En effet, dans une croissance équilibrée, les valeurs en volume évoluent à un rythme de 1% et les prix étrangers évoluent à un rythme de 1%. Ainsi, lorsque l'on divise ses variables nominales par les prix étrangers et par la productivité, les valeurs sont stationnaires dans le modèle.

Côté dépenses, si les volumes des investissements et de la consommation du gouvernement se stabilisent, leurs prix respectifs augmentent, ce qui entraîne une hausse des dépenses publiques de 2% par an en moyenne sur la période.

Ainsi, le déficit public en nominal et le PIB nominal augmentent dans les mêmes proportions donc le ratio de déficit sur PIB est stable à l'équilibre stationnaire (taux de croissance des variables réelles évolue au même rythme et les prix évoluent au rythme de l'inflation étrangère).

La dette publique converge vers une cible de long terme (son niveau stationnaire), qui est donnée par la relation suivante : $Dette/PIB*(g-i+inf) = \text{déficit}/PIB$, avec g qui représente le taux de croissance réel de l'économie, i représente le taux d'intérêt nominal et inf représente l'inflation).

Dans le scénario Baseline, le taux d'intérêt réel apparent sur la dette publique est de 0.7% en moyenne par an sur la période (issu de la différence entre le taux d'intérêt nominal de 1.7% et l'inflation de 1%), inférieur au taux de croissance réel de l'économie de 1.1% par an sur la période, ce qui signifie que la dynamique du taux d'endettement n'est pas explosive dans le scénario baseline. La différence entre le taux d'intérêt réel et le taux de croissance de l'économie est négatif, de -0.4% en moyenne sur la période ²⁷ (2017-2050).

Toujours dans notre scénario baseline, le taux d'intérêt sur les obligations d'État à 10 ans en 2018 était de 0.75% mais le taux d'intérêt apparent sur l'ensemble de la dette publique - au sens de Maastricht - qui est calculé comme le rapport des intérêts de la dette publique sur la dette publique totale était de 1.67%. Le prix du PIB (utilisée comme déflateur de la dette) a évolué entre 2017 et 2018 à un rythme de 1%. Dans le compte central, le déflateur du PIB évolue au rythme de 1% par an, convergeant à l'état stationnaire à l'inflation étrangère qui est de 1% par an.

²⁷ Ce résultat est réalisé sous l'hypothèse que le taux d'intérêt est exogène dans le modèle. Afin de tester la validité de nos résultats nous avons réalisé un test de sensibilité en cas de forte hausse du taux d'intérêt réel. Les résultats sont dans la sous-section : Partie III-Chapitre 3- 7. Test de robustesse sur le taux d'intérêt réel.

1.2. Analyse sectorielle du scénario baseline

L'offre et la demande de travail (le nombre de travailleurs) sont surtout élevés dans le secteur des services (79%) et plus faible dans le secteur de l'énergie (secteur plus capitalistique). Les investissements (en volume) sont relativement élevés dans le secteur des services (79% du total des investissements), suivi par l'industrie non énergétique (12% du total des investissements), puis l'énergie (5% du total des investissements). La part du secteur de la construction est très faible (1.66% du total). La part du stock de capital dans le secteur des services est d'autant plus élevé (90% du stock de capital total de l'économie). Et la part du secteur de la construction est la plus faible (1% du stock de capital total de l'économie).

Tableau 10 : Ensemble des variables exprimées en base 2014 pour les prix et en milliards d'euros pour les autres variables (année de référence : 2017).

Scénario Baseline															
Données en extensif (en milliards d'euros)															
Secteurs	Agriculture			Industrie hors énergie			Energie			Construction			Services		
	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30
Offre de travail (nombre de travailleurs)	799	841	1046	2847	2998	3730	331	349	434	2210	2327	2895	26079	27466	34173
Demande de travail (nombre de travailleurs)	792	834	1037	2694	2837	3530	331	349	434	1807	1904	2368	23711	24972	31070
Investissements privés (hors transition énergétique)	11	12	15	63	66	82	27	29	36	9	9	12	426	449	558
Stock de capital privé	120	126	157	339	357	444	224	235	293	49	51	64	6947	7316	9103
Stock de capital total	131	146	172	402	66	526	251	29	329	58	60	76	7373	7316	9661
Valeur ajoutée (PIB)	33	35	44	239	251	313	52	55	68	117	123	153	1670	1759	2189
Énergie (consommée par les entreprises)	6	6	7	39	41	51	113	119	147	6	7	8	68	72	89
Consommations intermédiaires non énergétiques	50	53	66	503	530	659	49	52	65	173	182	227	1129	1189	1479
Consommations intermédiaires totales	56	59	73	542	571	710	162	171	212	179	189	235	1197	1260	1568
Production	89	94	117	780	822	1022	214	225	280	296	312	388	2866	3019	3756
Consommation des ménages	35	37	46	481	507	630	109	115	143	20	21	26	642	677	842
Exportations	16	17	21	479	504	627	29	30	38				222	234	291
Importations	14	15	18	504	531	661	85	90	112				190	200	249
Solde commercial net valeur (% PIB)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.8	-0.8	-0.8	-1	-1	-1				0.0	0.0	0.0

Comme la croissance est équilibrée, les parts des secteurs dans le scénario de base sont constantes. Pour l'année de base (2017) et sur toute la période, la valeur ajoutée (en volume) est surtout importante

dans le secteur des services (79% du total), suivi par l'industrie non énergétique (11% du total), puis la construction (6% du total).

La demande d'énergie (en volume) est surtout importante dans le secteur de l'énergie (49% du total de la demande d'énergie) dont la majorité de ses consommations intermédiaires sont des produits énergétiques. En effet, l'électricité est une énergie secondaire car elle nécessite la transformation d'une énergie primaire pour exister. Le deuxième secteur dont la demande d'énergie est la plus importante est le secteur des services (29% du total de la demande d'énergie), suivi par le secteur de l'industrie non énergétique (17% du total de la demande d'énergie).

La consommation des ménages en volume est surtout élevée dans le secteur des services (50% du total), suivi du secteur de l'industrie (37% du total), de l'énergie (8% du total), de l'agriculture (3% du total) et du secteur de la construction (2% du total).

Afin d'étudier les effets des politiques publiques, les consommations de 15 cohortes sont calculées dans le compte central.

Dans ce qui suit, nous présentons les trois scénarios de politique publique, qui seront évalués par rapport à notre scénario « baseline » (compte central). Par rapport à notre scénario de référence, nous envisageons trois scénarios dans lesquels trois politiques publiques sont évaluées et étudions les effets agrégés en fonction du mode de financement de ces investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité.

2. Scénario 1. Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par la dette publique

2.1. Description du scénario

Dans ce scénario, nous nous proposons de financer la transition bas carbone dans le secteur de l'électricité par une hausse de la dette publique à court terme – c'est à dire sans hausses de recettes fiscales publiques – et, à moyen terme, par une hausse d'un impôt générique.

La description de ce scénario est divisée en quatre parties. La première sera dédiée à expliquer notre choix de développer un scénario de financement des investissements électriques bas carbone sous forme de dette (de la première à la 14^e année de notre modèle). Nous faisons l'hypothèse (argumentée) que l'effet d'éviction par la hausse des taux d'intérêt est faible en France (justification à partir de données historiques). La deuxième explique notre choix d'introduire à moyen terme un financement des investissements électriques bas carbone sous forme d'impôt générique sur le revenu des agents. Dans la troisième partie nous détaillerons la manière dont nous implémentons le choc dans le modèle. Enfin, dans la dernière partie, nous décrivons les résultats du scénario.

Financement des investissements électriques bas carbone sous forme de dette publique

Dans un modèle classique d'équilibre général calculable de long terme où les marchés et les anticipations sont parfaits, l'Etat emprunte pour lisser la dépense publique tant que les recettes publiques courantes sont inférieures aux recettes futures. Soumis à la contrainte de solvabilité de l'Etat, selon laquelle la somme actualisée des impôts doit couvrir la dette initiale et la somme actualisée des dépenses publiques, la hausse de la dette publique doit se traduire *in fine* par une hausse du taux des impôts, *ceteris paribus* (ou une baisse des dépenses publiques). La contrainte de solvabilité implique une neutralité. Qu'elle soit financée par une hausse d'un impôt générique sur les revenus des agents ou par de la dette publique, la dépense publique aura un effet négatif identique sur la dépense et sur la consommation. Le profil dans le temps des hausses de l'impôt qui équilibrent une hausse des dépenses et assurent la solvabilité budgétaire, n'a pas d'influence sur le niveau de consommation.

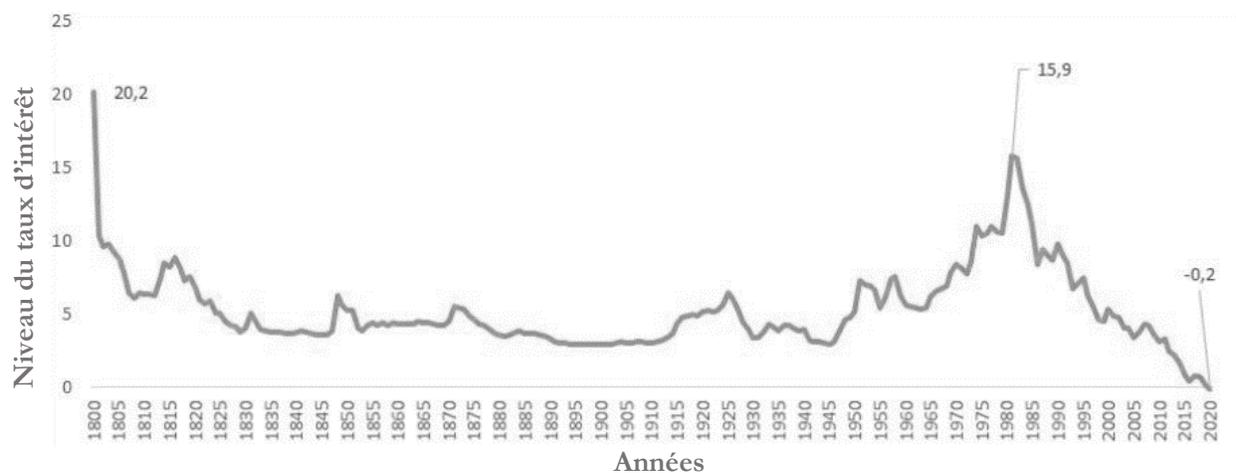
Dans un modèle à générations imbriquées, il n'y a pas d'équivalence ricardienne²⁸. Si les dépenses peuvent être financées soit par une augmentation des impôts payés par les jeunes ou par les personnes âgées, soit par de la dette publique, le niveau de long terme de la dette publique et la nature de l'impôt - selon qu'il pèse sur les jeunes ou sur les personnes âgées- ont une influence sur la demande de capital et sur la production d'équilibre. Une hausse de la dette publique en croissance équilibrée ponctionne l'épargne des jeunes, ce qui diminue l'accumulation du capital privé. Si les impôts sont levés sur les générations ultérieures, les jeunes générations ignoreront les hausses d'impôts et ne modifieront pas

²⁸ Weil [1987] rappelle que dans les modèles à générations imbriquées, lorsque le degré d'altruisme de l'agent représentatif est faible, l'équivalence ricardienne ne s'applique pas.

leurs niveaux de consommation et d'épargne. Si les ménages ont un horizon de vie fini, ils considèrent que la dette publique sera remboursée avec une hausse des impôts levés sur les générations futures - qui ne les concernent pas-. Ainsi, la hausse de la dette publique ne diminuera pas fortement la consommation -contrairement à ce que les modèles dynastiques de type ILA prédisent-. La politique budgétaire retrouve une partie de son efficacité.

Du fait que le modèle est en économie ouverte, le taux d'intérêt est fixé par le reste du monde. Notre scénario repose sur l'hypothèse d'un faible effet d'éviction par la hausse des taux d'intérêt réel. Or la hausse des déficits publics peut peser sur la demande privée (consommation et investissement des ménages et des entreprises) du fait de la hausse du taux d'intérêt réel d'équilibre et par l'absorption de l'épargne privée au détriment des besoins de financements privés en investissement.

Les études sur données historiques montrent que la tendance des taux d'intérêt à long terme est à la stabilité voire à la baisse. Nous observons que les taux sont globalement stables sur très long terme bien que certaines périodes de l'histoire présentent de plus fortes variations par rapport à cette tendance de long terme. Paul Schmelzing (2020) a publié une étude qui porte (sur huit siècles d'observations) sur les taux de rendement réels des titres souverains (actifs sans risques). Les résultats suggèrent une baisse séculaire des taux longs réels. Les taux auraient baissé à 2.6 % durant les deux derniers siècles. Cette baisse est surtout due à une diminution des taux nominaux. Sur données françaises, la publication de Levy-Garboua et Monnet (2016) montre que le taux français suit également une tendance à la baisse lorsque l'on observe le taux d'intérêt réel à 10 ans sur la période 1800-2020 (graphique 14).



Sources : Levy-Garboua et Monnet, 2016.

Graphique 14: Évolution du taux d'intérêt réel à 10 ans sur la période 1800-2020 (Levy-Garboua et Monnet, 2016)

Si le poids de la dette publique a augmenté dans tous les pays développés depuis une quarantaine d'années, le coût du service de la dette a dans le même temps baissé. En 2018, la part des intérêts représentait 3.1% des dépenses publiques totales contre 6.6% en 1996. La remontée des taux amorcée en 2022 fait suite à vingt ans de taux extrêmement bas. Elle n'invalide pas l'analyse de très long terme fournit dans ce travail de recherche.

Dans ses récentes recherches, Olivier Blanchard (2019) préconise l'usage de la dette publique pour financer des investissements structurels (incluant des investissements de transition énergétique), si les taux d'intérêts réels restent bas et inférieurs à la croissance économique.

Pour un montant des investissements électriques bas carbone de 8.3 milliards d'euros par an, le différentiel entre le taux d'intérêt réel apparent sur la dette et le taux de croissance réel du PIB n'augmente pas beaucoup dans le scénario 1. Le taux d'intérêt réel est de 0.63% et le taux de croissance du PIB est de 1.1% dans ce premier scénario. Pour obtenir un différentiel nul, il faudrait obtenir un taux de croissance du PIB de 0.63%. Le taux de croissance réel est supérieur au taux d'intérêt réel de l'économie sur toute la période dans notre scénario 1.

Nos résultats sur données françaises peuvent alimenter le débat actuel lancé par Blanchard sur les implications intergénérationnelles supposées limitées de l'accumulation de la dette publique. Nous confirmerons plus loin en partie ce résultat dans le contexte d'une transition à faible émission de carbone financée par la dette. En effet, les effets redistributifs intergénérationnels défavorables sont plus limités dans le cas d'un financement par dette publique, ce qui vient partiellement confirmer la thèse de Blanchard, dans notre cadre précis d'une trajectoire d'investissements bas carbone dans le secteur électrique.

Dans cette simulation, la dette est partiellement remboursée à partir de la 14^e année sous forme d'une hausse de l'impôt générique sur les revenus des agents. Avant de présenter cet impôt, un état des lieux des recettes et dépenses des administrations publiques en France est présenté.

Remboursement partiel de la dette publique -destinée à financer les investissements électriques bas carbone- sous forme d'une hausse d'un impôt générique sur les revenus des agents à moyen terme

Dans le modèle, nous choisissons donc d'augmenter un impôt générique sur les revenus des agents pour financer la trajectoire d'investissements électriques bas carbone. L'impôt générique sur les

revenus des agents regroupe ici, pour l'essentiel, l'impôt sur le revenu des personnes physiques, l'impôt sur les sociétés et la taxe sur les salaires, nets des crédits d'impôts.

Pour mémoire, la TVA et les impôts sur le revenu des agents (IRPP, IS notamment) sont les deux impôts qui rapportent le plus à l'État (respectivement 162 et 237 milliards d'euros en 2017).

Dans ce scénario, l'impact négatif sur les ménages est d'autant plus limité qu'une partie des ménages est contrainte par leur liquidité. Pour que les ménages soient indifférents à une modification des impôts courants, il faut qu'ils puissent emprunter en contrepartie de moindres impôts futurs ou au contraire épargner dans la perspective d'une hausse attendue des impôts futurs

Tableau 11 : Composition de l'impôt générique sur le revenu total

	Année		
	2017	2020	2021
Composition de l'impôt sur le revenu (principaux postes, en % de l'impôt sur le revenu total)			
Contribution sociale généralisée (CSG)	42%	47%	45%
Contribution au remboursement de la dette sociale (CRDS)	3%	3%	3%
Impôt sur le revenu des personnes physiques	31%	28%	28%
Impôts sur les sociétés y compris majoration et frais de poursuite	15%	14%	16%

Implémentation des chocs d'investissements bas carbone dans le secteur électrique dans le modèle

- ***Augmentation de l'investissement et du prix de gros de l'énergie dans le temps***

La trajectoire d'investissements bas carbone dans le secteur électrique et du prix de gros de l'énergie est identique à celle présentée dans le premier scénario. Ainsi, on augmente les investissements de manière exogène de 8.3 milliards d'euros par an et on augmente le prix de gros de 0.6% par an. On suppose donc que la hausse de la fiscalité du prix de l'énergie ne modifie pas le prix de gros.

- *Augmentation du taux apparent de l'impôt générique sur les revenus*

Dans ce premier scénario, on finance les investissements publics exogènes bas carbone grâce à un endettement public, remboursé partiellement (73%) à moyen terme (14^e année du modèle²⁹) sous forme de hausse de l'impôt sur le revenu.³⁰

En 2017, les recettes fiscales issues de l'impôt générique sur les revenus s'élevait à 226.7 milliards d'euros.³¹ L'impôt dit générique est composé de l'impôt sur le revenu des personnes physiques, l'impôt sur les sociétés et la taxe sur les salaires (nets des crédits d'impôts) dont la CSG. Pour financer l'investissement, il faudrait que ces recettes fiscales atteignent (ex ante) un montant de 235.01 milliards d'euros, ce qui correspond à une hausse de 8.31 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse *ex ante* du taux apparent de l'impôt générique sur les revenus est de 0.5%, équivalente à 0.4 point de PIB par an en moyenne.

Dans notre modèle, l'impôt générique sur les revenus réduit le revenu disponible net des ménages (et a pour assiette le revenu national net des ménages), il baisse également la richesse des ménages et dans l'équation de consommation des ménages (car elle constitue l'assiette pour la consommation des ménages pauvres comme expliqué dans la partie II- Chapitre 2 – 2.1).

Les recettes de l'impôt sur le revenu sont surtout élevées pour les générations intermédiaires (générations des 45 à 65 ans) dont les revenus du travail sont plus élevés (cf.pg 91).

Les données de comptabilité nationale de l'INSEE et la base de données SRCV (« Statistiques sur les ressources et conditions de vie », 2018) permettent de dessiner une trajectoire des revenus de l'impôt générique pour chaque génération. Les montants les plus élevés concernent les générations d'âge intermédiaire qui sont les générations dont les revenus du travail sont les plus importants.

²⁹ On implémente le choc de remboursement 10 ans après le choc d'investissement, analogue à une obligation souveraine 10 ans qui arriverait à maturité.

³⁰ Dans la réalité, il faut que cette annonce soit jugée crédible par les différentes générations. L'Etat ne réalisera pas de ré-optimisation. Il existe une cohérence intertemporelle.

Tableau 12 : Résultats macroéconomiques du premier scénario

Premier scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par dette publique				
	Année			
Écart par rapport au scénario de base (%)	5	10	13	30
Tous les secteurs sont inclus dans le calcul agrégé				
Prix réels de la consommation (déflatés par le prix des importations)	0.12	0.08	0.07	-0.23
Augmentation de l'impôt sur le revenu (10 ans après le choc)	0	0	0.05	0.05
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.08	-0.06	-0.11	-0.24
Demande de travail (nombre de travailleurs)	-0.09	-0.07	-0.12	-0.26
Investissements privés (hors transition énergétique)	-1.16	-1.51	-2.07	-4.78
Stock de capital privé	-0.07	-0.16	-0.23	-1.15
Stock de capital total	-0.25	-0.21	-0.29	-0.44
Valeur ajoutée (PIB)	-0.10	-0.13	-0.19	-0.69
Énergie (consommée par les entreprises)	-0.78	-0.78	-0.83	-1.12
Consommations intermédiaires non énergétiques	-0.12	-0.14	-0.21	-0.80
Consommations intermédiaires totales	-0.19	-0.21	-0.28	-0.83
Production	-0.15	-0.17	-0.24	-0.76
Consommation des ménages	-0.08	-0.06	-0.11	-0.24
Exportations	-0.16	-0.18	-0.25	-0.74
Importations	-0.27	-0.26	-0.38	-1.01
Solde commercial net en valeur (en % du PIB)	-8.61	-8.60	-8.58	-8.42
Revenu national net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-0.67	-0.61	-0.97	-2.69
Revenu disponible net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-0.30	-0.27	-0.92	-0.92
Richesse réelle nette (déflatée par le prix à la consommation)	-0.08	0.05	0.00	-0.00
Taux d'épargne	-0.20	-0.19	-0.75	-0.63
Consommation d'énergie des ménages	-0.08	-0.06	-0.11	-0.24
Dette publique en % du PIB	0.74	2.0	3.0	7.5
Déficit public en % du PIB	0.2	0.3	0	0.4

2.2. Mécanismes de transmission du choc dans le premier scénario

Pour rappel, toutes les variables sont en écart par rapport au scénario baseline.

Le choc d'investissement électrique bas carbone entraîne un effet d'éviction sur les autres investissements du secteur énergétique et sur les investissements des secteurs non énergétiques.

Le scénario de référence (baseline) correspond à l'état stationnaire. Dans cet état, le stock de capital est à son niveau d'équilibre. De fait, tout investissement public exogène supplémentaire se traduit par une surcapacité par rapport à la valeur d'équilibre de l'état stationnaire. Les investissements bas carbone se substituent aux investissements carbonés du secteur de l'énergie et induisent des effets d'éviction non seulement sur le capital du secteur de l'énergie mais également sur les autres secteurs de l'économie.

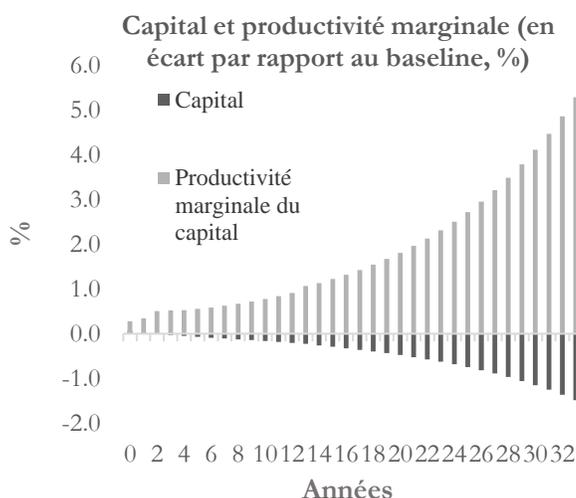
Les investissements non-énergétiques diminuent continuellement jusqu'en 2045 dans la mesure où la trajectoire des investissements électriques bas carbone augmente jusqu'en 2045.

Les investissements bas carbone font baisser la productivité marginale moyenne du capital dans l'économie, ce qui implique un désinvestissement dans le reste du secteur de l'énergie et dans les autres secteurs non énergétiques (en vertu de l'hypothèse de mobilité du capital entre les secteurs). L'économie retrouve son niveau de capital stationnaire qui correspond à son niveau potentiel -le niveau du capital est le même mais sa composition est différente dans la mesure où le capital est désormais moins carboné.

Cet effet d'éviction n'est pas dû à une hausse du taux d'intérêt, car ce dernier est exogène dans le modèle - le coût d'usage du capital s'ajuste par le prix réel de l'investissement-. En économie ouverte, le taux d'intérêt de la France est égal au taux d'intérêt étranger.

Toutefois, si les taux d'intérêt étaient endogènes et augmentaient à la suite du choc de décarbonation, on pourrait craindre un effet d'éviction plus élevé. Dans la mesure où le scénario baseline correspond à l'état stationnaire de l'économie, tout investissement supplémentaire exogène pousse les investissements endogènes à la baisse. Ainsi, le coût d'usage augmente pour décourager l'investissement. Le stock de capital privé diminue de -0.5% en moyenne sur la période post-choc, ce qui correspond à une augmentation de la productivité marginale du capital de 1.9% en moyenne sur la

période post-choc (en écart par rapport au scénario baseline). La productivité marginale du capital augmente davantage dès le choc d'investissement (l'année 2).



Sources : Résultats du modèle pour le premier scénario.

Graphique 15: Stock de capital et sa productivité marginale dans le premier scénario

Le stock de capital national diminue par rapport au scénario de référence

Le flux d'investissement endogène hors décarbonation (qui concerne les secteurs hors énergie et les investissements carbonés de l'économie) baisse sous l'effet d'éviction. À cet effet de substitution, s'ajoute l'effet d'échelle dû à la baisse de la demande globale sous l'effet de la hausse de l'impôt générique. La valeur ajoutée diminue également car elle s'ajuste à la baisse de la demande. La demande extérieure baisse aussi (importations) face à la baisse des revenus des entreprises (baisse des consommations intermédiaires) et des ménages (baisse de leur consommation).

Ces trois facteurs, qu'il s'agisse d'un effet prix ou d'un effet volume explique la dynamique du capital qui diminue dans le temps par rapport au baseline.

L'offre de travail des ménages et la demande de travail des entreprises diminuent par rapport au scénario de référence

Comme le coût d'usage du capital augmente, du fait de la frontière des prix, le salaire réel augmente moins vite que dans le scénario de référence. Les salaires réels baissent en termes relatifs, ce qui pousse à accroître la demande d'emploi. Mais dans la mesure où la valeur ajoutée diminue, l'effet de la valeur ajoutée l'emporte sur l'effet prix (baisse des salaires réels, déflatés par le prix de la valeur ajoutée).

L'équilibre du marché du travail se traduit par une baisse du volume d'emploi par rapport au baseline. Les salaires réels diminuent sous l'effet de la baisse de la demande de travail des entreprises et de la baisse de l'offre de travail des ménages.

Impôt générique sur les revenus des agents

Bien que la hausse de l'impôt générique n'intervienne qu'à moyen terme (l'année 13), la majorité des ménages classiques - qui représentent 82% des ménages- anticipent cette hausse de l'impôt et l'intègrent dans leur contrainte de budget intertemporel. L'impôt sur le revenu diminue le revenu disponible net des ménages et la richesse réelle des ménages. Face à la baisse de leurs revenus et de leur richesse, les ménages diminuent leur consommation.

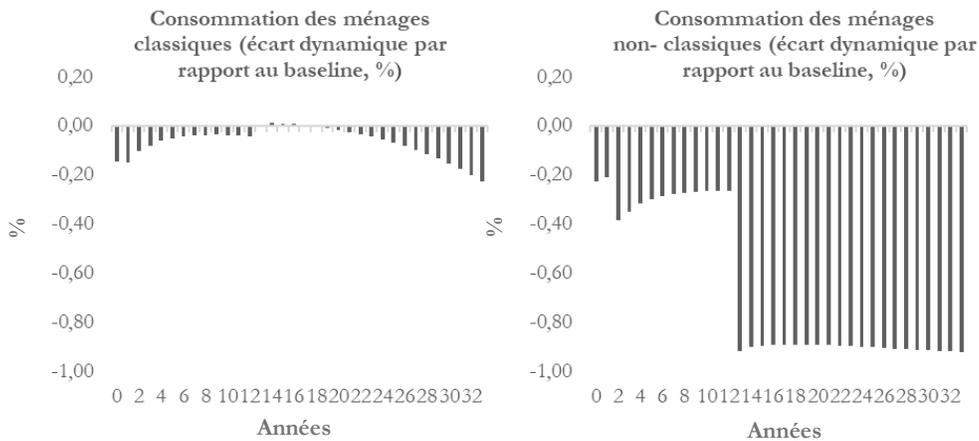
Consommation des ménages

Par rapport au scénario de référence, le revenu des ménages avant impôt diminue sur toute la période (par effet d'anticipation pour les ménages classiques et avec l'effet d'éviction des investissements) et diminue légèrement plus à partir de l'année du choc d'impôt sur le revenu (on passe de -0.30% en écart dynamique au baseline l'année 10 à -0.4% % l'année 13, année du choc). La dynamique est la même pour le revenu disponible net (revenu des ménages après impôt), mais la diminution est d'autant plus forte à partir de l'année du choc (on passe de -0.3% en écart dynamique au baseline l'année 10 à -0.9% l'année 13, année du choc), et d'autant plus pour les ménages non-classiques.

Dans le modèle, le revenu disponible réel net des ménages (revenu disponible net déflaté par le prix à la consommation) détermine la consommation des ménages keynésiens, et la richesse réelle nette des ménages (richesse nette déflatée par les prix réels à la consommation) détermine la consommation des ménages classiques. La consommation agrégée dépend davantage de la richesse réelle nette dans la mesure où la part des ménages sans contraintes de liquidité (non-pauvres, i.e ménages classiques) est plus importante. Toutefois, Chauvin et al (2010) montrent qu'en France, si les effets de richesse sont significatifs, ils sont modérés. Les auteurs trouvent qu'un doublement de la richesse amène une hausse de la consommation de l'ordre de 8 à 10 %. Si certains doutent de l'existence de l'effet richesse, l'effet richesse sur la consommation a été prouvé empiriquement dans le cas français (Garbinti et al, 2020).

L'impôt générique fait baisser le revenu des ménages qui ont un comportement de cycle de vie et le revenu des ménages non-classiques (qui ont des contraintes de liquidité) du fait de la baisse permanente de l'activité. Bien que les ménages classiques puissent emprunter pour amortir le choc, la baisse de la

consommation est plus forte pour les ménages les plus vulnérables (les ménages non-classiques qui ont des contraintes de liquidité) comme le montre le graphique ci-dessous.



Sources : Résultats du modèle pour le premier scénario.

Graphique 16: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline)

Par rapport au baseline et face au choc permanent d'impôt générique, la consommation et l'offre de travail baissent par un effet revenu. En effet, étant donné que l'élasticité de l'offre de travail est nulle dans le modèle, l'effet de l'impôt sur l'offre de travail se limite à un effet revenu négatif. L'investissement endogène non énergétique baisse également, sous l'effet d'éviction et sous l'effet de l'impôt sur le revenu, ce qui pousse à la hausse le prix réel de l'investissement - et donc à la hausse du coût d'usage du capital -. Les exportations baissent également face à l'effet négatif sur l'activité économique. Pour finir, la demande globale baisse, ce qui réduit les importations par un effet revenu négatif.

L'équilibre du marché des biens et des services se traduit par une hausse des prix réels à la consommation. Cette augmentation des prix réels à la consommation pour les ménages s'explique aussi (dans une moindre mesure) par la hausse des prix de gros de l'énergie qui accroît le prix de l'énergie payé par les ménages. Toutefois, ce dernier effet est plus faible dans la mesure où le prix de l'énergie représente une partie infime du prix à la consommation (8%).

L'augmentation de l'impôt sur le revenu et l'augmentation des prix réels à la consommation sur la période post-choc diminue le revenu disponible réel net des ménages et leurs actifs réels nets. Si les actifs réels nets des ménages sont négatifs en écart au baseline sur toute la période -les ménages classiques s'endettent-, le revenu disponible net diminue davantage à long terme. Ainsi, la consommation diminue sur la période.

Avec la baisse du revenu des ménages, le taux d'épargne diminue (de respectivement -0.2% à court et moyen terme, -0.8% l'année 13, année du choc d'impôt sur le revenu, et -0.6% à long terme).

La baisse de la consommation des ménages réduit l'offre de travail des ménages (effet revenu). La baisse des salaires n'a pas d'impact sur l'offre de travail des ménages dans la mesure où l'élasticité du travail au salaire est nulle dans le modèle - ce qui est conforme aux faits stylisés du marché du travail -

La valeur ajoutée baisse continuellement sur la période par rapport au baseline

La diminution de la demande de travail (de -0.09% à court terme, de -0.07% à moyen terme et de -0.26% à long terme, en écart au baseline) et du stock de capital privé (de -0.07% à court terme, de -0.16% à moyen terme et de -1.15% à long terme, en écart au baseline) diminue la valeur ajoutée (de -0.10% à court terme, de -0.13% à moyen terme et de -0.69% à long terme, en écart au baseline).

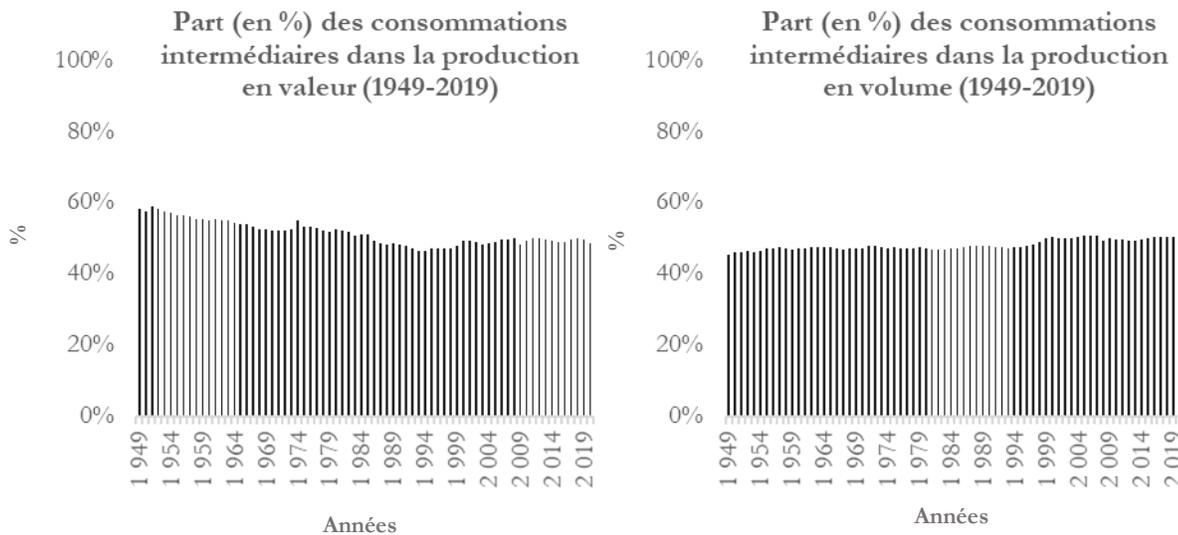
Tableau 13 : Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 1 par rapport au compte central

		Année				
		5	10	13	30	
Contribution du coût d'usage du capital (prix réel de l'investissement)		1	0.06	0.06	0.07	0.10
Contribution du Stock de capital total (privé + public)		2	-0.10	-0.09	-0.12	-0.18
Contribution du salaire réel du travail		3	-0.01	-0.06	-0.07	-0.46
Contribution de la demande d'emploi		4	-0.05	-0.04	-0.07	-0.15
Ecart de la valeur ajoutée en % par rapport au compte central		1+2+3+4=5	-0.10	-0.13	-0.19	-0.69

Baisse des consommations intermédiaires

Comme les consommations intermédiaires et la valeur ajoutée sont quasiment complémentaires - l'élasticité de substitution est de 0.1 ce qui est conforme à l'observation empirique de la quasi-stabilité des consommations intermédiaires dans la production, autour de 50% -, la baisse de la valeur ajoutée entraîne la baisse des consommations intermédiaires.

La valeur de l'élasticité retenue est conforme à l'observation empirique, comme le montre la part des consommations intermédiaires dans la production (période : 1949-2019).



Sources : INSEE.

Graphique 17: Part en pourcentage des consommations intermédiaires dans la production sur la période 1949-2019, en valeur et en volume.

À cause de la frontière des prix et de la valeur de l'élasticité de substitution retenue, la hausse des prix réels de l'énergie se traduit par une baisse des prix réels des consommations intermédiaires non énergétiques, ce qui devrait augmenter ces dernières par un effet de substitution. Or, les consommations intermédiaires non énergétiques baissent sous l'effet récessif dû à la hausse de l'impôt sur le revenu. Bien qu'il y ait une baisse des prix réels qui favoriserait une substitution entre énergie et autres consommation intermédiaires, l'effet volume l'emporte.

Baisse de la demande d'énergie des entreprises sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie

Sur toute la période post-choc, les prix de l'énergie pour les entreprises augmentent à cause de la hausse des prix de gros (appliquée aux entreprises comme aux ménages) associée à la trajectoire des investissements bas carbone dans le secteur électrique. Cette hausse des prix de l'énergie diminue la demande.

Production

Du fait de la baisse de la valeur ajoutée et des consommations intermédiaires, la production diminue (plus fortement que la valeur ajoutée sous l'effet de la forte baisse de la demande d'énergie) de -0.15% à court terme, de -0.17% à moyen terme et de -0.76% à long terme, en écart au baseline.

La baisse des prix de la valeur ajoutée, la baisse de la valeur ajoutée en volume, et la baisse des consommations intermédiaires en volume réduisent la production en volume sur le long terme.

Exportations et importations

La baisse de la demande pousse les prix réels domestiques à la baisse (i.e à une moindre hausse en comparaison du baseline) pour une évolution constante – exogène - des prix étrangers. Les termes de l'échange se dégradent, ce qui devrait encourager les exportations par un effet de substitution. Compte tenu de l'élasticité prix des exportations (0.6), on s'attend à une hausse des exportations par rapport au compte central - par un effet de substitution - Toutefois, les exportations baissent par rapport au compte central car l'effet volume négatif dû à la baisse de l'activité³² l'emporte sur l'effet positif de la baisse des prix. Autrement dit, la baisse de l'activité l'emporte sur l'amélioration de la compétitivité.

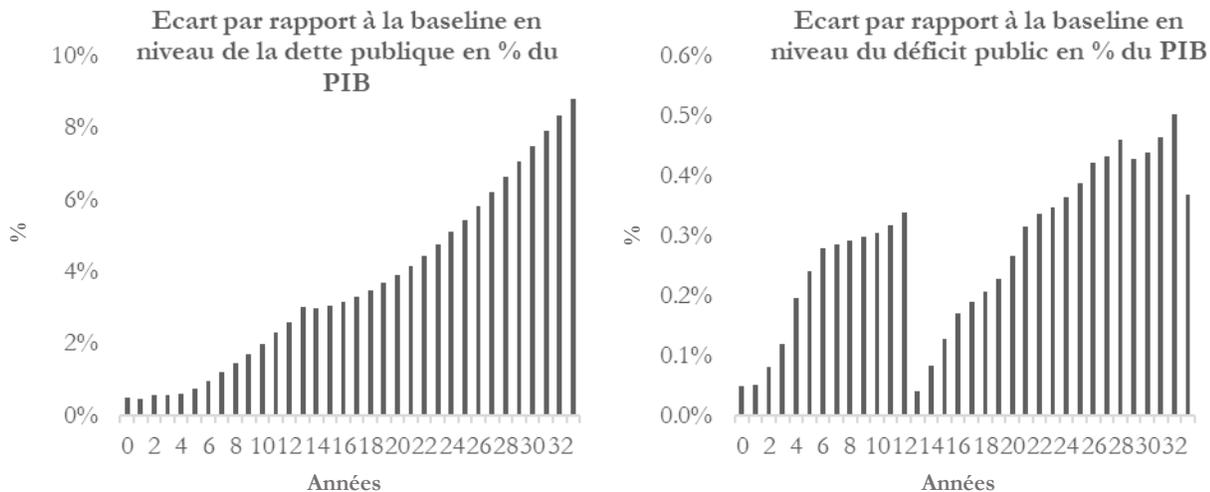
Avec la dégradation des termes de l'échange, les prix étrangers deviennent moins compétitifs et relativement plus élevés que les prix domestiques. L'élasticité prix des importations (0.86), entraîne une baisse des importations par rapport au compte central. Cet effet est renforcé par la baisse de la demande interne (consommation des ménages et investissements) des revenus des ménages. La baisse des importations en volume (faute de demande) est plus forte que la baisse des exportations en volume (dû à l'effet récessif sur l'activité économique). Toutefois, l'effet prix l'emporte (le taux de change réel s'est déprécié en écart au baseline de -0.1% en moyenne sur la période) et le solde commercial en valeur en pourcentage du PIB diminue sur la période de -8.6% à court et moyen terme, et de -8.4% à long terme, en écart au baseline.

La dette et le déficit public augmentent

La hausse du déficit et de la dette publique est due à la baisse *ex post* des recettes fiscales par rapport aux dépenses publiques. Le déficit primaire augmente du fait de la baisse des recettes fiscales et les

³² Notre modèle considère la croissance de long terme. Ainsi, on néglige les effets de très court terme comme celui de la courbe en J qui ne s'applique pas ici. La *courbe en J* désigne l'expression graphique de l'évolution du solde de la balance commerciale après la dévaluation d'une monnaie nationale. Les prix s'ajustent immédiatement (à court terme) tandis que les quantités s'ajustent sur le moyen et le long terme. Au cours du temps, la balance commerciale située initialement en équilibre se détériore à la suite d'une dévaluation du taux de change (c'est l'effet prix qui l'emporte). Mais petit à petit l'ajustement par les quantités (effet du même nom) permet d'améliorer le solde et de dépasser celui de l'équilibre initial : c'est la condition de Marshall-Lerner. La courbe ainsi dessinée s'appelle courbe en J. Dans notre modèle, les effets de très court terme sont donc négligés.

charges d'intérêt augmentent du fait de la hausse de la dette publique - si on laissait les taux réagir au niveau de la dette, les charges de la dette augmenteraient également par un effet prix. -.

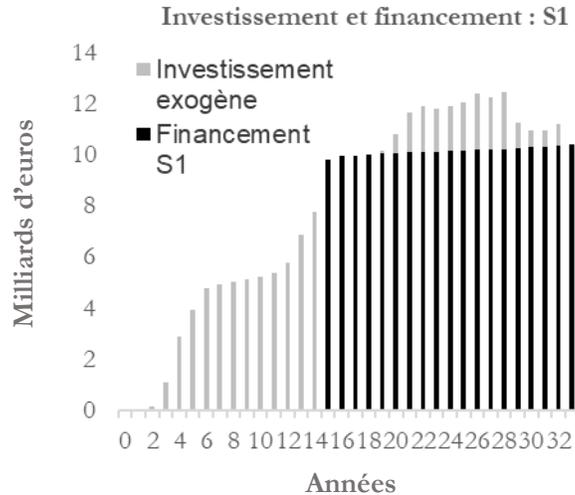


Sources : Résultats du modèle pour le premier scénario.

Graphique 18: Dette publique et déficit en % du PIB dans le premier scénario en écart au baseline.

Pour rappel, dans ce premier scénario, le gouvernement est supposé différer le financement par l'impôt des investissements bas carbone dans le secteur électrique. Il intervient à la 14^e année du modèle, l'année 13, soit 10 ans après le choc d'investissement, conformément à une obligation souveraine qui arriverait à échéance au bout de 10 ans. À la fin de la période, l'intégralité du montant de ces investissements décarbonés n'est remboursée que partiellement par la hausse des recettes de l'impôt générique.

Une deuxième explication tient à l'effet négatif sur l'activité économique qui alimente le déficit et la dette publique. Les charges de la dette augmentent par un effet volume dû à la hausse de la dette publique en volume. Si on autorisait une hausse des taux d'intérêt sur la dette publique, les charges d'intérêt augmenteraient également par un effet prix dû à la hausse des taux. La contrainte de solvabilité de long terme du gouvernement nécessiterait une hausse des impôts. Dans le modèle, on exige que la dette publique ait une cible d'équilibre de long terme. Le niveau stationnaire de la dette augmente mais à un niveau plus élevé que dans le scénario de référence.



Sources : Résultats du modèle (premier scénario).

Graphique 19: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse de l'impôt sur le revenu dans le premier scénario)

Le graphique 19 montre le rythme de remboursement de la dette mobilisée pour financer les investissements bas carbone, ainsi que son ampleur. Sur le même graphique, est représenté les montants d'investissements électriques bas carbone.

Dans ce premier scénario, le remboursement commence à moyen terme et est calibré en amont du choc pour rembourser *ex ante* l'équivalent du montant moyen annuel d'investissement électrique bas carbone sur la période post-choc (8.3 milliards d'euros). À échéance de la période observée, la dette est remboursée en bonne partie mais pas totalement (193 milliards sur les 266 milliards d'investissements, soit 73% du montant total).

La trajectoire des investissements électriques bas carbone et de son financement ne suffit pas pour étudier la trajectoire de la dette en pourcentage PIB sur la période considérée. En effet, en complément, il est important d'analyser l'évolution des recettes fiscales nettes -qui sont liées à l'évolution des variables macroéconomiques (travail, capital et consommation) – et à la trajectoire du PIB.

Dans ce premier scénario, le taux d'intérêt apparent (exogène) sur la dette est de 0.6% en moyenne sur la période. Le niveau du PIB baisse de -0.3% en moyenne sur la période (par rapport au niveau de PIB du compte central), équivalent à un écart en taux de croissance du PIB (par rapport au compte central) très faible. La différence entre le taux d'intérêt réel et le taux de croissance de l'économie est négatif, de -0.4% en moyenne sur la période.

2.3. Analyse sectorielle du scénario 1 :

Tableau 14 : Ensemble des variables exprimées en écart dynamique par rapport au baseline (premier scénario)

Premier scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par dette publique																				
Écart par rapport au scénario de base (%)																				
Secteurs	Agriculture				Industrie hors énergie				Energie				Construction				Services			
	5	10	13	30	5	10	13	30	5	10	13	30	5	10	13	30	5	10	13	30
Prix réels de la consommation	0.0	0.0	-0.1	-0.7	-0.1	-0.1	-0.2	-0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	-0.6	-0.8	-1.1	-4.3	-0.1	0.0	0.1	1.1
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
Demande de travail (nombre de travailleurs)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3
Investissements privés (hors transition énergétique)	-0.1	-0.3	-0.2	-1.4	-0.3	-0.4	-0.5	-1.9	-16	-21	-28	-44	-0.8	-1.4	-1.6	-7	-0.4	-0.4	-0.7	-2.7
Stock de capital privé	-0.1	-0.2	-0.2	-0.7	-0.2	-0.3	-0.4	-1.3	-1.2	-1.2	-1.2	-1.5	-0.7	-1.0	-1.4	-5.3	-0.0	-0.1	-0.2	-1.1
Stock de capital total	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	-1.8	-0.6	-0.4	-0.4	-1.0	-0.4	-0.5	-1.0	-4	-0.3	-0.1	-0.1	-0.7
Valeur ajoutée (PIB)	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-1.0	-0.3	-0.4	-0.6	-2.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.6
Énergie (consommée par les entreprises)	-0.6	-0.6	-0.7	-1.2	-0.6	-0.7	-0.7	-1.4	-1.0	-1.0	-0.7	-1.2	-0.9	-1.1	-1.4	-3.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Consommations intermédiaires non énergétiques	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.8	-0.4	-0.5	-0.5	-0.9	-0.4	-0.5	-0.7	-2.8	0.0	-0.1	-0.1	-0.5
Consommations intermédiaires totales	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.9	-0.8	-0.8	-0.9	-1.1	-0.4	-0.5	-0.8	-2.8	-0.1	-0.1	-0.1	-0.5
Production	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-1.1	-0.4	-0.5	-0.7	-2.6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.5
Consommation des ménages	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
Exportations	-0.1	-0.1	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-1.1					-0.1	-0.1	-0.1	-0.5
Importations	-0.1	-0.1	-0.3	-1.2	-0.3	-0.3	-0.5	-1.6	-0.5	-0.5	-0.6	-1.0					-0.2	-0.0	-0.1	0.6
Solde commercial net en valeur (% PIB)	-12	-12	-12	-12	-77	-77	-77	-78	-30	-30	-30	-30					1.3	1.3	1.3	1.3

Dans cet exercice, nous observons les écarts par rapport au scénario baseline. À la lecture de ces écarts, le secteur de l'industrie est relativement moins impacté que les secteurs de l'énergie et de la construction. Le secteur de l'énergie subit un choc de décarbonation (substitution partielle entre investissement carboné et décarboné). Le secteur de la construction subit un choc du fait des échanges interbranches (entre besoin d'infrastructure et le secteur de l'énergie).

Le secteur de la construction est très affecté par le choc. Ceci s'explique par la dynamique du capital. Le stock de capital diminue surtout dans le secteur de la construction (-2% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc), suivi par le secteur de l'énergie (-1% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc) car le secteur de l'énergie comptabilise aussi les investissements exogènes. Aussi, en cas de choc sur les investissements, ce secteur aura tendance à être davantage pénalisé dans la mesure où sa production et sa valeur ajoutée dépendent davantage des investissements (relativement à d'autres secteurs).

Ainsi, le coût d'usage du capital augmente davantage dans le secteur de la construction. Avec la frontière des prix, on devrait observer une forte baisse des salaires réels dans ce secteur où la part de la main d'œuvre non qualifiée est plus importante qu'ailleurs. Face à l'effet négatif sur la production plus fort dans les secteurs de la construction et de l'énergie, la valeur ajoutée réelle diminue davantage pour ces secteurs (de respectivement -1% pour la construction et -0.8% pour l'énergie, en écart au baseline et en moyenne sur la période post-choc).

Avec la frontière des prix, la hausse du prix réel de l'énergie (déflaté par le prix des consommations intermédiaires) a pour effet de diminuer le prix réel des consommations intermédiaires non énergétiques (effet de substitution).

La consommation d'énergie des entreprises baisse également par un effet volume du fait de la baisse de la consommation totale des ménages.

Les exportations et les importations en volume diminuent dans tous les secteurs, mais la baisse est plus forte dans le secteur de l'énergie. Le secteur de la construction est autarcique dans le modèle.

3. Scénario 2. Augmentation des investissements électriques bas carbone financés par un signal prix ou une taxe sur la consommation d'énergie pour les entreprises uniquement

3.1. Description du scénario

La littérature a souvent étudié l'existence ou non d'un double dividende, c'est-à-dire l'effet d'une hausse du prix du CO₂, compensée par exemple par une baisse du coût du travail des non qualifiés (proches du SMIC) si le décideur politique a pour objectif de ne pas réduire la compétitivité des entreprises (voir PARTIE I de la revue de littérature, section 2). Dans cette simulation, les revenus d'une hausse du prix de l'énergie liée à une taxe ou assimilé ne sont pas directement redistribués aux agents privés mais sont utilisés pour financer les investissements électriques bas carbone.

Bien que les entreprises seules soient censées porter la charge d'une hausse du prix de l'énergie dans ce scénario, in fine, sur le long terme ce sont les ménages qui payent le coût de la décarbonation (avec un délai, le temps que les entreprises répercutent les hausses des prix de l'énergie).

Financement sous forme d'un prix-signal ou une taxe sur la consommation d'énergie pour les entreprises uniquement

Dans ce scénario on finance la transition par une hausse du prix de l'énergie payé par les entreprises - en ne cherchant pas à corriger les effets redistributifs-.

Implémentation du choc dans le modèle :

- ***Augmentation de l'investissement et du prix de gros de l'énergie dans le temps***

L'implémentation du choc d'investissement électrique bas carbone exogène et de l'augmentation du prix de gros de l'énergie associée est identique au premier scénario. Ainsi, on augmente les investissements de manière exogène de 8.3 milliards d'euros par an et on augmente le prix de gros de 0.6% par an. On suppose donc que la hausse de la fiscalité du prix de l'énergie ne modifie pas le prix de gros.

- *Augmentation du signal-prix carbone (ou hausse d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les entreprises uniquement*

Dans ce second scénario, on finance les investissements exogènes bas carbone grâce à une augmentation du signal-prix carbone (taxe sur la consommation d'énergie) payé uniquement par les entreprises. Ce financement a lieu la troisième année du choc (année 2 du modèle), au même moment que le choc d'investissements électriques bas carbone exogènes.

La valeur de la demande d'énergie est de 207.24 milliards d'euros en 2017. Pour financer la trajectoire d'investissements, il faudrait que ce montant atteigne (ex ante) un montant de 215.55 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 8.31 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse ex ante du prix de l'énergie est de 4%, équivalente à 0.4 point de PIB par an en moyenne.

Le tableau **15** présente les résultats des principales variables macroéconomiques du second scénario. Les résultats sont donnés en déviation par rapport au scénario de référence (sans choc).

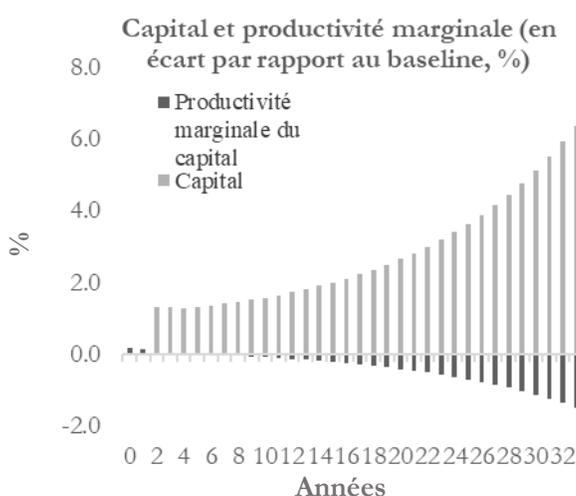
Tableau 15 : Résultats macroéconomiques du second scénario

Deuxième scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix-signal ou une taxe sur la consommation d'énergie pour les entreprises uniquement				
	Année			
Écart par rapport au scénario de base (%)	5	10	13	30
Tous les secteurs sont inclus dans le calcul agrégé				
Prix réels de la consommation (déflatés par le prix des importations)	-0.03	0.05	0.05	0.09
Augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises	0.04	0.04	0.04	0.04
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.10	-0.08	-0.08	-0.25
Demande de travail (nombre de travailleurs)	-0.11	-0.08	-0.09	-0.28
Investissements privés (hors transition énergétique)	-1.32	-1.67	-2.14	-5.06
Stock de capital privé	0.03	-0.08	-0.15	-1.12
Stock de capital total	-1	-0.9	-0.9	-1.1
Valeur ajoutée (PIB)	-0.14	-0.16	-0.20	-0.75
Énergie (consommée par les entreprises)	-5.07	-5.07	-5.09	-5.42
Consommations intermédiaires non énergétiques	-0.08	-0.10	-0.14	-0.79
Consommations intermédiaires totales	-0.63	-0.65	-0.69	-1.30
Production	-0.38	-0.40	-0.44	-1.03
Consommation des ménages	-0.10	-0.08	-0.08	-0.25
Exportations	-0.49	-0.50	-0.54	-1.09
Importations	-0.61	-0.59	-0.63	-1.37
Solde commercial net en valeur (en % PIB) – pas en écart au baseline	-8.69	-8.67	-8.66	-8.48
Revenu national net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-1.58	-1.52	-1.51	-1.56
Revenu disponible net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-1.38	-1.33	-1.33	-1.37
Richesse réelle nette (déflatée par le prix à la consommation)	0.03	0.03	0.06	-0.12
Taux d'épargne (%)	-1.19	-1.17	-1.16	-1.04
Consommation d'énergie des ménages	-0.10	-0.08	-0.08	-0.25
Dette publique en % du PIB	1.1	1.2	1.5	8.7
Déficit public en % du PIB	0.0	0.1	0.2	0.6

3.2. Mécanismes de transmission du choc dans le deuxième scénario

Comme dans le premier scénario, les investissements hors transition énergétique diminuent continuellement dans la mesure où la trajectoire des investissements électriques bas carbone est à la hausse sur la période.

Le stock de capital privé diminue de -0.4% en moyenne sur la période post-choc, ce qui correspond à une augmentation de la productivité marginale du capital de 2.8% en moyenne sur la période (en écart par rapport au scénario baseline). La productivité marginale du capital augmente davantage dès le choc d'investissement (l'année 2).



Sources : Résultats du modèle pour le deuxième scénario.

Graphique 20: Stock de capital et sa productivité marginale dans le deuxième scénario

La valeur ajoutée diminue également. La demande extérieure baisse aussi (importations) face à la baisse des revenus des entreprises (baisse des consommations intermédiaires avec la baisse de la demande d'énergie) et des ménages (baisse de leur consommation). Ces trois facteurs, qu'il s'agisse d'un effet prix ou d'un effet volume, expliquent la dynamique du capital qui diminue dans le temps par rapport au baseline.

Baisse de la demande d'énergie des entreprises plus élevée que dans le premier scénario, sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie

Sur toute la période *post-choc*, on observe une augmentation des prix de l'énergie pour les entreprises, qui est associée au financement des investissements bas carbone exogènes. Cette augmentation des

prix de l'énergie s'explique dans une moindre mesure par la hausse des prix de gros (appliquée aux entreprises et aux ménages) associée à la trajectoire des investissements bas carbone dans le secteur électrique. Cette hausse des prix de l'énergie diminue la demande. Cette baisse est plus forte que dans le premier scénario.

On s'attend à ce que la hausse des prix de l'énergie suscite des substitutions : remplacement de l'énergie par des consommations intermédiaires non énergétiques. Or, la hausse du prix de l'énergie diminue la demande d'énergie des entreprises et donc leur volume de consommations intermédiaires. Avec la frontière des prix entre le prix de l'énergie et le prix réel des consommations intermédiaires, la hausse des prix de l'énergie se traduit par une baisse du prix réel des consommations intermédiaires non énergétiques. Cette baisse du prix des consommations intermédiaires non énergétiques devrait, toutes choses égales par ailleurs, augmenter la demande des consommations intermédiaires non énergétiques par un effet de substitution. Or, l'effet volume l'emporte.

Par rapport au compte central dans lequel la production est à l'équilibre, une hausse du prix de l'énergie augmente les coûts de production ce qui se traduit par une baisse de la production. Cet effet réduit les consommations intermédiaires non énergétiques et totales des entreprises (effet volume dominant). La valeur ajoutée baisse également accompagnant la réduction des consommations intermédiaires, du fait de la très faible élasticité de substitution entre la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires.

Baisse des consommations intermédiaires (plus élevée que dans le premier scénario)

La baisse de la demande d'énergie des entreprises diminue le volume de consommations intermédiaires énergétiques. Les autres consommations intermédiaires non énergétiques baissent sous l'effet récessif dû à la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises. Bien qu'il y ait une baisse des prix réels qui favoriserait une substitution entre énergie et autres consommations intermédiaires, l'effet volume l'emporte. La hausse du prix de l'énergie provoque une baisse des consommations intermédiaires en volume via une baisse des volumes de biens et de services demandés.

La valeur ajoutée progresse moins dans le premier scénario

Les entreprises diminuent leur valeur ajoutée, leur demande de travail et de stock de capital. Plus précisément la demande de travail diminue de -0.11% à court terme par rapport au baseline, de -0.08% à moyen terme et de -0.28% à long terme. Le stock de capital privé passe de 0.03% à court terme, à -0.08% à moyen terme et à -1.12% à long terme, en écart au baseline. Enfin, la valeur ajoutée passe de -0.14% à court terme, de -0.16% à moyen terme et de -0.75% à long terme, en écart au baseline.

Comme dans le premier scénario, le coût d'usage du capital augmente (via une hausse du prix réel de l'investissement pour réduire le stock de capital en excès). Il s'en suit une baisse des salaires réels via la frontière des prix. La baisse des salaires réels (22% du prix de production) - malgré la hausse des prix réels des consommations intermédiaires totales (50% du prix de production) - diminue le prix de production. La baisse de la valeur ajoutée en valeur réelle et la baisse des consommations intermédiaires en volume l'emportent sur les effets de la hausse des prix des consommations intermédiaires.

Tableau 16 : Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 2 par rapport au compte central

		Année				
		5	10	13	30	
Contribution du coût d'usage du capital (prix réel de l'investissement)		1	0.31	0.30	0.31	0.35
Contribution du Stock de capital total (privé + public)		2	-0.40	-0.37	-0.38	-0.47
Contribution du salaire réel du travail		3	0.02	-0.04	-0.08	-0.47
Contribution de la demande d'emploi		4	-0.06	-0.05	-0.05	-0.16
Ecart de la valeur ajoutée en % par rapport au compte central		1+2+3+4=5	-0.14	-0.16	-0.20	-0.75

Production

Face à la baisse de la valeur ajoutée et des consommations intermédiaires, la production diminue (plus fortement que la valeur ajoutée sous l'effet de la forte baisse de la demande d'énergie, surtout dans ce scénario) de -0.38% à court terme, de -0.40% à moyen terme et de -1.0 % à long terme, en écart au baseline. En raison de la baisse de leurs revenus et de leur richesse, les ménages diminuent leur consommation et leur offre de travail.

Consommation des ménages

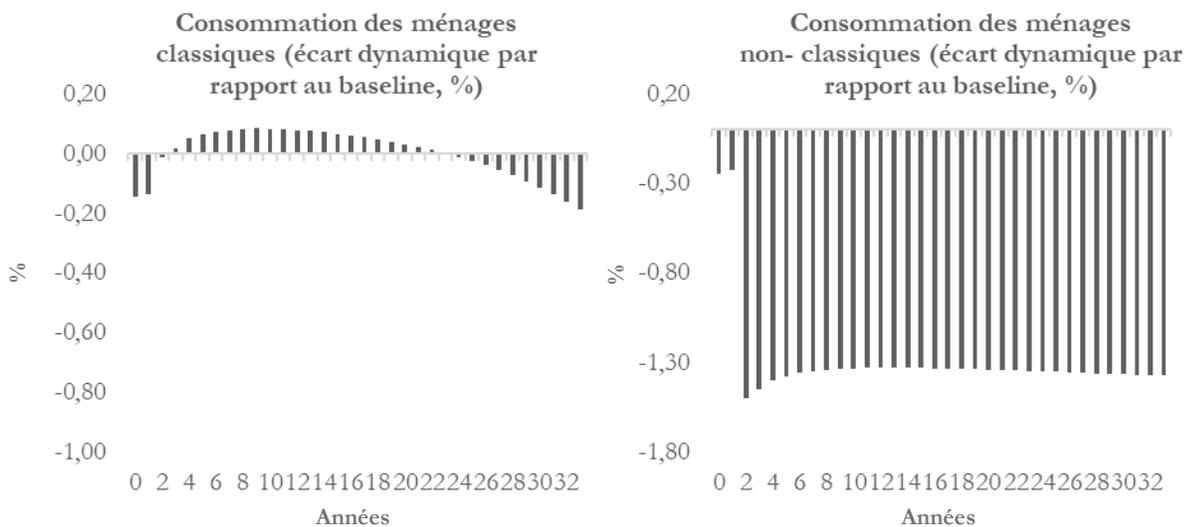
Le revenu net des ménages diminue sur toute la période mais davantage à partir de l'année du choc (année 2). On passe de -0.2% en écart dynamique au baseline l'année 0, à -1.4% en écart dynamique au baseline l'année 5, -1.3% en écart dynamique au baseline l'année 10 et -1.4% à long terme (année 30).

Face à la forte baisse des revenus des ménages dans ce scénario, la consommation diminue plus fortement. Ainsi, les actifs (qui dépendent de la différence entre les actifs passés et la valeur de l'épargne) restent faiblement positifs à court terme (0.03% en écart au baseline l'année 5) et à moyen terme (0.03% en écart au baseline l'année 5) puis entrent en territoire négatif dès la 23ème année pour atteindre -0.12% en écart au baseline l'année 30.

Le revenu disponible réel net des ménages (revenu disponible net déflaté par le prix à la consommation) et la richesse réelle nette des ménages (richesse nette déflatée par le prix à la consommation) déterminent la consommation des ménages agrégée. Elle dépend davantage de la richesse réelle nette dans la mesure où la part des ménages sans contraintes de liquidité (non-pauvres, i.e ménages classiques) est plus importante.

L'augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises entraîne une baisse des salaires, des revenus du capital des ménages classiques (qui ont un comportement de cycle de vie) et du revenu des ménages non-classiques (qui ont des contraintes de liquidité). La baisse de la consommation est plus forte pour les ménages les plus vulnérables (les ménages non-classiques qui ont des contraintes de liquidité) comme le montre le graphique ci-dessous.

Ainsi, pour les ménages classiques, on constate une baisse en moyenne sur la période, mais elle n'intervient que à long terme dans la mesure où le montant des actifs est suffisamment important pour leur permettre de faire face à ce choc.



Sources : Résultats du modèle pour le deuxième scénario.

Graphique 21: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline) dans le second scénario

Face à la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises et son effet récessif (baisse de la demande de travail et baisse des salaires), la consommation et l'offre de travail baissent -par un effet revenu-. Les exportations baissent aussi face à l'effet négatif sur l'activité économique. Au final, la demande globale baisse. On note que cette baisse est plus forte, en comparaison au premier scénario car l'effet récessif est plus élevé dans le cas d'une hausse du prix de l'énergie -comparé à une hausse de la dette publique partiellement remboursée sous forme de hausse de l'impôt sur le revenu-.

Tout comme dans le premier scénario, la demande de biens des ménages (consommation) diminue moins que l'offre de biens (production), ce qui augmente les prix réels à la consommation - le taux de change interne réel (ratio entre prix à la consommation et prix des importations) augmente. Cette augmentation des prix réels à la consommation pour les ménages s'explique aussi (dans une moindre mesure) par la hausse des prix de gros de l'énergie qui accroît le prix de l'énergie payé par les ménages.

Cet effet négatif est accentué par l'augmentation des prix réels à la consommation sur la période post-choc qui diminue davantage le revenu disponible réel net des ménages sur la période post-choc et leurs actifs réels nets à long terme. Si les actifs réels nets des ménages sont négatifs à long terme, le revenu disponible net diminue sur toute la période et la variation négative est plus forte. En effet, dans le cas des actifs, l'effet est positif à moyen terme dans la mesure où la valeur de la consommation diminue.

Ainsi, la consommation diminue sur la période.

Avec la baisse du revenu des ménages, le taux d'épargne diminue (de respectivement -0.5% l'année à (par anticipation du choc à venir), de -1.2% à court et moyen terme, et de -1% à long terme).

L'offre de travail des ménages et la demande de travail des entreprises progressent moins que dans le premier scénario

Les salaires réels baissent ce qui pousse à demander davantage d'emploi. Mais dans la mesure où la valeur ajoutée diminue, l'effet de la valeur ajoutée l'emporte sur l'effet prix (baisse des salaires réels, déflatés par le prix de la valeur ajoutée).

La baisse de la consommation des ménages réduit l'offre de travail des ménages (effet revenu). La baisse des salaires n'a pas d'impact sur l'offre de travail des ménages dans la mesure où l'élasticité du travail au salaire est nulle dans le modèle -ce qui est conforme aux faits empiriques-.

La consommation diminue sous l'effet de la hausse des prix réels à la consommation, ce qui réduit le pouvoir d'achat du revenu de l'actif. Cette hausse des prix réels à la consommation est surtout tirée

par la hausse des prix de l'énergie pour les entreprises et à moindre mesure, par la hausse des prix de gros de l'énergie associée à la trajectoire d'investissement. En effet, la demande de biens des ménages (consommation) est moins élastique que l'offre de biens (production) face au choc de hausse de prix de l'énergie pour les entreprises.

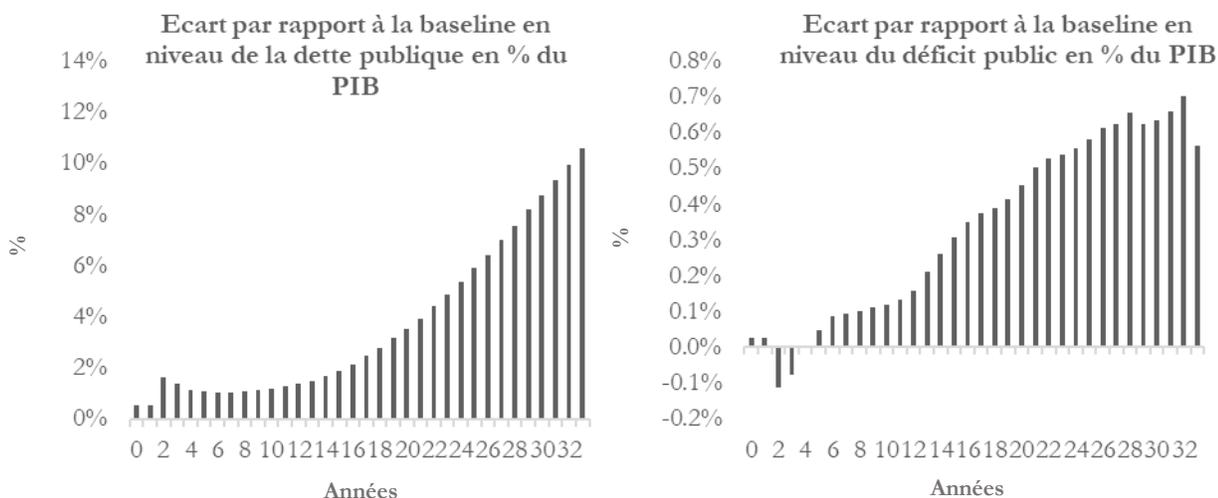
Les salaires réels diminuent sous l'effet de la baisse de la demande de travail des entreprises et de la baisse de l'offre de travail des ménages.

Le solde commercial se creuse.

La baisse des importations en volume (faute de demande) est plus forte que la baisse des exportations en volume (dû à l'effet récessif sur l'activité économique). Toutefois, l'effet prix l'emporte et le solde commercial en valeur en % du PIB diminue sur la période, de -8.7% à court et moyen terme et de -8.5% à long terme, en écart au baseline.

Le mécanisme est identique au premier scénario. La dégradation des termes de l'échange, couplé à l'effet revenu, entraînent une baisse des exportations et des importations. La baisse des importations est aussi plus forte et la baisse des prix domestiques (par rapport aux prix étrangers constants) entraîne une baisse du solde commercial net en valeur (en % du PIB).

La dette et le déficit public augmentent (plus que dans le premier scénario, en moyenne sur la période)

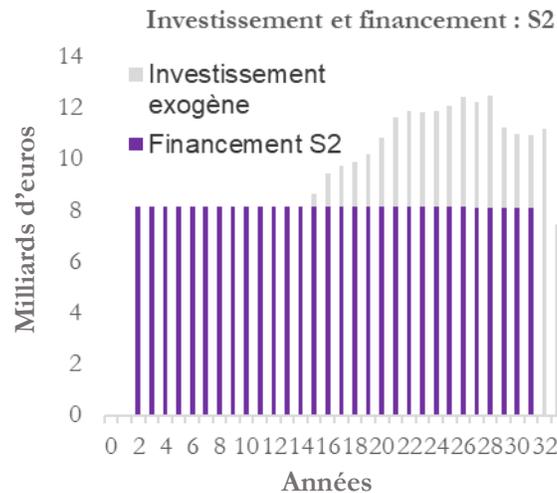


Sources : Résultats du modèle pour le deuxième scénario.

Graphique 22: Dette publique et déficit en % du PIB dans le premier scénario en écart au baseline.

À la fin de la période, presque l'intégralité du montant des investissements décarbonés est payée par la hausse du prix de l'énergie (92% du montant total, soit 244 milliards d'euros). Toutefois, la dette publique et le déficit en pourcentage du PIB augmentent.

L'explication tient à l'effet négatif sur l'activité économique qui augmente le déficit et la dette publique.



Sources : Résultats du modèle pour le deuxième scénario.

Graphique 23: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse du prix de l'énergie pour les entreprises dans le second scénario)

Le graphique 23 montre les montants mobilisés (grâce à la hausse du prix de l'énergie) chaque année pour financer les investissements bas carbone. Sur le même graphique, est représenté le montant d'investissements électriques bas carbone.

Dans ce second scénario, le financement des investissements commence en même temps que le choc d'investissement (année 2 du modèle) et est calibré en amont du choc pour rembourser *ex ante* l'équivalent du montant moyen annuel d'investissement électrique bas carbone sur la période (8.31 milliards d'euros). À échéance de la période observée, 92% du montant total des investissements est remboursé (244 milliards sur les 266 milliards d'investissements).

Cette plus forte hausse de la dette publique (en % du PIB) au moment du choc de hausse du prix de l'énergie (et du choc d'investissement) traduit deux effets : d'un côté la baisse de l'activité et de la masse salariale qui érode la base fiscale, et la hausse du prix de l'énergie qui augmente les recettes fiscales.

3.3. Analyse sectorielle du scénario 2

La dynamique des prix réels et des variables en volume analysée précédemment au niveau agrégé se retrouve pour la plupart des secteurs. Dans ce scénario, on constate que la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises impacte très fortement le secteur énergétique, dans la mesure où les variables sont toujours largement plus faibles pour ce secteur (à la lecture du tableau). Par exemple, les salaires réels sont beaucoup plus faibles dans le secteur de l'énergie relativement aux autres secteurs. Concernant les variables en volume, le constat est identique. L'investissement, le stock de capital, la demande de travail, la valeur ajoutée et la production diminuent bien plus fortement pour le secteur énergétique. La demande d'énergie diminue plus fortement dans le secteur de l'énergie avec une baisse de -6 % en moyenne sur la période post-choc et en écart au baseline, contre -4% pour les autres secteurs en moyenne.

L'effet négatif sur la valeur ajoutée et la production est surtout élevé dans le secteur de l'énergie dans la mesure où, le choc de hausse du prix de l'énergie couplé à la hausse des prix de gros de l'énergie et l'effet d'éviction des investissements décarbonés sur les autres investissements énergétiques endogènes (carbonés) concerne directement ce secteur. En effet, l'investissement endogène diminue surtout dans le secteur de l'énergie (-39% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc). Le stock de capital diminue aussi davantage dans le secteur de l'énergie (-8% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc, contre -1% pour les autres secteurs en moyenne) malgré la hausse des investissements exogènes.

L'effet négatif de la hausse du prix de l'énergie pour financer ses investissements entraîne une diminution de la valeur ajoutée réelle plus forte pour ce secteur (de respectivement -5% pour l'énergie, en écart au baseline et en moyenne sur la période post-choc, contre -1% pour les autres secteurs en moyenne).

Tout comme dans le premier scénario, face à la forte baisse de la demande d'énergie, le prix réel de l'énergie (déflaté par le prix des consommations intermédiaires) est plus faible dans le secteur de l'énergie pour compenser l'effet volume (face à la hausse du prix de gros de l'énergie qui pénalise plus ce secteur) et l'effet récessif est plus fort dans ce secteur (avec l'effet d'éviction et la baisse de la demande d'énergie).

La répartition sectorielle de la consommation est constante donc la consommation diminue dans les mêmes proportions pour tous les secteurs, bien que les prix réels à la consommation augmentent davantage dans le secteur de l'énergie.

Tableau 17 : Ensemble des variables exprimées écart dynamique par rapport au baseline (second scénario)

Deuxième scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix-signal ou une taxe sur la consommation d'électricité pour les entreprises uniquement

Écart par rapport au scénario de base (%)

Secteurs	Agriculture			Industrie hors énergie			Energie			Construction			Services			
	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30	
Prix nominal de la consommation	1.3	1.3	0.6	0.2	0.2	-0.6	3.4	3.5	3.3	-0.6	-0.8	-4.5	-0.8	-0.6	0.5	
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	
Demande de travail (nombre de travailleurs)	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	
Investissements privés (hors transition énergétique)	-0.4	-0.6	-1.8	-0.8	-0.9	-2.6	-22.3	-27.2	-49.9	-1	-1.7	-8.1	-0.1	-0.2	-2.6	
Stock de capital privé	-0.4	-0.4	-0.9	-0.8	-0.8	-1.9	-8	-8.1	-8.4	-1	-1.2	-5.8	0.3	0.2	-0.8	
Stock de capital total	-0.8	-0.8	-1	-3	-3	-7	-22	-22	-22	-2.5	-3.5	-4	-1	-1	-0.5	
Valeur ajoutée (PIB)	-0.3	-0.3	-0.8	-0.4	-0.4	-0.9	-4.8	-4.8	-5	-0.4	-0.5	-2.4	0.1	0	-0.5	
Énergie (consommée par les entreprises)	-3.3	-3.3	-4	-3.7	-3.7	-4.5	-6.5	-6.5	-6.8	-4.1	-4.2	-7	-3.7	-3.7	-3.6	
Consommations intermédiaires non énergétiques	0	0	-0.5	-0.2	-0.2	-0.9	-2.8	-2.8	-3.2	-0.4	-0.5	-3	0.2	0.1	-0.3	
Consommations intermédiaires totales	-0.3	-0.3	-0.8	-0.5	-0.5	-1.2	5	-4	-5.4	-5.7	-0.6	-0.7	-3.1	-0.1	-0.1	-0.5
Production	-0.3	-0.3	-0.8	-0.4	-0.5	-1.1	-5.2	-5.2	-5.5	-0.5	-0.6	-2.8	0	0	-0.5	
Consommation des ménages	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	
Exportations	-0.3	-0.3	-0.8	-0.4	-0.5	-1.1	-5.2	-5.2	-5.5				0	0	-0.5	
Importations	0.7	0.8	-0.3	-0.2	-0.3	-1.6	-2.5	-2.5	-3				-0.8	-0.7	0	
Solde commercial net en valeur (% PIB)	-12	-12	-12	-78	-78	-79	-33	-33	-33				-1.3	-1.3	-1.3	

4. Scénario 3 : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie).

4.1. Description du scénario

Fiscalité de l'énergie entre les ménages et les entreprises

En 2017, la totalité des taxes environnementales représente 52.9 milliards d'euros, dont 44 milliards de taxes sur l'énergie, 5.8 milliards de taxes sur les transports et 3.1 milliards de taxes sur la pollution et les ressources. À l'aide des données statistiques d'Eurostat, de l'INSEE et du gouvernement, on constate que 55% de cette fiscalité est payée par les ménages (24.3 milliards d'euros en 2017) et les 44% restant sont payés par les entreprises. Toutefois, lorsque l'on regarde la décomposition des recettes des écotaxes par type de taxes, on constate que 67% du montant des recettes concerne les recettes de la TICPE, 18% concerne la CSPE, 5% concerne l'impôt sur l'énergie électrique (TCFE) et les 10% restant concernent les autres taxes (TICGN, TICC, etc).

Financement sous forme d'un prix-signal ou une taxe sur la consommation d'énergie pour les entreprises uniquement

Implémentation du choc dans le modèle :

- *Augmentation de l'investissement et du prix de gros de l'énergie dans le temps*

L'implémentation du choc d'investissement électrique bas carbone exogène et l'augmentation du prix de gros de l'énergie associée est identique au premier scénario. Ainsi, on augmente les investissements de manière exogène de 8.3 milliards d'euros par an et on augmente le prix de gros de 0.6% par an. On suppose donc que la hausse de la fiscalité du prix de l'énergie ne modifie pas le prix de gros.

- ***Augmentation du signal-prix carbone (ou d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les entreprises***

Le choc de hausse des prix de l'énergie pour les entreprises est implémenté de la même manière que dans le deuxième scénario et à la même période. Ce financement a lieu la troisième année du choc (année 2 du modèle), tout comme le choc d'investissement électrique bas carbone exogène. Toutefois, l'ampleur du choc est différente dans la mesure où dans ce scénario, *les entreprises ne financent que 45% du montant total (les 55% restant étant financés par les ménages)*.

La valeur de la demande d'énergie des entreprises (prix de l'énergie multiplié par son prix) est de 207.24 milliards d'euros en 2017. Pour financer la trajectoire d'investissements, il faudrait que ce montant atteigne (ex ante) un montant de 210.98 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 3.74 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse ex ante du prix de l'énergie est de 4%, équivalente à 0.2 point de PIB par an en moyenne. Dans notre modèle, cela correspond à une hausse de $pe_{b,t}$, le prix de l'énergie payé par les entreprises dans chaque branche (Partie II-Chapitre 2 – 3-).

Augmentation de la taxe carbone (ou d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les ménages

Ce financement a lieu la troisième année du choc (année 2 du modèle), tout comme le choc d'investissement électrique bas carbone exogène. Dans ce scénario, les ménages financent 55% du montant total. La valeur de la consommation d'énergie des ménages (prix de l'énergie multiplié par son prix) est de 99.01 milliards d'euros en 2017. Pour financer la trajectoire d'investissements, il faudrait que ce montant atteigne (ex ante) un montant de 103.58 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 4.57 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse *ex ante* du prix de l'énergie est de 4.6%, équivalente à 0.2 point de PIB par an en moyenne. Dans notre modèle, le prix à la consommation, est égal au prix des ressources (Partie II-Chapitre 2 – 2) auquel on ajoute la hausse de la taxe carbone (et la hausse du prix de gros associé à la hausse des investissements bas carbone).

Tableau 18 : Résultats macroéconomiques du troisième scénario

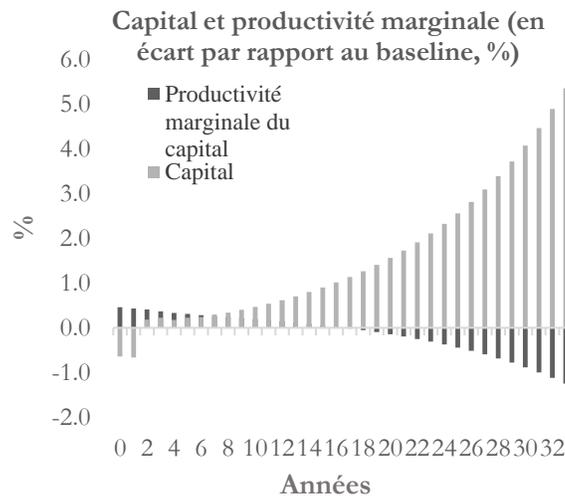
Troisième scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie).

Écart par rapport au scénario de base (%)	Année			
	5	10	13	30
Tous les secteurs sont inclus dans le calcul agrégé				
Prix réels de la consommation (déflatés par le prix des importations)	-0.05	0.09	0.14	0.29
Augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises	0.02	0.02	0.02	0.02
Augmentation du prix de l'énergie pour les ménages	0.05	0.05	0.05	0.05
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.22	-0.18	-0.18	-0.36
Demande de travail (nombre de travailleurs)	-0.24	-0.20	-0.20	-0.39
Investissements privés (hors transition énergétique)	-1.00	-1.34	-1.81	-4.78
Stock de capital privé	0.31	0.20	-0.12	-0.88
Stock de capital total	-0.8	-0.7	-0.8	-0.1
Valeur ajoutée (PIB)	-0.07	-0.09	-0.13	-0.70
Énergie (consommée par les entreprises)	-2.76	-2.75	-2.77	-3.10
Consommations intermédiaires non énergétiques	-0.06	-0.08	-0.12	-0.78
Consommations intermédiaires totales	-0.36	-0.37	-0.41	-1.03
Production	-0.22	-0.23	-0.27	-0.87
Consommation des ménages	-0.22	-0.18	-0.18	-0.36
Exportations	-0.30	-0.31	-0.34	-0.90
Importations	-0.59	-0.54	-0.59	-1.34
Solde commercial net en valeur (% PIB)	-8.70	-8.68	-8.67	-8.49
Revenu national net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-1.50	-1.43	-1.42	-1.48
Revenu disponible net réel (déflaté par le prix à la consommation)	-1.34	-1.28	-1.28	-1.48
Richesse réelle nette (déflatée par le prix à la consommation)	-0.09	-0.09	-0.06	-0.24
Taux d'épargne	-1.04	-1.02	-1.01	-0.89
Consommation d'énergie des ménages	-0.22	-0.18	-0.18	-0.36
Dette publique en % du PIB	0.5	0.0	-0.1	5.1
Déficit public en % du PIB	-0.1	0.0	0.1	0.5

Le tableau 18 présente les résultats des principales variables macroéconomiques du troisième scénario. Les résultats sont donnés en déviation par rapport au scénario de référence (sans choc).

4.2. Mécanismes de transmission du choc dans le troisième scénario

Comme dans les précédents scénarios, les investissements hors transition énergétique diminuent continuellement dans la mesure où la trajectoire des investissements électriques bas carbone augmente sur la période. Le stock de capital privé diminue de -0.2% en moyenne sur la période post-choc, ce qui correspond à une augmentation de la productivité marginale du capital de 1.7% en moyenne sur la période (en écart par rapport au scénario baseline). La productivité marginale du capital augmente davantage dès le choc d'investissement (l'année 2).



Sources : Résultats du modèle pour le troisième scénario.

Graphique 24: Stock de capital et sa productivité marginale dans le premier scénario

Par rapport au baseline, la valeur ajoutée diminue. La demande extérieure baisse aussi (importations) face à la baisse des revenus des entreprises (baisse des consommations intermédiaires avec une baisse de la demande d'énergie) et des ménages (baisse de leur consommation).

Toutefois l'effet récessif pour les entreprises est moins important que dans le second scénario, ce qui entraîne une moindre hausse du prix du capital et donc une moindre diminution du volume de capital.

Baisse de la demande d'énergie des entreprises (moins que dans le second scénario) sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie

Comme dans le second scénario, sur toute la période *post-choc*, on observe une augmentation des prix de l'énergie pour les entreprises, qui est associée au financement des investissements bas carbone exogènes (et à moindre mesure, par la hausse des prix de gros). Cette baisse est plus forte que dans le premier scénario mais moins forte que dans le second (où la hausse du prix de l'énergie pour des entreprises appliquée est plus importante).

Tout comme dans le deuxième scénario, la hausse du prix de l'énergie augmente les coûts de production ce qui se traduit par une baisse de la production. Cet effet réduit les consommations intermédiaires non énergétiques et totales des entreprises (effet volume dominant), tout comme la valeur ajoutée.

Baisse des consommations intermédiaires (moins que dans le second scénario)

Comme dans le deuxième scénario, la baisse de la demande d'énergie des entreprises diminue le volume de consommations intermédiaires énergétiques et des autres consommations intermédiaires non énergétiques.

La valeur ajoutée baisse sur la période par rapport au scénario de référence

Les entreprises diminuent leur valeur ajoutée, leur demande de travail et de stock de capital. La valeur ajoutée baisse de -0.07% à court terme, de -0.09% à moyen terme et de -0.70% à long terme, en écart au baseline.

Comme dans les scénarios précédents, le coût d'usage du capital augmente (via une hausse du prix réel de l'investissement pour réduire le stock de capital en excès). Il s'ensuit une baisse des salaires réels via la frontière des prix. La baisse des salaires réels diminue le prix de production. La baisse de la valeur ajoutée en valeur réelle et la baisse des consommations intermédiaires en volume l'emportent sur les effets de la hausse des prix des consommations intermédiaires.

Tableau 19: Contributions des prix et des facteurs de production à l'écart de la valeur ajoutée du scénario 3 par rapport au compte central

		Année				
		5	10	13	30	
Contribution du coût d'usage du capital (prix réel de l'investissement)		1	0.20	0.19	0.19	0.24
Contribution du Stock de capital total (privé + public)		2	-0.34	-0.30	-0.31	-0.42
Contribution du salaire réel du travail		3	0.21	0.14	0.11	-0.30
Contribution de la demande d'emploi		4	-0.14	-0.12	-0.12	-0.23
Ecart de la valeur ajoutée en % par rapport au compte central		1+2+3+4=5	-0.07	-0.09	-0.13	-0.70

Production

Face à la baisse de la valeur ajoutée et des consommations intermédiaires, la production diminue (plus fortement que la valeur ajoutée sous l'effet de la forte baisse de la demande d'énergie, surtout dans ce scénario) de -0.2% à court terme, de -0.2% à moyen terme et de -0.9% à long terme, en écart au baseline. Du fait de la baisse de leurs revenus et de leur richesse, les ménages diminuent leur consommation et leur offre de travail.

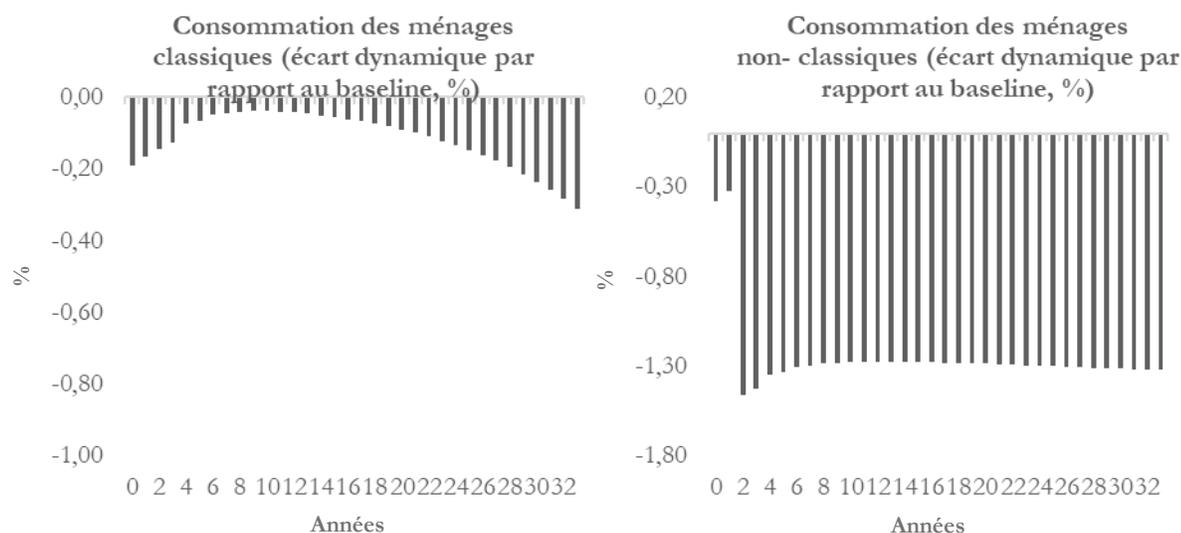
Consommation des ménages

La hausse de la taxe carbone pour les ménages (ou de la taxe sur la consommation d'énergie) augmente le prix à la consommation des ménages et diminue davantage leur consommation. Le revenu net des ménages diminue sur toute la période mais davantage à partir de l'année du choc (diminution de -1.3% à court terme, à moyen terme et de -1.5% à long terme en écart dynamique au baseline).

Face à la forte baisse des revenus des ménages dans ce scénario, la consommation diminue plus fortement. Ainsi, les actifs réels diminuent à court terme (de -0.09% en écart au baseline l'année 5), à moyen terme (de -0.06% en écart au baseline l'année 10) et à long terme (de -0.24% en écart au baseline l'année 30).

Tout comme dans les scénarios précédents, le revenu disponible réel net des ménages et la richesse réelle nette des ménages déterminent la consommation agrégée des ménages. La baisse de la

consommation est plus forte pour les ménages les plus vulnérables (les ménages non classiques qui ont des contraintes de liquidité) comme le montre le graphique ci-dessous. Pour les ménages classiques, on constate une baisse en moyenne sur la période, mais elle n'intervient qu'à long terme dans la mesure où le montant des actifs est suffisamment important pour leur permettre de faire face à ce choc.



Sources : Résultats du modèle pour le troisième scénario.

Graphique 25: Consommation des ménages classiques et non-classiques (en écart au scénario baseline) dans le troisième scénario

Comme dans le scénario précédent, la consommation et l'offre de travail baissent -par un effet revenu-. Les exportations baissent aussi face à l'effet négatif sur l'activité économique. Comme dans les autres scénarios, les prix réels à la consommation augmentent. Toutefois, dans ce scénario, l'autre explication de la hausse du prix réel à la consommation est mécanique et tient à la hausse de la taxe carbone appliquée aux ménages dès l'année 2 du modèle.

Cet effet négatif est accentué par l'augmentation des prix réels à la consommation sur la période post-choc qui diminue davantage le revenu disponible réel net des ménages sur la période post-choc et leurs actifs réels nets à long terme. Si les actifs réels nets des ménages sont négatifs à long terme, le revenu disponible net diminue sur toute la période et la variation négative est plus forte. En effet, dans le cas des actifs, l'effet est positif à moyen terme dans la mesure où la valeur de la consommation diminue. Ainsi, la consommation diminue sur la période.

Avec la baisse du revenu des ménages, le taux d'épargne diminue respectivement de -1.07% l'année du choc (par anticipation du choc à venir), de -1% à court et moyen terme, et de -0.9% à long terme.

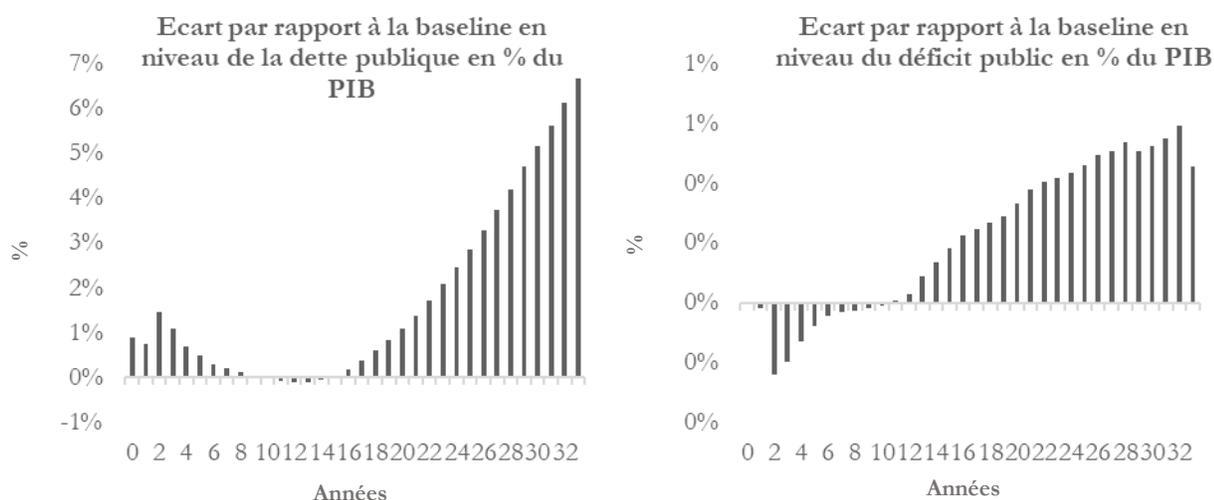
L'offre de travail des ménages et la demande de travail des entreprises diminuent (davantage que dans le premier scénario)

Tout comme dans le scénario précédent, l'effet de la réduction de la valeur ajoutée l'emporte sur l'effet prix (baisse des salaires réels, déflatés par le prix de la valeur ajoutée). La baisse de la consommation des ménages réduit l'offre de travail des ménages (effet revenu).

La consommation diminue sous l'effet de la hausse des prix réels à la consommation - réduction du pouvoir d'achat du revenu de l'actif -. Cette hausse des prix réels à la consommation est surtout tirée par la hausse des prix de l'énergie pour les ménages -surtout avec l'implantation de la taxe carbone pour les ménages-. Elle est aussi liée (dans une moindre mesure) à la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises, induite par la hausse des prix de gros de l'énergie associée à la trajectoire d'investissement. En effet, la demande de biens des ménages (consommation) est moins élastique que l'offre de biens (production) face au choc de la hausse des prix de l'énergie pour les entreprises.

Les salaires réels diminuent sous l'effet de la baisse de la demande de travail des entreprises et de la baisse de l'offre de travail des ménages. Le choc sur la demande de travail des entreprises est moins fort que dans les précédents scénarios, ce qui entraîne une baisse des salaires réels (pour les entreprises, soit déflaté par le prix de la valeur ajoutée) uniquement à long terme.

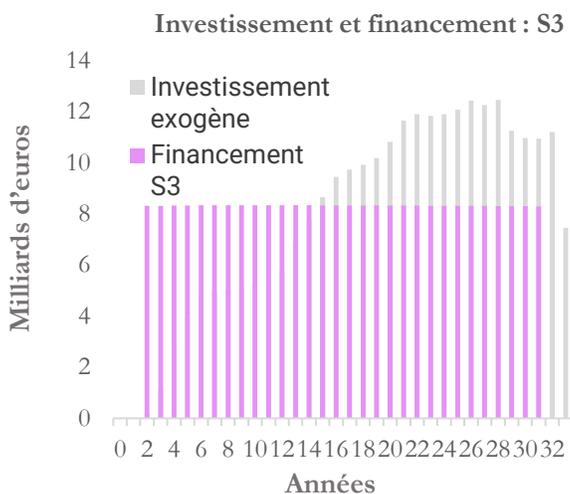
La dette et le déficit public augmentent



Sources : Résultats du modèle pour le troisième scénario.

Graphique 26: Dette publique et déficit en % du PIB dans le troisième scénario en écart au baseline.

À la fin de la période, presque l'intégralité du montant des investissements décarbonés est répercutée et financée par la hausse du prix de l'énergie (94% du montant total, soit 249.5 milliards d'euros). Toutefois, la dette publique en pourcentage du PIB augmente sur la période et le déficit également à moyen terme (en écart dynamique par rapport au baseline). L'explication tient à l'effet négatif sur l'activité économique qui augmente le déficit et la dette en part de PIB.



Sources : Résultats du modèle pour le troisième scénario.

Graphique 27: Montant des investissements et des recettes issues du mode de financement (hausse du prix de l'énergie pour les entreprises dans le second scénario)

Le graphique 27 montre les montants mobilisés (grâce à la hausse du prix de l'énergie) chaque année pour financer les investissements bas carbone. Sur le même graphique, sont représenté les montants d'investissements électriques bas carbone.

Cette plus forte hausse de la dette publique (en % du PIB) au moment du choc de la hausse du prix de l'énergie (et du choc d'investissement) traduit un effet de compensation entre d'un côté la baisse de l'activité et de la masse salariale qui érode la base fiscale, et de l'autre, la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises et les ménages qui augmente les recettes fiscales.

4.3. Analyse sectorielle du scénario 3

Tableau 20: Ensemble des variables exprimées écart dynamique par rapport au baseline (troisième scénario)

Troisième scénario : Augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie).

Secteurs	Agriculture			Industrie hors énergie			Énergie			Construction			Services		
	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30	5	10	30
Prix réel de la consommation (déflaté par le prix des importations)	0.5	0.5	-0.2	0	0	-0.7	6.5	6.6	6.4	0	-0.2	-4.1	-0.9	-0.8	0.3
Offre de travail (nombre de travailleurs)	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4
Demande de travail	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4
Investissements privés (hors transition énergétique)	-0.2	-0.4	-1.6	-0.3	-0.5	-2.2	-18.9	-23.9	-46.6	-0.1	-0.9	-7.6	0	0	-2.5
Stock de capital privé	-0.3	-0.3	-0.8	-0.4	-0.4	-1.5	-4.3	-4.3	-4.7	-0.2	-0.4	-5.1	0.5	0.4	-0.7
Stock de capital total	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	-1.9	-0.6	-0.4	-0.4	-1	-0.4	-0.5	-1
Valeur ajoutée (PIB)	-0.3	-0.3	-0.7	-0.3	-0.3	-0.8	-2.6	-2.6	-0.8	-0.2	-0.3	-2.2	0	0	-0.5
Énergie (consommée par les entreprises)	-1.8	-1.8	-2.5	-2	-2	-2.8	-3.5	-3.5	-3.8	-2	-2.1	-5	-2.1	-2	-2
Consommations intermédiaires non énergétiques	-0.1	-0.1	-0.6	-0.2	-0.2	-0.9	-1.5	-1.5	-1.9	-0.1	-0.2	-2.7	0.1	0.1	-0.4
Consommations intermédiaires totales	-0.3	-0.2	-0.8	-0.3	-0.3	-1.0	-2.9	-2.9	-3.2	-0.2	-0.3	-2.8	-0.1	-0.1	-0.5
Production	-0.3	-0.2	-0.7	-0.3	-0.3	-1	-2.8	-2.8	-3.1	-0.2	-0.3	-2.6	0	0	-0.5
Consommation des ménages	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4
Exportations	-0.3	-0.2	-0.7	-0.3	-0.3	-1	-2.8	-2.8	-3.1				0	0	-0.5
Importations	0.1	0.2	-0.9	-0.3	-0.3	-1.7	-1.7	-1.6	-2.1				-1	-0.8	-0.1
Solde commercial net en valeur (% PIB)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.8	-0.9	-0.9	-1	-1	-1				0	0	0

La dynamique des prix réels et des variables en volume analysée précédemment au niveau agrégé se retrouve pour la plupart des secteurs. Dans ce scénario, comme dans le second, on constate que la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises impacte sensiblement le secteur énergétique, dans la mesure où les variables sont toujours largement plus faibles pour ce secteur (à la lecture du tableau).

Par exemple, les salaires réels baissent davantage dans le secteur de l'énergie relativement aux autres secteurs. Toutefois, il est intéressant de constater que bien que la baisse des salaires réels (déflatés par le prix de la valeur ajoutée) soit plus faible dans le secteur énergétique (et relativement moins faible dans les secteurs de l'agriculture, de l'industrie hors énergie et de la construction), c'est l'effet de hausse des salaires réels dans le secteur des services qui l'emporte. Cet effet est structurel dans la mesure où la majorité de la masse salariale française est mobilisée dans le secteur tertiaire, donc la hausse des salaires concerne la majorité des travailleurs.

Concernant les variables en volume, le constat est identique. L'investissement, le stock de capital, la demande de travail, la valeur ajoutée et la production diminuent bien plus fortement pour le secteur énergétique. Toutefois, c'est l'effet de la hausse du capital dans le secteur des services qui l'emporte dans la mesure où le capital est surtout important dans ce secteur (90% du total du volume de stock de capital agrégé dans l'économie).

La demande d'énergie diminue plus fortement dans le secteur de l'énergie avec une baisse de -3.4 % en moyenne sur la période post-choc et en écart au baseline, contre -2.2% pour les autres secteurs en moyenne. L'effet négatif sur la valeur ajoutée et la production est surtout élevé dans le secteur de l'énergie dans la mesure où, le choc de hausse du prix de l'énergie couplé à la hausse des prix de gros de l'énergie et l'effet d'éviction des investissements décarbonés sur les autres investissements énergétiques endogènes (carbonés) concerne directement ce secteur.

En effet, l'investissement endogène diminue surtout dans le secteur de l'énergie (-35.5% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc). Le stock de capital diminue aussi davantage dans le secteur de l'énergie (-4% en écart au baseline, en moyenne sur la période post-choc, contre -1% pour les autres secteurs en moyenne) malgré la hausse des investissements exogènes.

L'effet négatif de la hausse du prix de l'énergie pour financer ces investissements entraîne une diminution de la valeur ajoutée réelle plus forte pour ce secteur (de respectivement -2.5% pour l'énergie, en écart au baseline et en moyenne sur la période post-choc, et de -0.5% pour les autres secteurs en moyenne).

Tout comme dans le premier scénario, face à la forte baisse de la demande d'énergie, le prix réel de l'énergie (déflaté par le prix des consommations intermédiaires) est plus faible dans le secteur de l'énergie pour compenser l'effet volume (face à la hausse du prix de gros de l'énergie qui pénalise plus ce secteur) et l'effet récessif est plus fort dans ce secteur (avec l'effet d'éviction et la baisse de la demande d'énergie).

5. Comparaison des résultats dans les trois scénarios

L'impact négatif sur la valeur ajoutée en moyenne sur la période post-choc est proche dans le premier et le troisième scénario (-0.3% en écart au baseline en moyenne sur la période post-choc) et il est plus élevé dans le second scénario (-0.4%).

En moyenne sur la période post-choc, un financement des investissements électriques bas carbone par une hausse de la dette publique combiné à une hausse de l'impôt générique (premier scénario) ou financé par une hausse du prix de l'énergie partagée par les ménages et les entreprises (troisième scénario) est relativement moins défavorable à l'activité par rapport à un financement par une hausse du prix de l'énergie payée par les entreprises comme dans le scénario 2.

À long terme (30 ans après le choc dans notre modèle), l'impact négatif sur la valeur ajoutée en moyenne sur la période post-choc est légèrement plus faible dans le premier scénario.

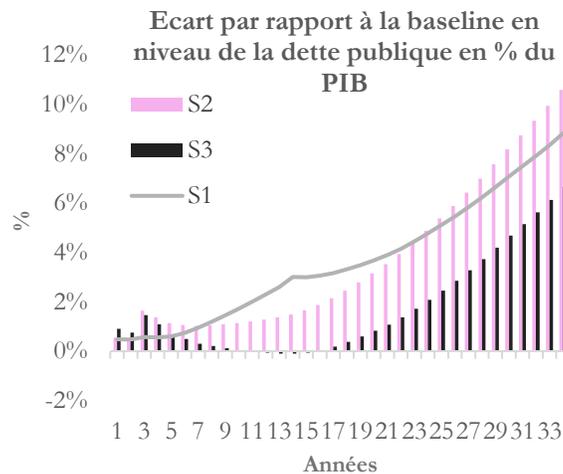
Côté demande, si la consommation diminue (en écart au baseline) dans les trois scénarios, elle diminue davantage dans le troisième scénario (dans la mesure où la hausse du prix de l'énergie pour les ménages est plus forte). Il semble donc que le financement des investissements électriques bas carbone par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie), à moyen terme, soit plus défavorable à la consommation à long terme, mais aussi en moyenne sur la période post-choc.

Dans la mesure où les prix réels à la consommation sont plus élevés dans le troisième scénario, et bien que la consommation en volume diminue, la *valeur* de la consommation est plus forte dans le troisième scénario ce qui diminue davantage les actifs. Les actifs diminuent en moyenne sur la période post-choc de -0.13% en écart au baseline dans le troisième scénario (contre -0.07% pour le premier scénario et -0.01% dans le deuxième scénario).

Lorsque l'on regarde le revenu des ménages après impôts, il est plus faible dans le deuxième scénario dans la mesure où la forte baisse des revenus du travail et du capital pénalise fortement les ménages. L'impact sur la consommation est différent car la consommation dépend davantage des actifs que des revenus disponibles nets (qui ne concerne que les ménages non classiques) dans la mesure où la majorité des ménages sont classiques et consomment sur leurs actifs.

Pour effectuer une distinction entre l'impact du choc sur la consommation des ménages classiques et non-classiques, il suffit de comparer l'impact des chocs sur les actifs et sur le revenu disponible net des ménages.

Si le deuxième scénario impacte plus fortement la consommation des ménages sous contrainte de liquidité (car l'impact sur les revenus du capital et du travail est plus fort), le troisième scénario est celui qui pénalise le plus les ménages classiques car ce scénario diminue davantage le volume de la consommation.

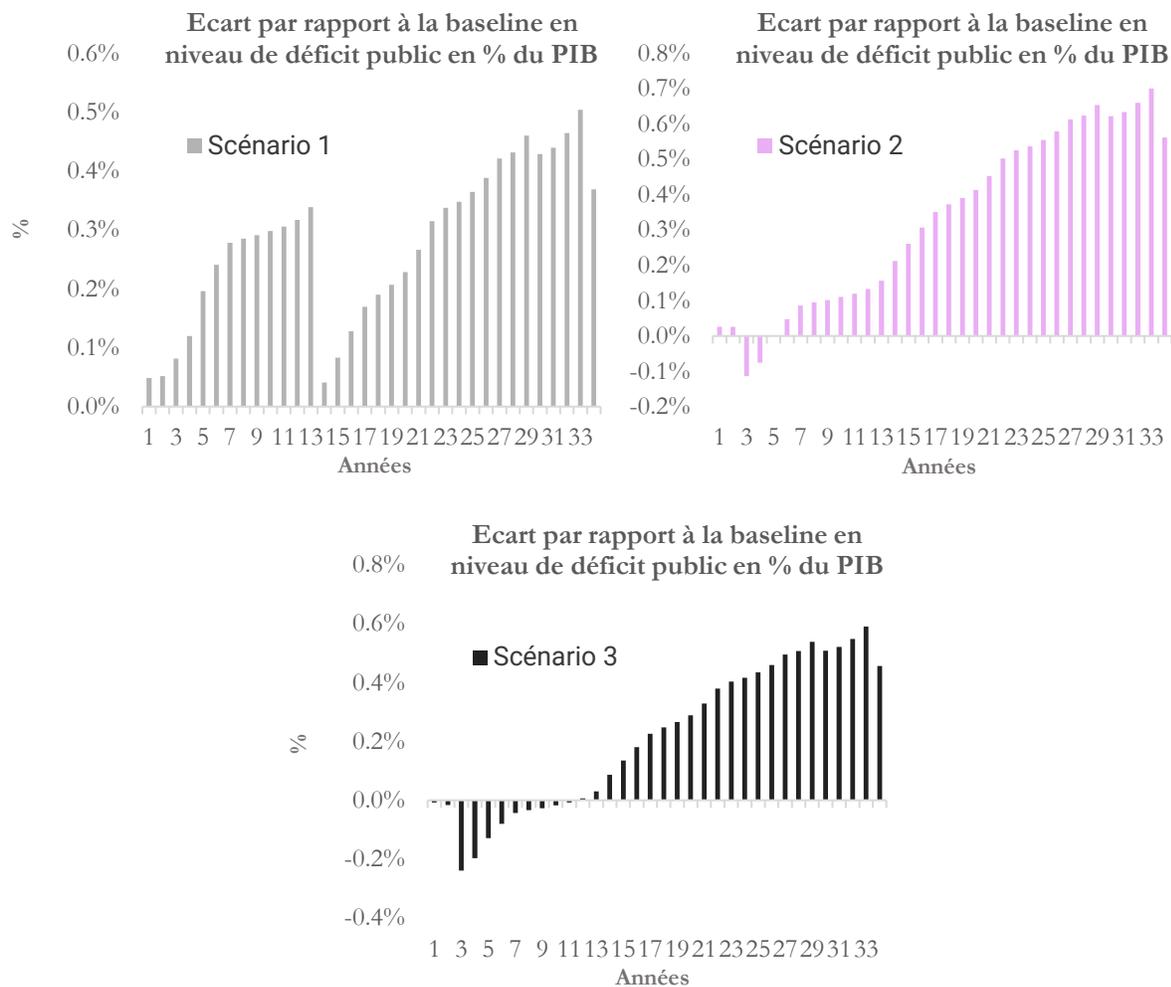


Sources: Résultats du modèle

Graphique 28: Dette publique en % du PIB (écart dynamique par rapport à la baseline) : comparaison des trois scénarios

En moyenne sur la période post-choc (en écart dynamique au baseline), c'est le financement par les entreprises uniquement qui est le scénario le plus défavorable à cause de l'impact relativement plus récessif sur le PIB qui vient diminuer la base fiscale et donc les revenus de l'État. Comme le montre le graphique 28, à moyen terme (entre l'année 7 et 21 du modèle), c'est le financement partiel par la dette publique et par la hausse de l'impôt sur le revenu qui est le plus favorable sous l'hypothèse d'un financement par la dette publique qui ne provoque pas un fort effet d'éviction par une hausse des taux d'intérêt.

En revanche, la dette publique est plus faible en fin de période dans le cas d'un financement par une hausse du prix de l'énergie appliqué aux ménages et entreprises (scénario 3).



Sources: Résultats du modèle

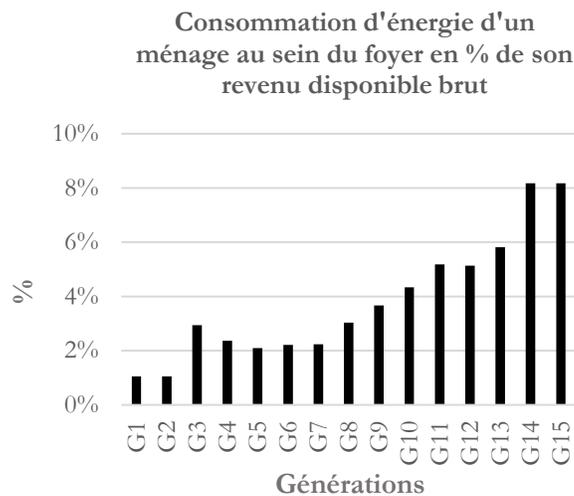
Graphique 29: Déficit public en % du PIB (écart dynamique par rapport au baseline) : comparaison des trois scénarios

6. Focus sur la consommation d'énergie des ménages

Dans le modèle, la consommation d'énergie des ménages n'est pas ventilée en sous-secteurs (eau, chauffage, électricité, gaz). En effet, le modèle se focalise essentiellement sur une désagrégation

sectorielle et générationnelle pour répondre à la question de recherche. Toutefois, une étude des données de la SRCV de 2018 (Statistiques sur les ressources et conditions de vie) de l'INSEE permet d'étudier la consommation d'énergie (par source d'énergie) au sein du foyer et par génération (hors carburant). Le modèle nous permet de simuler la consommation d'énergie des ménages par génération. On se propose donc de compléter l'analyse grâce à l'enquête SRCV.

Grâce à la base de données SRCV de 2018, il est possible d'obtenir le détail de la consommation d'énergie au sein du foyer en pourcentage du revenu disponible brut, pour les ménages pauvres (ménages non-classiques), pour les ménages classiques et pour l'intégralité de la population. L'exploitation de la base de données permet d'effectuer cette répartition par niveau de revenu et par génération. Par génération, on obtient la répartition suivante :

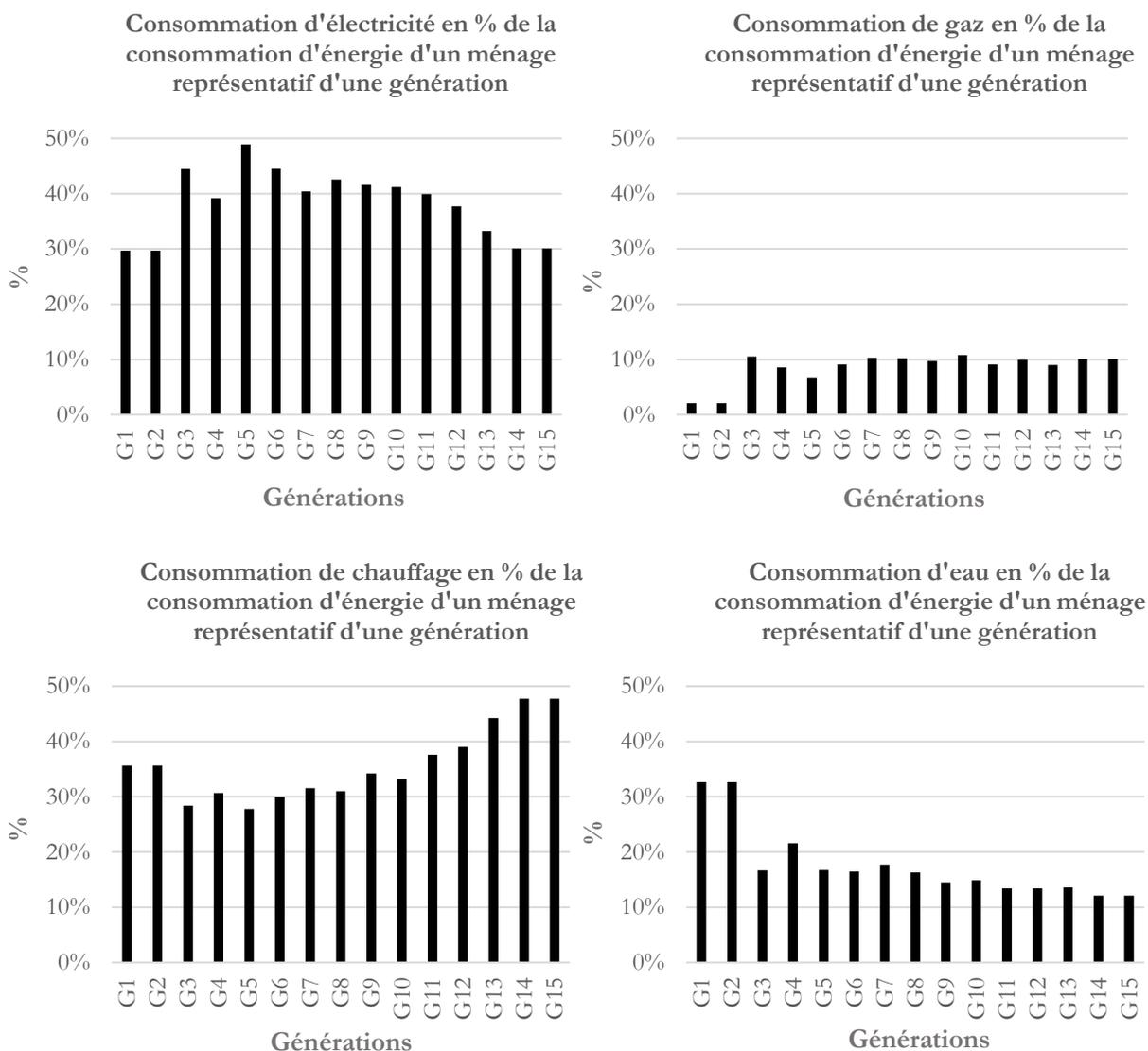


Sources : SRCV(2018).

Graphique 30: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) donnée par la SRCV 2018.

Selon les résultats de la SRCV, la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) est plus faible chez les ménages jeunes (1%) et plus élevée chez les ménages les plus âgés (8%). Si la justification de cette différence n'est pas donnée, une étude de l'INSEE publiée en 2010 (Les dépenses d'énergie des ménages depuis 20 ans : une part en moyenne stable dans le budget, des inégalités accrues) explique qu'« un ménage dont la personne de référence a plus de 70 ans consacre 3.5 points de plus de son budget à l'énergie qu'un ménage de moins de 30 ans. Cela est dû aux dépenses d'énergie pour l'habitat car les ménages âgés vivent dans des logements plus grands. »

La répartition sectorielle des dépenses d'énergie au sein du foyer est aussi différente d'une génération à l'autre. Par exemple, la part de consommation de chauffage dans la consommation d'énergie totale au sein du foyer est relativement plus élevée pour les générations plus jeunes et plus âgées (graphiques ci-dessous).



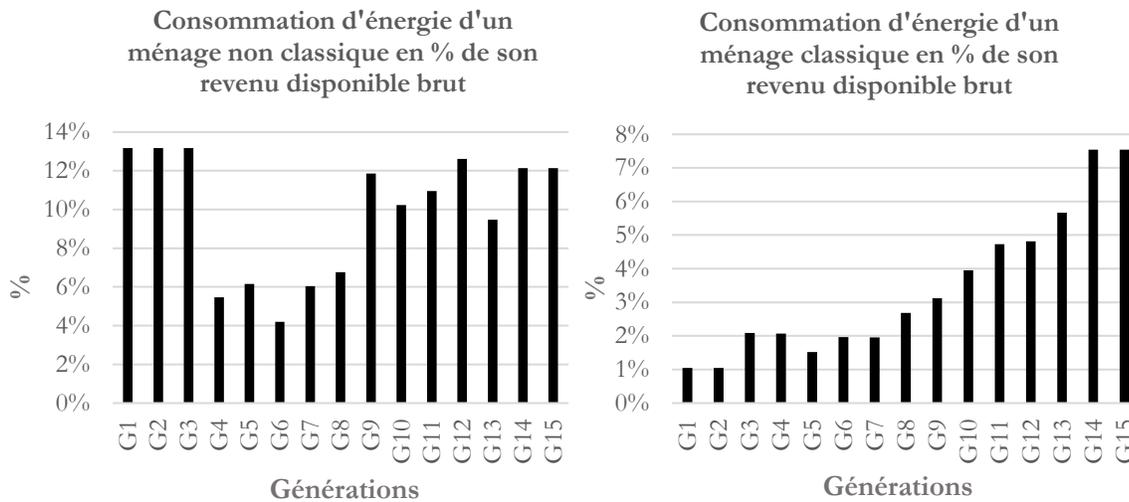
Sources : SRCV(2018).

Graphique 31: Répartition sectorielle de la consommation d'énergie au sein du foyer d'un agent représentatif d'une génération, donnée par la SRCV 2018

Cette lecture agrégée cache par ailleurs des disparités entre les ménages pauvres et riches au sein d'une même génération. En effet, comme le montrent les graphiques suivants, chez les jeunes générations,

la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) est plus faible chez les ménages classiques que chez les ménages pauvres (13% du revenu disponible brut).

Au sein des ménages pauvres (12% de la population en moyenne pour l'année observée), la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) est plus faible pour les générations intermédiaires (6% en moyenne pour les 30-54 ans) contre 13% en moyenne pour les jeunes (15-29 ans). Pour les ménages classiques (88% de la population en moyenne pour l'année observée), la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) est croissante avec l'âge. Elle est faible pour les jeunes (2% en moyenne pour les 15-29 ans) contre 7% en moyenne pour les plus âgés (75 ans et plus).

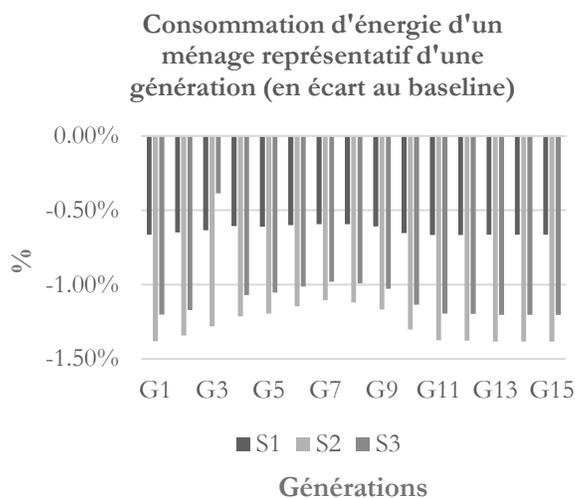


Sources : SRCV(2018).

Graphique 32: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) pour les ménages classiques et non-classiques, donnée par la SRCV 2018

Nous avons transcrit les proportions (ménages pauvres / riches), les découpages générationnels, les taux de pauvreté et divers indicateurs tirés des données de la SRCV à notre année de base, 2017. Puis nous avons appliqué les pourcentages (de consommation d'énergie du foyer par rapport au revenu disponible brut) au revenu disponible net calculé par le modèle. Ainsi, on obtient des niveaux de consommation par âge dans chaque scénario, nous permettant d'évaluer la baisse de la consommation d'énergie en niveau et en écart au scénario baseline.

L'écart au baseline de la consommation d'énergie au sein du foyer d'un ménage représentatif d'une génération est négatif dans tous les scénarios, mais relativement accentué dans le second scénario.



Sources : SRCV(2018).

Graphique 33: Désagrégation générationnelle de la consommation d'énergie – en écart au baseline- au sein du foyer (en % du revenu disponible brut) pour un ménage représentatif d'une génération, donnée par la SRCV 2018

Pour conclure, si les élasticités de substitution entre énergie et les élasticités revenu restent constantes, on s'attend à ce que le second scénario reste le plus défavorable. Dans le modèle, on peut regarder la consommation d'énergie (y compris de carburant) par génération et par type de ménage. Mais grâce aux données de la SRCV, on peut voir précisément les consommations d'énergie (hors carburant) et *on constate que les agents qui souffrent le plus dans nos scénarios sont les jeunes sous contrainte de liquidité et les personnes âgées classiques.*³³

7. Conclusion

Dans tous les scénarios, plusieurs mécanismes sont mis en œuvre :

³³ Une enquête montre l'impact d'une hausse des prix de l'électricité sur les différents types de ménages (basée sur le compte des ménages par catégorie estimé pour l'année 2015). Les résultats montrent que les retraités seraient plus touchés par la hausse des prix de l'électricité que les actifs, ce qui confirme nos résultats (Insee, 2019).

- (i) **Un même effet d'éviction des investissements bas carbone.** Ainsi, les investissements hors transition énergétique diminuent continuellement dans la mesure où la trajectoire des investissements électriques bas carbone augmente sur la période.
- (ii) Une hausse du prix de l'énergie pour les entreprises (plus élevé dans les scénarios 2 et 3 où l'on augmente le signal prix carbone pour les entreprises) **qui pèse sur la demande d'énergie pour les entreprises.**
- (iii) Une hausse du prix de l'énergie pour les ménages (plus élevé dans le scénario 3 où l'on augmente la taxe carbone pour les ménages) **entraînant un effet défavorable sur la demande d'énergie pour les ménages.**
- (iv) Dans le premier scénario, l'augmentation de l'impôt générique **pèse sur les revenus des ménages.**
- (v) **Dans les trois scénarios, on a un effet défavorable sur le PIB et la consommation.** L'effet négatif sur le PIB, on l'a vu, est plus élevé **dans le second scénario** où les entreprises seules portent le poids du financement. L'effet négatif sur la consommation, est quant à lui plus élevé lorsque l'on introduit une augmentation de la taxe carbone (**scénario 3**).
- (vi) **En termes de finances publiques,** en moyenne sur la période post-choc (en écart dynamique au baseline), c'est le financement par les entreprises uniquement qui est le scénario le plus défavorable à cause de l'impact relativement plus récessif sur le PIB qui vient diminuer la base fiscale et donc les revenus de la fiscalité de l'État.
- (vii) **Sur l'impact différencié en fonction du type de ménage concerné,** le deuxième scénario impacte plus fortement la consommation des ménages sous contrainte de liquidité (car l'impact sur les revenus du capital et du travail est plus fort). En effet, si les revenus du capital et du travail baissent, les ménages sous contrainte de liquidité sont davantage pénalisés dans la mesure où ils ne peuvent pas faire des arbitrages intemporels. Le troisième scénario est celui qui pénalise le plus les ménages classiques dans la mesure où leur richesse réelle nette est davantage impactée dans le troisième scénario, ce qui diminue davantage leur consommation.
- (viii) Quand on regarde plus précisément la consommation d'énergie des ménages, on note que l'effet défavorable porte surtout sur les jeunes **sous contrainte de liquidité** (i.e., **menacés de précarité énergétique**) et les personnes âgées classiques.

CHAPITRE 2 : AUTRES EFFETS REDISTRIBUTIFS INTERGÉNÉRATIONNELS

Le précédent chapitre a déjà permis d'obtenir plusieurs résultats relatifs aux effets redistributifs des trois scénarios envisagés (cf. page précédente). On se propose ici une analyse plus systématique des effets redistributifs intergénérationnels de ces scénarios.

La moindre progression de la consommation sur la période de simulation cache des disparités d'une génération à l'autre. L'impact sur le revenu permanent et la consommation dépend du groupe d'âge car i) la distribution des revenus du travail et du capital augmente avec l'âge puis diminue sur les dernières années de vie, ii) la distribution de la consommation augmente avec l'âge puis diminue sur les dernières années, iii) la distribution des impôts et des revenus de transferts pénalise relativement plus les générations d'âge moyen, iv) le niveau de consommation varie en fonction du type de ménage concerné (pauvre ou riche). De plus, le taux de pauvreté varie d'une génération à l'autre.

1. Mécanismes et effets communs aux trois scénarios

Afin de prendre en compte les inégalités intragénérationnelles, nous avons supposé que dans chacune des générations, cohabite deux types de ménages : les ménages classiques qui sont en mesure de réaliser les arbitrages intertemporels et les ménages keynésiens, soumis aux contraintes de liquidité.

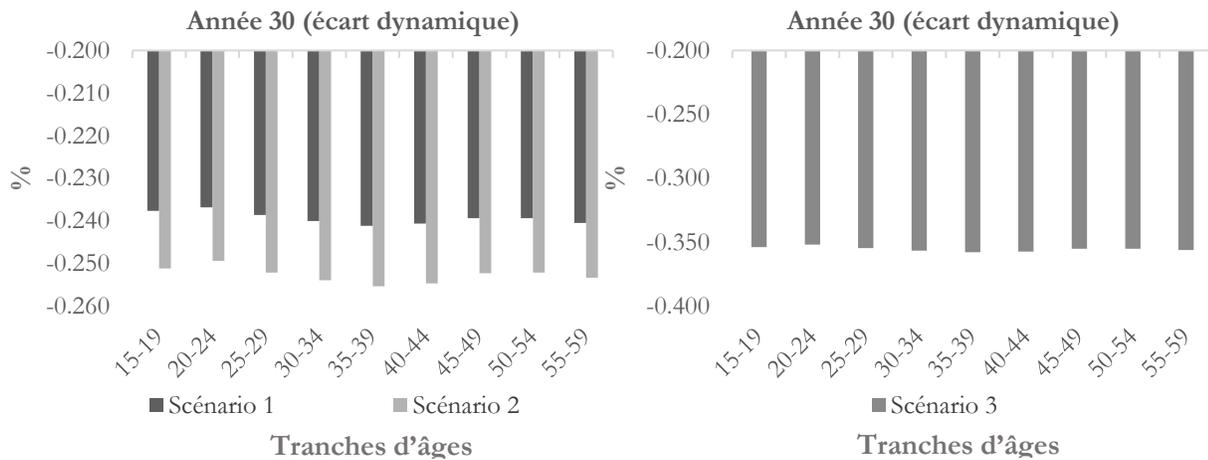
Les données françaises suggèrent que plus le revenu est élevé et plus le taux d'épargne est important : les 20% de ménages les plus aisés épargnent 28 % de leur revenu contre 3 % pour les 20 % les plus modestes.

Les modalités de financement de la transition énergétique affectent les ménages keynésiens en réduisant leur consommation via la baisse du revenu courant. Les ménages classiques déterminent leur consommation en fonction de la richesse financière réelle nette. Les propensions à consommer (ou épargner) la richesse ont été calibrées pour reproduire la distribution observée de la consommation selon le patrimoine financier net. Selon les dernières données disponibles de la SRVC, le montant des actifs financiers augmente avec l'âge jusqu'à la tranche 60-64 ans, puis décroît légèrement et reste stable aux âges avancés. La stabilité du patrimoine entre 55 et 80 ans est également observée dans la dernière enquête de l'INSEE Histoire de vie et patrimoine (HVP) publiée en 2021 et qui porte sur l'année 2018.

Et selon les différentes enquêtes successives de patrimoine publiée par l'INSEE, l'évolution du patrimoine financier en fonction de l'âge, semble avoir la même forme et ce quelle que soit la génération considérée.

Sur la base de ces hypothèses, on peut retenir les résultats suivants qui sont communs aux trois scénarios simulés :

1. Le revenu courant dans les trois scénarios progresse moins vite que dans le baseline : cet effet affecte directement les ménages sous contrainte de liquidité, dont la consommation dépend du revenu courant.
2. La moindre accumulation de capital affecte les ménages classiques et surtout les générations les plus âgées dont la propension à épargner est élevée. Nous obtenons *in fine*, une courbe en cloche inversée, qui montre que dans ces trois scénarios, les générations intermédiaires (surtout les 35-39 ans nés l'années 0) sont relativement plus pénalisées par les chocs.
3. L'introduction de la taxe carbone pénalise la consommation de toutes les générations, mais davantage celle des jeunes, en lien avec un effet prix plus important pour ces générations.

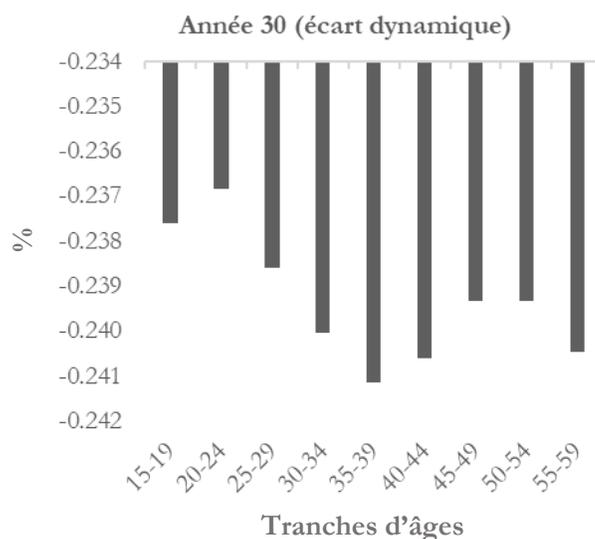


Sources : Résultats du modèle.

Graphique 34: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios, par tranche d'âges et à long terme

2. Premier scénario

A long terme (Graphique 35), à l'année 30 du modèle, les individus âgés de 35 à 39 ans l'année 0 sont les plus impactés dans ce premier scénario :



Sources : Résultats du modèle (premier scénario).

Graphique 35: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario -financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline, par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme

Ce résultat à l'année 30 s'explique par le fait que de l'année 0 à l'année 30, l'effet négatif du choc d'investissement couplé à la hausse de l'impôt sur le revenu a relativement plus pénalisé les générations d'âges intermédiaires et plus âgées. En effet, face à la hausse du choc d'impôt sur le revenu (qui intervient à moyen terme mais qui est anticipé par les ménages), les entreprises diminuent leur demande de capital, le prix réel de l'investissement augmente -en écart par rapport au baseline, comme toutes les variables analysées dans cette section-, les salaires réels diminuent, tout comme la demande de travail. La hausse des prix de l'investissement explique la réduction de la demande de capital qui se creuse dans le temps. Finalement, on obtient une réduction des revenus du capital dans ce premier scénario. En parallèle, on note une baisse des salaires et du travail (effet substitution) ce qui diminue les revenus du travail. Cet effet est accentué par la hausse de l'impôt sur le revenu à moyen terme.

L'effet négatif sur les revenus du travail pénalise davantage les générations d'âges intermédiaires. En effet, les données de comptabilité française montrent que les revenus du travail sont plus élevés pour les générations intermédiaires. Toutefois, lorsque l'on regarde les revenus du capital, ce sont les générations plus âgées qui sont davantage concernées. Enfin, lorsque l'on observe les revenus du

capital et du travail agrégés, ce sont les 55-74 ans qui sont les plus grands détenteurs (voir section calibration).

Par ailleurs, la hausse du prix de gros entraîne une hausse du prix de la consommation qui affecte le revenu permanent. Comme la propension à consommer des cohortes les plus jeunes est plus élevée, avec une proportion plus élevée de ménages à contrainte de liquidité parmi les jeunes, et un niveau d'actifs initial relativement plus faible, leur consommation est relativement plus pénalisée par le choc de prix.

Dans ce premier scénario, malgré la hausse du prix à la consommation qui touche davantage les jeunes, l'effet défavorable sur les revenus du travail (qui concerne surtout les générations d'âge intermédiaire) et du capital (qui touche davantage les générations plus âgées) est relativement plus important. Le choc sur les revenus du capital concerne davantage les 55-74 ans, il est combiné à l'effet sur les revenus du travail qui concerne davantage les 45-59 ans, et l'effet prix a moindre ampleur (mais impacte différemment les générations).

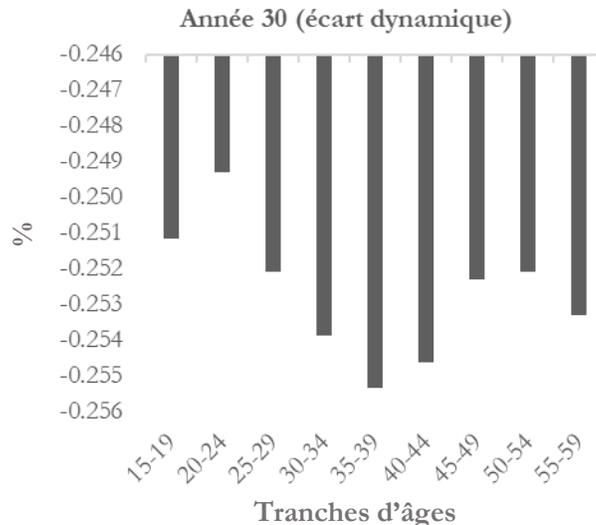
Au final, c'est surtout la cohorte d'âge 35-39 ans à l'année 0 qui est la plus impactée. Le choc a lieu à une période importante pour ces générations dans leur processus d'accumulation des revenus du travail et du capital.

Ceci explique pourquoi à long terme, ce sont les cohortes d'âges plus âgées qui sont les plus pénalisées par le choc. En effet, le graphique montre bien que c'est la cohorte dont les individus sont âgés de 65 à 69 ans l'année 30 du modèle qui sont le plus touchées par ce choc.

3. Second scénario

Dans le second scénario, pour rappel, l'effet d'éviction, couplé à celui de hausse du prix de l'énergie pour les entreprises pèse relativement plus sur les revenus du travail et du capital des ménages. Ainsi, l'effet négatif sur les revenus du capital et du travail est aussi significatif. En effet, la baisse de la demande d'énergie des entreprises sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie entraîne un effet défavorable plus important de la valeur ajoutée dans ce scénario. Ce scénario est celui dont la progression du capital, du travail et des salaires réels sont les moins fortes (dans l'absolu). C'est donc également le scénario dans lequel les revenus du travail et du capital sont les moins dynamiques.

Tout comme dans le premier scénario, à long terme (l'année 30), la cohorte dont les individus sont âgés de 65 à 69 est la plus impactée (soit les 35-39 ans l'année 0). Cet effet est illustré dans le graphique 42.



Sources : Résultats du modèle (second scénario).

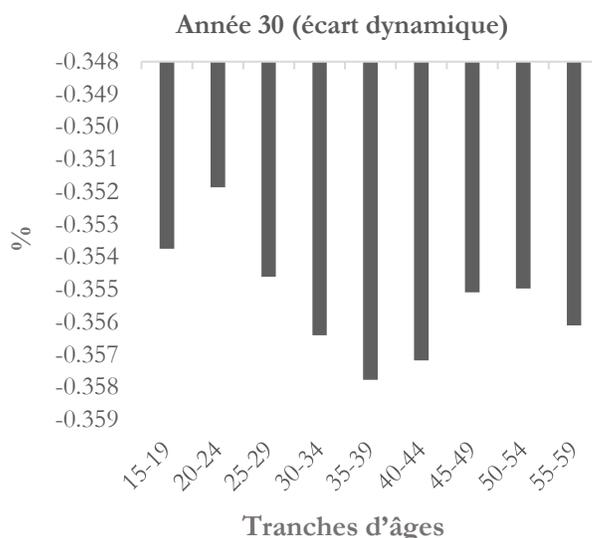
Graphique 36: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges (à l'années 0) et à long terme

La section précédente (« Effets macroéconomiques ») montrait que l'effet négatif sur la consommation était plus élevé -en comparaison au premier scénario-. On constate en effet dans ce deuxième scénario -financement par une hausse du prix de l'énergie pour les entreprises uniquement-, l'effet négatif sur toutes les générations est légèrement plus élevé -en comparaison au premier scénario-. Les prix à la consommation sont plus élevés dans ce scénario, et les revenus des ménages sont plus faibles. Ainsi, la diminution plus forte des revenus du travail domine dans ce scénario (sous l'effet de la plus forte baisse des salaires et de la demande de travail dans ce scénario) par rapport aux autres scénarios.

Si les effets intergénérationnels sont proches entre les deux scénarios, on note que les mécanismes sous-jacents sont différents. En effet, c'est la diminution des revenus du travail qui explique que la cohorte d'individus âgés de 35-39 ans l'année 0 soit la plus pénalisée sur la période étudiée. Toutefois, dans notre premier scénario, c'est la hausse de l'impôt générique qui explique cette baisse des revenus du travail tandis que dans le second scénario (et le troisième également), c'est la hausse du coût pour les entreprises qui se transmet par une baisse des revenus du travail pour les ménages (baisse des salaires).

4. Troisième scénario

Dans le troisième scénario, l'effet sur les revenus du capital est aussi significatif. Tout comme dans le premier et le second scénario, à long terme (l'année 30), la cohorte dont les individus sont âgés de 65 à 69 est la plus impactée (soit les 35-39 ans l'année 0). Cet effet est illustré dans le graphique suivant :



Sources : Résultats du modèle (troisième scénario).

Graphique 37: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline, par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme

Tout comme dans le scénario précédent, l'effet de la réduction de la valeur ajoutée domine au final l'effet prix (baisse des salaires réels, déflatés par le prix de la valeur ajoutée) bien que l'effet soit moindre que dans le second scénario (car le choc de prix pour les entreprises est moins élevé).

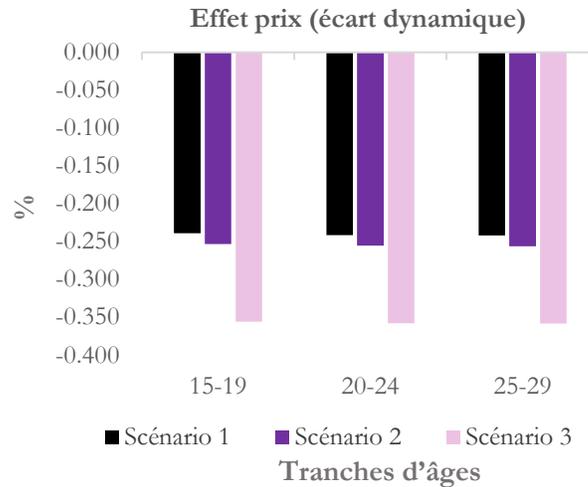
La section précédente (« Effets macroéconomiques ») montrait que l'effet négatif sur la consommation était plus élevé dans ce scénario. On constate en effet dans ce troisième scénario, que l'effet négatif sur toutes les générations est significativement plus élevé. L'explication tient à la hausse de la taxe carbone dans ce troisième scénario qui réduit davantage l'offre de travail des ménages (effet revenu).

La baisse des revenus du travail et du capital et la plus forte hausse des prix à la consommation dans ce troisième scénario -en comparaison aux autres scénarios- explique la relative plus forte baisse de la consommation.

Ainsi l'effet prix est plus important dans ce troisième scénario (plus forte hausse des prix à la consommation pour les ménages). Or ce sont les jeunes générations qui sont les plus impactées par l'effet prix. En

effet, comme la propension à consommer des cohortes les plus jeunes est plus élevée, avec une proportion de ménages à liquidité limitée parmi les jeunes également plus élevée, et un niveau d'actifs initial relativement plus faible, leur consommation est plus pénalisée par le choc de prix.

Dans notre précédent graphique, cet effet prix n'est pas visible car l'effet négatif sur les revenus du capital et du travail domine et concerne davantage les générations âgées l'année 30 du choc. Toutefois, si l'on fait un focus sur les jeunes générations, on observe bien cet effet prix (**graphique 38**).



Graphique 38: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios par rapport au scénario baseline, pour les jeunes générations, à long terme (démonstration de l'effet prix)

Ainsi, pour rappel, le prix à la consommation est plus élevé dans le troisième scénario, et moins élevé dans le second. Le graphique 38 montre la consommation des plus jeunes générations (les 15-29 ans) l'année 30 du modèle (l'année où le choc de prix est le plus élevé).

Pour les trois générations les plus jeunes, l'effet sur la consommation est plus négatif dans le troisième scénario où l'effet prix est plus élevé.

CHAPITRE 3 : EFFETS D'UNE TRAJECTOIRE D'INVESTISSEMENTS PLUS ÉLEVÉS (SCENARIO RTE)

1. Implémentation du choc dans une variante RTE (chiffrage du scénario N03 de RTE):

- *Augmentation de l'investissement dans le temps*

Dans nos scénarios principaux, l'investissement électrique bas carbone exogène est équivalent à un montant annuel moyen de 8.31 milliards d'euros par an sur la période 2019-2050. Ce montant moyen est proche de celui de la SNBC (10 milliards d'euros par an en moyenne sur la période, mais ce chiffrage prend en compte l'intégralité des investissements du secteur énergie et réseaux). Notre trajectoire d'investissement est tirée du mix électrique d'IHS Markit.

La crise du COVID a eu un effet catalyseur sur les décisions d'investissements dans la transition énergétique. De fait, la récente publication de RTE donne une trajectoire plus importante de ses investissements. Dans le chapitre 11 (« L'analyse économique ») de sa publication « Futurs énergétiques 2050 », RTE donne un montant total des dépenses d'investissement dans le système électrique cumulées sur la période 2020-2060.

Nous considérons ici le scénario N03 de RTE dans lequel le mix de production repose à parts égales sur les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2+ SMR). Pour ce scénario N03, le montant total est de 770 milliards d'euros sur la période 2020-2060, ce qui donne un montant annuel moyen est de 19.25 milliards d'euros par an sur la période de notre modèle, 2019-2050 (soit 616 milliards d'euros en tout sur la période 2019-2050).

- *Augmentation du prix de gros de l'énergie dans le temps*

Pour une telle trajectoire d'investissement, RTE estime l'évolution du coût complet du système électrique rapporté au volume d'électricité consommé, ce qui donne un coût de 100 euros par MWh en 2050. Ceci fait passer le prix de gros moyen de l'électricité de 39.5 euros à 100 euros par MWh entre 2019 et 2050, équivalent à une hausse de 3% par an en moyenne sur la période. Cette implémentation est identique dans les trois scénarios.

- ***Augmentation du taux apparent de l'impôt générique dans le premier scénario***

Tout comme dans notre première version (avec un montant d'investissement de 8.3 milliards d'euros en moyenne sur la période), dans ce premier scénario, on finance les investissements publics exogènes bas carbone grâce à un endettement public, remboursé partiellement (76%) à moyen terme (à partir de la 14^e année du modèle) sous forme de hausse de l'impôt sur le revenu.

Pour financer l'investissement (plus élevé de 11 milliards d'euros dans ce scénario N03, en comparaison au scénario tiré du mix électrique d'IHS Markit), il faudrait que les recettes fiscales atteignent (ex ante) un montant de 245.92 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 19.25 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse ex ante du taux apparent de l'impôt sur le revenu est de 1.3%, équivalente à 0.8 point de PIB par an en moyenne.

- ***Augmentation du signal-prix carbone (ou hausse d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les entreprises uniquement dans le second scénario***

Comme dans notre première version (avec un montant d'investissement de 8.3 milliards d'euros en moyenne sur la période), dans ce second scénario, on finance les investissements publics exogènes bas carbone grâce à une augmentation du signal-prix carbone (ou d'une taxe sur la consommation d'énergie) payé uniquement par les entreprises. Ce financement a lieu la troisième année du choc (année 2 du modèle), tout comme le choc d'investissement électrique bas carbone exogène.

La valeur de la demande d'énergie (prix de l'énergie multiplié par son prix) est de 207.24 milliards d'euros en 2017. Pour financer la trajectoire d'investissements, il faudrait que ce montant atteigne (ex ante) 226.5 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 19.25 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse ex ante du prix de l'énergie est de 9%, équivalente à 0.8 point de PIB par an en moyenne.

- ***Augmentation du signal-prix carbone (ou hausse d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les entreprises uniquement dans le troisième scénario***

Tout comme dans notre première version, l'ampleur du choc est différente dans la mesure où dans ce scénario, les entreprises ne financent que 45% du montant total (les 55% restant étant financés par les ménages). Cette hausse ex ante du prix de l'énergie est de 4%, équivalente à 0.4 point de PIB par an en moyenne.

- ***Augmentation de la taxe carbone (ou d'une taxe sur la consommation d'énergie) pour les ménages dans le troisième scénario***

Comme dans notre première version, ce financement a lieu la troisième année du choc (année 2 du modèle), à l'instar du choc d'investissement électrique bas carbone exogène. Dans ce scénario, les ménages ne financent que 55% du montant total. La valeur de la consommation d'énergie des ménages (prix de l'énergie multiplié par son prix) est de 99.01 milliards d'euros en 2017. Pour financer la trajectoire d'investissements, il faudrait que ce montant atteigne (ex ante) 109.6 milliards d'euros, ce qui correspond bien à une hausse de 10.6 milliards d'euros pour l'année 2017. Cette hausse ex ante du prix de l'énergie pour les ménages est de 11%, équivalente à 0.5 point de PIB par an en moyenne.

Effets macroéconomiques dans cette variante (chiffrage du scénario N03 de RTE):

On constate que les mécanismes mis en œuvre dans ces trois scénarios sont globalement et qualitativement en partie comparables pour toutes les variables macroéconomiques. Autrement dit, lorsque l'on compare nos résultats avec ceux de notre variante principale (avec un montant d'investissement de 8.3 milliards d'euros par an en moyenne sur la période post-choc), le sens des résultats est identique pour tous les scénarios.

Toutefois, on note qu'en moyenne sur la période et en écart au baseline, le troisième scénario -financement par les entreprises et les ménages- devient le plus défavorable sur l'activité économique (alors que dans la première variante il s'agissait du second scénario de financement par les entreprises uniquement).

Ceci s'explique par le fait que, quand la hausse des prix de l'énergie est sensible, une hausse du prix de l'énergie pour les ménages a un effet relativement plus récessif sur l'activité économique. Comme le montre le tableau 21, l'effet d'une hausse du prix de l'énergie est beaucoup plus élevé pour les ménages sous contrainte de liquidité dans ce troisième scénario. On peut craindre que plus la transition

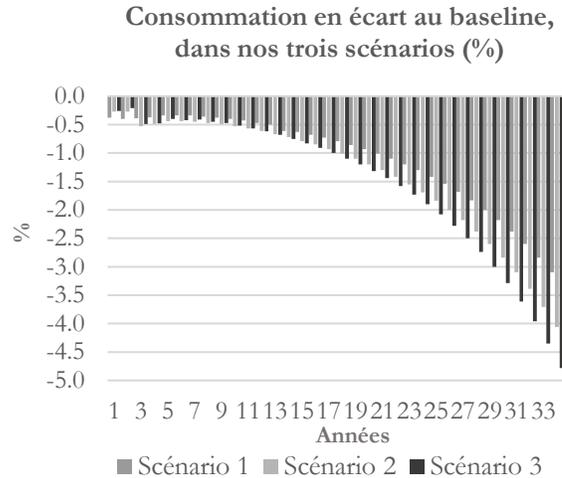
énergétique est ambitieuse en termes d'investissement, plus elle nécessitera une contribution forte des ménages et plus elle pèsera sur ceux parmi eux qui sont les plus vulnérables.

Tableau 21: Effet d'une hausse du prix de l'énergie sur la consommation des ménages dans les trois scénarios et pour les deux trajectoires d'investissements

Augmentation du prix						
l'énergie pour les ménages	Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
Type de ménage	classique	Non-classique	classique	Non-classique	classique	Non-classique
Consommation avec						
la trajectoire de IHS	-0.2	-1.0	-0.2	-1.4	-0.3	-1.3
Consommation avec						
la trajectoire de RTE	-1.0	-2.0	-1.3	-2.9	-1.9	-2.6

Avec la trajectoire d'investissements de type RTE, en écart au scénario baseline, et en moyenne sur la période post-choc, le PIB, tout comme la consommation agrégée sont plus faibles dans le troisième scénario - augmentation des investissements électriques bas carbone financée par un prix de l'énergie plus élevé pour les entreprises (prix carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) et pour les ménages (taxe carbone ou taxe sur la consommation d'énergie) -.

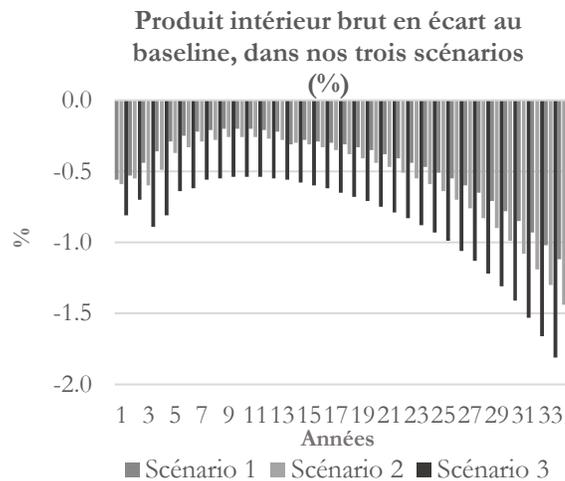
Une autre différence significative entre les deux scénarios d'investissement est que l'effet récessif est plus fort dans les trois scénarios de cette variante. L'explication tient à l'ampleur des chocs d'investissement et de financement qui sont plus importants du fait de leurs montants relativement plus élevés, en comparaison au premier scénario-. Ainsi, en écart au Baseline et en moyenne sur la période post-choc, le PIB diminue de respectivement -1.12% dans le premier scénario, de -1.45% dans le second scénario, et de -1.62% dans le troisième scénario (graphique ci-dessous).



Sources : Résultats du modèle

Graphique 39: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios et sur toute la période étudiée (variante RTE)

Concernant la consommation agrégée, en écart au Baseline et en moyenne sur la période post-choc, la consommation diminue de respectivement -0.45% dans le premier scénario, de -0.57% dans le second scénario, et de -1.90% dans le troisième scénario (graphique ci-dessous)



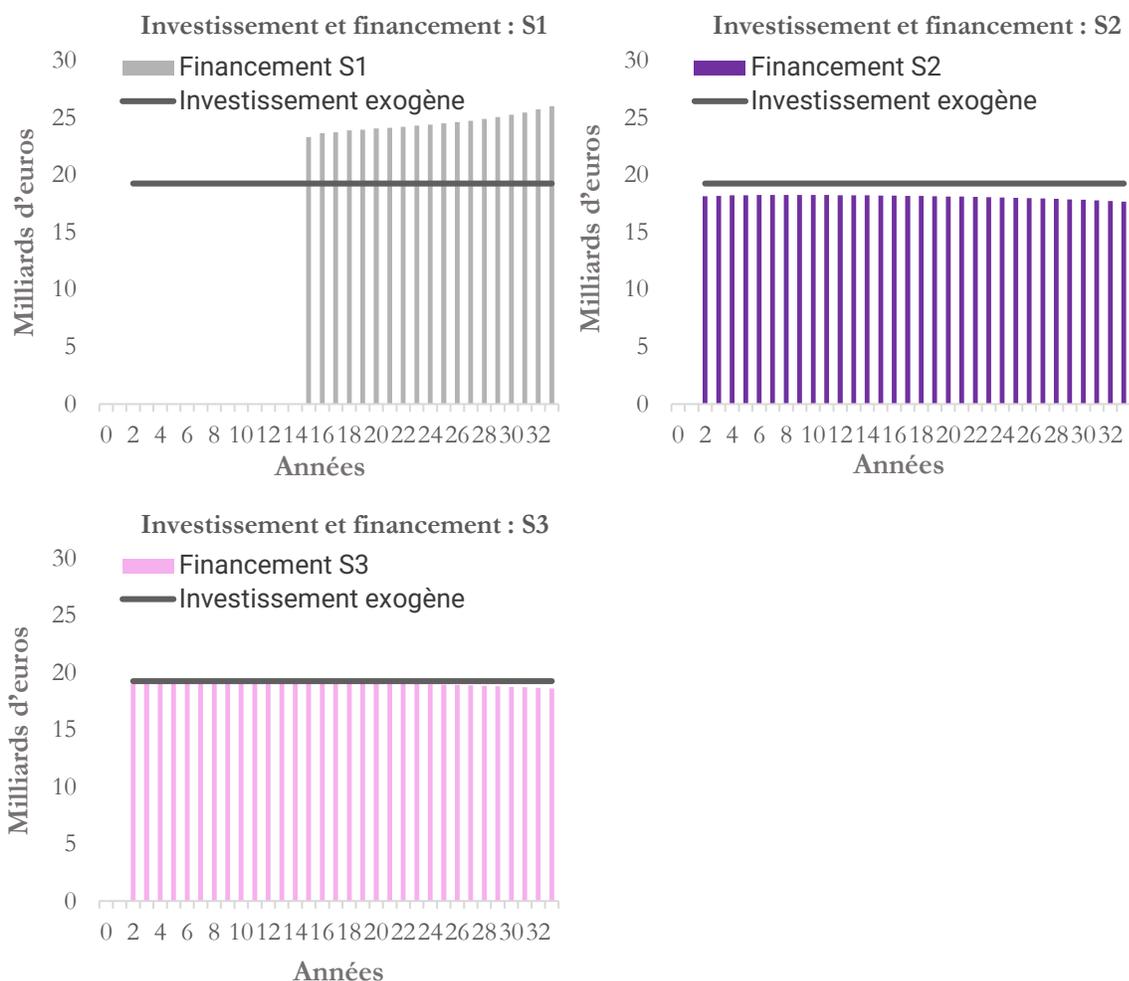
Sources : Résultats du modèle

Graphique 40: Produit intérieur brut en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios et sur toute la période étudiée (variante RTE)

2. Effets sur la dette publique dans cette variante :

Lorsque l'on observe la dette publique *en pourcentage du PIB*, on constate qu'elle est plus élevée (en moyenne sur la période post-choc et en écart au baseline) dans le *second* scénario à long terme, suivi du premier scénario, puis du troisième. Plus précisément, la dette publique est plus élevée dans le premier scénario de l'année 8, jusqu'à l'année 18 puis elle devient supérieure dans le second scénario dès l'année 19. L'explication est que le montant de dette publique est plus élevé dans le premier scénario en moyenne sur la période. Toutefois, le PIB étant beaucoup plus faible dans ce deuxième scénario de financement par les entreprises, le ratio de dette sur PIB est plus élevé dans le second scénario.

On constate également que dans la seconde variante (scénario N03 de RTE), le financement en pourcentage du montant total (616 milliards d'euros) est proche de la première variante : 76% dans le cas du premier scénario, et respectivement 94% et 99% dans le second scénario et le troisième scénario.



Sources: Résultats du modèle

Graphique 41: Investissement et financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique dans nos trois simulations (variante RTE)

RTE dessine une trajectoire d'investissements de 616 milliards d'euros dans ce scénario N03, que l'on applique dès l'année 2 du modèle et pour les années suivantes de la période étudiée (32 années en totalité). Cela donne donc 19.25 ($=616/32$). À la différence du premier scénario RTE qui apporte une trajectoire précise avec des montants différents d'une année à l'autre, dans ce scénario, nous appliquons un montant annuel constant.

Ainsi, à la lecture du graphique ci-dessus, on voit bien que dans le premier scénario (financement par dette publique), le financement commence à moyen terme (hausse de l'impôt générique sur le revenu des agents), mais qu'il n'est pas suffisant pour rembourser l'intégralité du montant sur la période. Dans le second scénario (financement par les entreprises uniquement), le financement intervient dès le début

de l'investissement (année 2) et le montant total est quasiment remboursé. Dans le troisième scénario, où le financement est partagé entre entreprises et ménages, 99% de la dette est financée.

3. Effets redistributifs intergénérationnels dans cette variante (chiffrage du scénario N03 de RTE):

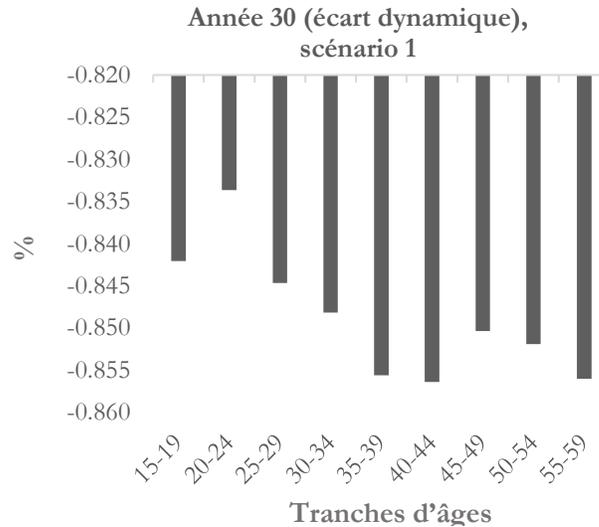
On constate toutefois une différence sur les effets redistributifs intergénérationnels par rapport à notre variante principale (avec les montants d'investissements plus faibles).

Dans la première variante, dans les trois scénarios, la génération la plus pénalisée était celle des 35-39 ans nés l'année 0 -qui ont entre 35 et 69 ans sur la période-, qui sont censés vivre les années où ils consolident leur patrimoine (en accumulant leurs revenus du travail et du capital). On sait qu'un choc sur les revenus du travail touche davantage les générations intermédiaires tandis qu'un choc sur les revenus du capital touche davantage les générations plus âgées.

Dans la mesure où le choc d'investissement est relativement plus élevé dans la trajectoire du scénario N03 de RTE (on passe de 266 milliards d'euros à 616 milliards d'euros sur la période), bien que l'impact négatif sur les revenus du travail reste élevé, l'impact défavorable sur les revenus du capital est plus fort. Ainsi, ce choc pénalise relativement plus la génération des 40-44 ans nés l'année 0 -qui ont entre 40 ans et 74 ans sur la période étudiée-.

3.1. Premier scénario

Lorsque l'on observe à long terme (Graphique 42), à l'année 30 du modèle, on constate que ce sont les individus âgés de 40-44 ans l'année 0 (suivis de près par la génération des 35 à 39 ans l'année 0) qui sont les plus impactés dans ce premier scénario. L'année 30, en fin de période de simulation, ces individus ont 70-74 ans.



Sources : Résultats du modèle (premier scénario).

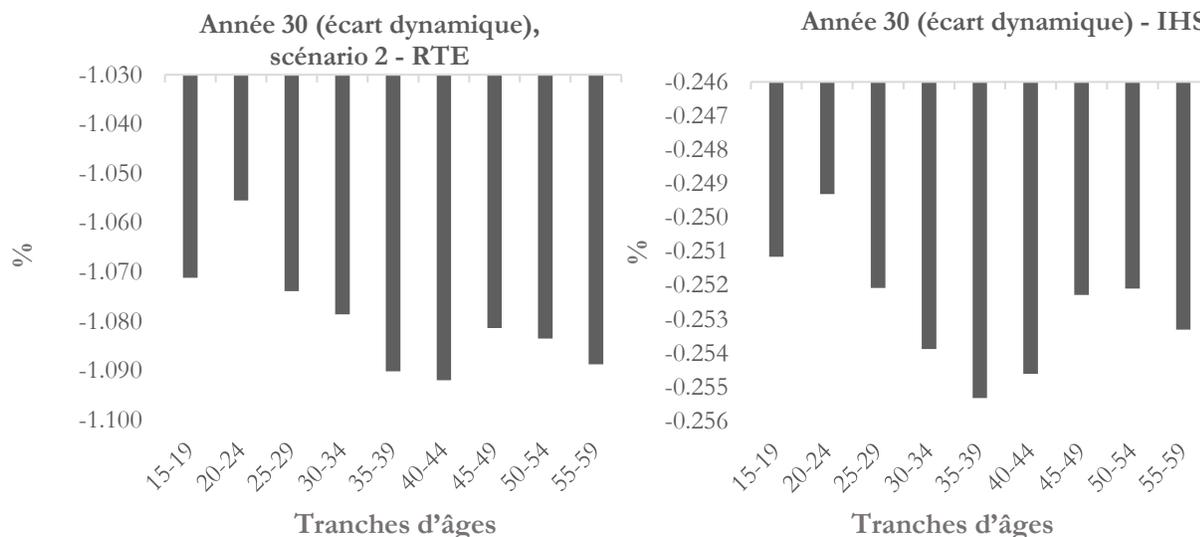
Graphique 42: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario (deuxième variante RTE) -financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges et à long terme

Comme dans le premier scénario de la première variante, le choc d'investissement est couplé à celui de la hausse de l'impôt générique sur le revenu (qui pénalise relativement plus les générations intermédiaires car concerne les revenus du travail) et donc il pénalise relativement plus les générations d'âges intermédiaires et plus âgées.

Toutefois, par rapport à la première variante, l'effet négatif du choc d'investissement est plus fort et donc l'effet négatif sur les revenus du capital est plus fort que dans la première variante. Or, on l'a vu dans la section des effets redistributifs de la première variante, les revenus du capital concernent surtout les générations âgées. C'est la raison pour laquelle la génération la plus touchée par ce choc (les 40-44 ans l'année 0, qui ont 40 à 74 ans sur la période considérée) est plus âgée que celle de la première variante (les 35-39 ans l'année 0, qui ont 65 à 69 ans sur la période considérée), car il s'agit d'une génération qui à l'année 0 a accumulée davantage de capital que la génération immédiatement suivante (et âgée de 35-39 ans à l'année de base).

3.2. Second scénario

Tout comme dans le premier scénario, à long terme (l'année 30), la cohorte dont les individus sont âgés de 70 à 74 est la plus impactée (soit les 40-44 ans l'année 0). Cet effet est illustré dans le graphique 44.



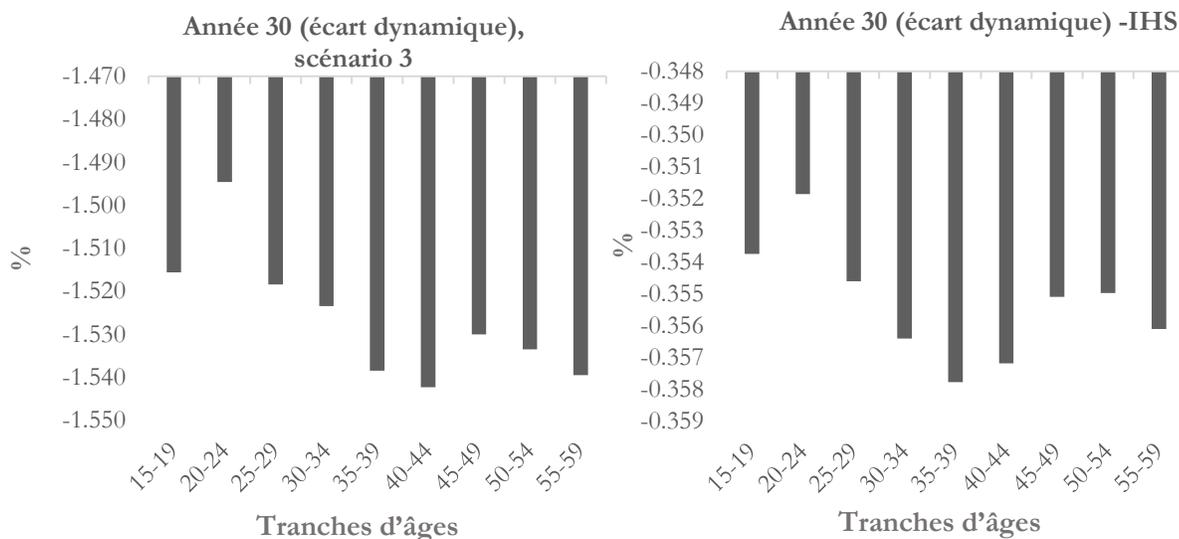
Sources : Résultats du modèle (second scénario).

Graphique 43: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges et à long terme, dans le scénario RTE et celui d'IHS Markit

Tout comme dans le premier scénario, par rapport à la première variante, l'effet négatif du choc d'investissement est plus fort et donc l'effet négatif sur les revenus du capital est plus fort que dans la première variante. C'est la raison pour laquelle la génération la plus touchée par ce choc est un peu plus plus âgée que celle de la première variante.

3.3. Troisième scénario

Dans le troisième scénario, par rapport à la première variante, l'effet sur les revenus du capital est aussi plus significatif. Tout comme dans le premier et le second scénario, à long terme (l'année 30), la cohorte dont les individus sont âgés de 70 à 74 sont les plus impactés (soit les 40-44 ans l'année 0). Cet effet est illustré dans le graphique.



Sources : Résultats du modèle (troisième scénario).

Graphique 44: Consommation en écart dynamique par rapport au scénario baseline dans les trois scénarios -, par tranche d'âges et à long terme, dans le scénario RTE et celui d'IHS Markit

Tout comme dans les autres scénarios, par rapport à la première variante, l'effet négatif du choc d'investissement est plus fort et donc l'effet négatif sur les revenus du capital est plus fort que dans la première variante. C'est la raison pour laquelle la génération la plus touchée par ce choc est plus âgée que celle de la première variante.

Toute comme dans le scénario précédent, l'effet de la réduction de la valeur ajoutée l'emporte sur l'effet prix (baisse des salaires réels, déflatés par le prix de la valeur ajoutée) bien que l'effet soit moindre que dans le second scénario (car le choc de prix pour les entreprises est moins élevé).

CHAPITRE 4 : TESTS DE SENSIBILITÉ ET VARIANTES

Les données exogènes du modèle sont soit des paramètres comportementaux ou des paramètres liés à la technologie de production. Dans la section précédente, nos premières simulations avec notre première trajectoire d'investissements (tiré des chiffreages de IHS Markit) montraient que quelle que soit la modalité de financement, l'impact est défavorable pour la croissance. On note que dans cette première série de simulations, le premier scénario (dette publique mobilisée pour financer les investissements électriques bas carbone, partiellement remboursée sous forme de hausse de l'impôt sur le revenu à moyen terme) est le scénario dont l'impact négatif sur l'économie est relativement plus faible. Au contraire, le second scénario (financement par les entreprises sous forme de hausse du prix de l'énergie) est relativement plus défavorable.

Dans notre deuxième série de simulations (variante tirée du chiffreage de RTE), au contraire, c'est le troisième scénario - financement par les entreprises et les ménages - qui est le plus négatif sur l'activité économique. Ce résultat nous révèle que la sensibilité à une hausse du prix de l'énergie est plus forte pour les ménages que pour les entreprises, et que cette hausse du prix de l'énergie pour les ménages a un effet relativement plus récessif sur l'activité économique.

Pour tester la robustesse de ce résultat, nous réalisons des tests de sensibilité (sur la valeur d'un paramètre) sur notre premier scénario.

Ainsi, différents tests sont réalisés sur différentes valeurs de paramètres et présentés dans six sous sections. La première réalise des tests de sensibilité sur les élasticités de substitution dans les fonctions de production et de consommations intermédiaires. La seconde réalise un test de sensibilité sur l'élasticité de l'offre de travail au salaire. La troisième réalise un test de sensibilité sur le progrès technique. La quatrième réalise des tests de sensibilité sur une hausse du prix de l'énergie (pour les ménages ou pour les entreprises). La cinquième réalise un test de sensibilité sur la part des ménages classiques (vs non-classiques). La sixième réalise des tests de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette. Ainsi, une variante effectuera une échéance plus précoce (à cinq ans après le choc) et une deuxième effectuera une échéance plus tardive (20 ans après le choc).

Tous les tests de robustesse sont réalisés sur le premier scénario (investissements électriques bas carbone financés sous forme de dette publique remboursée partiellement à moyen terme sous forme de hausse de l'impôt sur le revenu). Enfin, la dernière sous-section réalise un test de sensibilité sur le taux d'intérêt réel.

On note des paramètres pour lesquels le modèle est plutôt robuste, tels qu'une variation (positive ou négative) de 0.1 point de l'élasticité de substitution entre énergie et consommations intermédiaires dans la fonction de consommations intermédiaires, ou une augmentation de 1% du prix de l'énergie pour les entreprises - pour rappel, cette hausse est en supplément de la hausse initiale du prix de gros associée à la trajectoire d'investissements bas carbone de notre premier scénario-.

Le modèle est aussi plutôt robuste à un changement dans l'échéance de remboursement (qui est calibrée pour correspondre au même montant de remboursement que dans le premier scénario) et à la part des ménages classiques dans le modèle.

Au contraire, le modèle est relativement plus sensible à une augmentation de l'élasticité de substitution entre valeur ajoutée et consommations intermédiaires dans la fonction de production où l'on passerait d'une complémentarité à une substitution entre les deux facteurs (passage de 0.1 à 0.5). Une variante avec une élasticité de substitution entre valeur ajoutée et consommations intermédiaires dans la fonction de production de 0.5 peut être justifiée de la façon suivante : on peut imaginer que dans un scénario de forte décarbonation, il est nécessaire de découpler la croissance économique des consommations intermédiaires (énergie, matières premières et autres consommations intermédiaires), ce qui nécessiterait une forte substitution entre valeur ajoutée et consommations intermédiaires.

Le modèle est aussi sensible à une augmentation de l'élasticité de l'offre de travail au salaire (fixée à 0.5). Les tableaux suggèrent que le modèle est sensible -ce qui est relativement intuitif - à une augmentation du progrès technique de 1% par rapport au premier scénario (donc passage de 1 à 2% de croissance du progrès technique), à une hausse du prix de l'énergie pour les ménages de 1% - pour rappel, cette hausse est en supplément de la hausse initiale du prix de gros associée à la trajectoire d'investissements bas carbone de notre premier scénario-, et à une hausse du taux d'intérêt réel (de 3%).

Tous les résultats sont à interpréter en différence par rapport au premier scénario. Ainsi, il est important de rappeler que la lecture des résultats a nécessité deux étapes de calculs. En effet, dans un premier temps, on calcule l'écart dynamique par rapport au baseline de la variante. Puis l'on compare cette valeur avec celle obtenue dans le premier scénario (différence des deux valeurs).

1. Test de robustesse sur les élasticités de substitution dans les fonctions de production et de consommations intermédiaires

Nous réalisons un test de robustesse sur l'élasticité de substitution entre l'énergie et les autres consommations intermédiaires dans la fonction de consommations intermédiaires et sur l'élasticité de substitution entre la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires dans la fonction de production.

Les dynamiques de production, du capital, tout comme les effets redistributifs sont légèrement modifiés en cas de valeur basse ou haute des élasticités de substitution. Plus précisément, les tests ont été effectués sur deux élasticités de substitution - celle qui est dans la fonction de consommations intermédiaires et celle qui est dans la fonction de production. Les résultats sont négatifs par rapport au premier scénario lorsque l'on diminue l'élasticité de substitution de 0.1 point (de 0.5 à 0.4) et positifs par rapport au baseline lorsque l'on augmente l'élasticité de substitution de 0.1 point (de 0.5 à 0.6) ou de 0.4 point (lorsque l'on passe d'une complémentarité à une substitution entre la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires totales). En effet, lorsque l'on augmente l'élasticité de substitution, on permet plus de flexibilité dans la mesure où les facteurs de production sont davantage substituables entre eux. Ainsi, lorsque l'élasticité de substitution entre la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires augmente de 0.4 point (de 0.1 à 0.5), ou que l'élasticité de substitution entre l'énergie et les consommations intermédiaires augmente de 0.1 (de 0.5 à 0.6), cela veut dire que l'entreprise a la possibilité d'utiliser davantage le facteur de production le moins cher. Ainsi, l'entreprise optimise son coût, lui permettant ainsi de produire davantage à moindre coût.

Tous les chiffres des tableaux suivants sont à interpréter en différence par rapport aux résultats du premier scénario (chaque résultat étant eux même en écart dynamique par rapport au scénario baseline).

Tableau 22: Résultats (différence entre écarts au baseline) des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 0.1 point de l'élasticité de substitution entre énergie et consommation intermédiaire dans le premier scénario.

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consom ma tion 15- 34	Consom a tion 35- 59	Consom ma tion 60- +
Elasticité de substitution entre énergie et consommation intermédiaire (Valeur de base: 0.5)								
5 ans	0.4	-0.01	-0.01	0.00	0.05	0.00	-0.01	-0.01
10 ans	0.4	-0.01	-0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
30 ans	0.4	-0.02	-0.03	0.02	0.02	-0.01	-0.01	- 0.01
5 ans	0.6	0.01	0.01	0.01	-0.05	0.00	0.01	0.00
10 ans	0.6	0.01	0.01	0.01	-0.04	0.00	0.00	0.00
30 ans	0.6	0.02	0.03	0.03	-0.02	0.01	0.01	0.01

Dans le cas d'une baisse de l'élasticité de substitution de 0.1 point entre l'énergie et les autres consommations intermédiaires dans la fonction de consommations intermédiaires, on obtient une hausse de la demande d'énergie et une diminution des autres consommations intermédiaires, ce qui mène à une baisse des consommations intermédiaires. Cette baisse diminue la production et face à une moindre flexibilité dans les possibilités de substitution entre consommations intermédiaires, les coûts de production augmentent pour les entreprises qui vont diminuer les salaires, ce qui diminue la consommation et donc l'offre de travail. La demande de capital des entreprises diminue également. Ainsi, l'effet négatif est aussi observé sur la consommation des ménages avec la hausse des prix à la consommation et la baisse des revenus du travail.

Dans le cas d'une hausse de l'élasticité de substitution de 0.1 point entre l'énergie et les autres consommations intermédiaires dans la fonction de consommations intermédiaires, au contraire, on obtient une hausse de la valeur ajoutée. Le bénéfice est aussi observé au niveau des ménages dans la mesure où l'on observe une faible hausse de leur consommation avec la baisse des prix à la consommation et la hausse des revenus du travail.

Tableau 23: Résultats des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 0.4 point de l'élasticité de de substitution entre valeur ajoutée et consommation intermédiaire dans le premier scénario

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consom ma tion 15- 34	Consom a tion 35- 59	Consom ma tion 60- +
Elasticité de substitution entre énergie et consommation intermédiaire (Valeur de base: 0.1)								
5 ans	0.5	0.07	0.09	0.05	-0.16	-0.02	0.08	0.05
10 ans	0.5	0.09	0.15	0.04	-0.16	0.02	0.04	0.03
30 ans	0.5	0.47	0.81	0.15	0.03	0.12	0.13	0.13

Dans le cas d'une hausse de l'élasticité de substitution de 0.4 point entre la valeur ajoutée et les consommations intermédiaires dans la fonction de consommations intermédiaires, la plus grande flexibilité dans les possibilités de substitution entre consommations intermédiaires et valeur ajoutée entraîne une baisse des coûts de production et une baisse des prix à la consommation pour les ménages. On obtient une hausse de la valeur ajoutée de 0.07 et 0.09 point par rapport au premier scénario à court et moyen terme et une hausse de 0.47 point à long terme. Pour les ménages, on obtient une hausse de la consommation permise par la baisse des prix à la consommation et la hausse des revenus du travail (hausse des salaires et du travail). Cette hausse de la consommation favorise légèrement plus les générations intermédiaires qui sont plus sensibles à une hausse des revenus du travail (effet dominant).

2. Tests de robustesse sur l'élasticité de l'offre de travail au salaire

L'élasticité de l'offre de travail au salaire apparaît dans l'équation suivante :

$$\log(l_{s,t}) = \log(c_{s,t}) + elast * \log(w_{s,t}(1 - taux)/pc_{s,t})$$

Avec $l_{s,t}$ qui représente l'offre de travail des ménages, $w_{s,t}(1 - taux)$ qui représente les salaires nets des cotisations à la charges des employés et $pc_{s,t}$ qui représente les prix à la consommation. On note que le modèle est très sensible à une variation de l'élasticité de l'offre de travail au salaire réel. Ainsi, l'augmentation l'élasticité de l'offre de travail est accompagnée d'une diminution des salaires réels et des prix réels à la consommation à long terme. La baisse des prix réels à la consommation à long terme augmente la consommation des ménages. L'effet de hausse de la consommation des ménages (qui augmente l'offre de travail) est plus fort que l'effet de baisse des salaires réels (déflaté par les prix à la consommation) qui est très faible, quasiment nul, et qui diminue l'offre de travail (effet substitution). Ainsi, la hausse de l'élasticité de l'offre de travail au salaire entraîne un effet revenu car au final, l'offre de travail augmente (avec la hausse de la consommation).

Tableau 24: Résultats des tests de robustesse sur le modèle d'équilibre général pour une variation de 1 point de l'élasticité de l'offre de travail au salaire

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consom ma tion 15- 34	Consom a tion 35- 59	Consom ma tion 60- +
Elasticité de l'offre de travail au salaire (valeur de base :0)								
5 ans	1	0.01	0.07	0.0	-0.42	-0.06	0.09	0.05
10 ans	1	0	0.04	-0.07	-0.52	-0.01	0.01	0.01
30 ans	1	0.5	0.9	0.17	-0.08	0.08	0.08	0.08

3. Tests de robustesse sur le progrès technique (hausse de 1%)

Une augmentation du progrès technique de 1% entraîne une baisse des coûts de production et donc une hausse de la valeur ajoutée (de 0.5 point à court terme, moyen terme et long terme). Les entreprises vont donc accroître l'offre de travail et leur demande de capital.

La productivité marginale du capital augmente donc aussi de 0.5 par rapport au premier scénario (financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu).

Au niveau des ménages, la consommation augmente aussi de 0.5 point pour toutes les générations, quel que soit l'horizon temporel.

Tableau 25: Résultats des tests de robustesse supplémentaires sur le modèle d'équilibre général³⁴

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consommation 15-34	Consommation 35-59	Consommation 60+
Progrès technique (Valeur de base: 1%)								
5 ans	2%	0.50	0.50	0.51	0.50	0.00	0.00	0.00
10 ans	2%	0.50	0.50	0.51	0.50	0.00	0.00	0.00
30 ans	2%	0.50	0.49	0.52	0.49	0.00	0.00	0.00

³⁴ Tous les chiffres sont à interpréter en comparaison par rapport au premier scénario.

4. Tests de robustesse sur le prix de l'énergie pour les entreprises et les ménages

Tableau 26: Résultats d'une augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu³⁵

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consom ma tion 15- 34	Consom a tion 35- 59	Consom ma tion 60- +
Augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises								
5 ans	+1%	-0.10	0.026	0.00	-1.08	-0.01	0.00	0.00
10 ans	+1%	-0.10	0.02	0.010	-1.08	0.00	0.00	0.00
30 ans	+1%	-0.02	0.050	0.02	-1.08	0.00	0.00	0.00

Le modèle est sensible à l'augmentation du prix de l'énergie pour les entreprises. En effet, le tableau montre les résultats dans le cas d'une hausse de 1% - hausse par rapport au premier scénario de financement des investissements électriques bas carbone sous forme de dette publique et de hausse de l'impôt sur le revenu à moyen terme -. La hausse du prix de l'énergie pour les entreprises entraîne la baisse de leur demande d'énergie. La forte diminution de la demande d'énergie (-1.08 point en moyenne sur la période) est partiellement compensée par une faible augmentation de la demande de capital (0.01 en moyenne sur la période, permise par la baisse du prix réel de l'investissement) et par la faible augmentation de l'offre de travail (0.01 point en moyenne sur la période) malgré la baisse des salaires réels (effet revenu dominant). Toutefois l'effet de la baisse des consommations intermédiaires (due à la baisse de la demande d'énergie) a un effet récessif sur l'activité économique. Ainsi, la valeur ajoutée diminue de 0.01 point en moyenne sur la période. La hausse des revenus du capital compense la baisse des revenus du travail, ce qui stabilise la consommation.

³⁵ Tous les chiffres sont à interpréter en comparaison par rapport au scénario Baseline – La période post-choc correspond à la période de l'année 4 (le choc a lieu l'année 3) à l'année 33 (dernière année du modèle).

Tableau 27: Résultats d'une augmentation du prix de l'énergie pour les ménages sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu³⁶

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consommation 15-34	Consommation 35-59	Consommation 60+
Augmentation du prix de l'énergie pour les ménages								
5 ans	+1%	-0.19	-0.18	-0.13	-0.15	0.04	-0.25	-0.14
10 ans	+1%	-0.24	-0.35	-0.11	-0.16	-0.07	-0.14	-0.12
30 ans	+1%	-1.33	-2.16	-0.46	-0.84	-0.49	-0.48	-0.49

Le modèle est sensible à l'augmentation du prix de l'énergie pour les ménages. En effet, dans le cas d'une hausse de 1%, la hausse du prix à la consommation d'énergie pour les ménages entraîne la hausse du prix à la consommation total (0.2 point en moyenne sur la période), ce qui diminue la consommation des ménages (-0.2 point en moyenne sur la période). La diminution de la demande des ménages diminue la valeur ajoutée, s'en suit une diminution de tous les facteurs.

Si le capital diminue, le prix réel de l'investissement augmente donc la baisse des revenus du capital est limitée. Au contraire, la demande de travail et les salaires réels (déflatés par le prix à la consommation) diminuent, ce qui diminue les revenus du travail.

Si les jeunes sont plus sensibles à une augmentation des prix, les générations intermédiaires sont plus sensibles à l'effet négatif sur les revenus du travail (baisse des salaires et de la demande de travail). Ainsi, à court terme et moyen terme, ce sont les individus d'âges intermédiaires qui sont les plus pénalisés par le choc.

En moyenne sur la période, ce sont les générations intermédiaires et plus âgées qui sont les plus pénalisées par le choc (avec la baisse des revenus du travail et du capital) avec une baisse de leur consommation de -0.27 en moyenne sur la période (toujours en écart par rapport au premier scénario).

³⁶ Tous les chiffres sont à interpréter en comparaison par rapport au scénario Baseline – La période post-choc correspond à la période de l'année 4 (le choc a lieu l'année 3) à l'année 33 (dernière année du modèle).

5. Test de robustesse sur la part des ménages classiques (vs non-classiques)

Tableau 28: Résultats d'un test de robustesse sur la part des ménages non-classiques sur le modèle d'équilibre général dans le premier scénario -financement par dette publique et par hausse de l'impôt sur le revenu ³⁷

Génération	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49
Écart dynamique en moyenne sur la période (valeur testée +0.4 point)							
	-0.7	-0.1	0	-0.2	-0.2	0	0
Génération	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85+
Écart dynamique en moyenne sur la période (valeur testée +0.4 point)							
	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Nous prenons l'hypothèse d'un taux de pauvreté qui augmente de 0.4 point de pourcentage pour chaque génération (ce qui est équivalent en moyenne de la population à un taux de pauvreté en conditions de vie qui passe de 11% à 15%). Ainsi, la consommation dépend davantage du revenu disponible net (qui détermine la consommation des ménages pauvres, contrairement à celle des ménages riches qui dépend de la richesse).

En moyenne sur la période, l'effet est surtout élevé pour les ménages qui ont le taux de pauvreté le plus élevé (les ménages les plus jeunes, qui sont âgés de 15 à 19 ans).

³⁷ Tous les chiffres sont à interpréter en comparaison par rapport au scénario Baseline – La période post-choc correspond à la période de l'année 4 (le choc a lieu l'année 3) à l'année 33 (dernière année du modèle).

6. Test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette

Tableau 29 : Résultats (en différence par rapport au premier scénario) du test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette à 5 ans après le choc

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consommation 15-34	Consommation 35-59	Consommation 60+
Remboursement de la dette cinq ans après le choc (Valeur de base : 0.55%)								
5 ans	0%	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
10 ans	0.46%	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.02	-0.01
30 ans	0.46%	0.00	-0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00

D'autres tests de robustesse permettent d'étudier l'impact d'un changement dans le délai de remboursement de la dette publique du premier scénario, fixé à dix ans après le choc dans le premier scénario. Dans les deux cas, l'effet est contenu sur les variables macroéconomiques (changement dans les résultats à un millièm).

Dans ce scénario, tout comme dans le scénario de remboursement à 10 ans, le montant de l'endettement pour financer les investissements bas carbone n'est pas intégralement remboursé dans la période considérée (67% seulement). Plus précisément, dans le premier scénario, on a appliqué un choc de hausse de l'impôt sur le revenu 10 ans après le choc d'investissement équivalent à 8.31 milliards d'euros (montant annuel moyen des investissements sur la période, équivalent à un choc annuel de 0.4% du PIB). Il s'agit d'un calcul en amont, qui permet d'obtenir à la fin de la période, un remboursement de 67% du montant initial, car il s'agit d'un remboursement partiel.

Dans le cas de ce test de sensibilité, on a appliqué un choc de financement permettant d'atteindre le même montant de financement par les agents privés à la fin de la période. Ainsi, le choc étant appliqué dès la cinquième année post-choc (l'année 8), le choc de financement est appliqué plus tôt que dans le scénario 1 (où il est appliqué l'année 13) mais est moins fort -car plus étendu dans le temps-.

À partir du choc, on note que l'effet est neutre ou faiblement négatif sur l'activité et la consommation des ménages.

Tableau 30 : Résultats (en différence par rapport au premier scénario) du test de robustesse sur l'échéance de remboursement de la dette à 20 ans après le choc

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée	Capital	Travail	Energie	Consommation 15-34	Consommation 35-59	Consommation 60+
Remboursement de la dette vingt ans après le choc (Valeur de base : 0.55%)								
5 ans	0%	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.01
10 ans	0%	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
30 ans	1.1%	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	-0.01	0.00

Dans la deuxième situation (échéance de remboursement fixée à 20 ans après le choc d'investissement), avant la 24^e année, les agents n'ayant pas de coût de financement mais seulement les effets de la trajectoire d'investissement et du prix de gros associé, ont pu accumuler davantage de revenus du capital et du travail par rapport au premier scénario (financement au bout de 10 ans après le choc). Ainsi, ce scénario est plus avantageux au niveau de l'activité.

Contrairement au premier scénario, la plupart des générations intermédiaires et plus âgées ont eu le temps d'accumuler davantage de revenus du travail (car l'impôt sur le revenu intervient plus tard). Toutefois, à court terme, les jeunes sont (légèrement) plus pénalisés par rapport au premier scénario car l'effet négatif concerne seulement la hausse des prix (qui touche davantage les jeunes) et non pas la baisse des revenus du capital et du travail (qui concerne les générations plus âgées).

Au contraire, après le choc, l'effet est négatif sur la consommation des générations intermédiaires qui sont davantage touchées par un choc sur les revenus du travail (avec l'impôt sur le revenu).

On note que l'effet est neutre ou faiblement positif sur l'activité et la consommation des ménages.

Toutefois, pour ce deuxième test de sensibilité, une lecture fine (à plusieurs décimales) montre que les effets macroéconomiques sont légèrement plus positifs que dans le premier scénario où le remboursement a lieu plus tôt (+0.01 point en moyenne sur la période).

Il est important de noter que cette variante repose, comme toutes vos variantes, sur l'hypothèse de taux d'intérêt de la dette exogène et fixe.

7. Test de robustesse sur le taux d'intérêt réel

sTableau 31: Résultats (en écart dynamique par rapport au baseline) du test de robustesse d'une hausse du taux d'intérêt

Année	Valeur testée	Valeur ajoutée S1	Valeur ajoutée S2	Valeur ajoutée S3	Consommation S1	Consommation S2	Consommation S3
Valeur de base du taux d'intérêt réel sur la dette : 0.6%							
5 ans	+3%	0.60	0.57	0.62	0.83	0.81	0.69
10 ans	+3%	0.57	0.54	0.60	0.86	0.84	0.73
30 ans	+3%	-0.09	-0.16	-0.11	0.66	0.64	0.53
Année	Valeur testée	Capital S1	Capital S2	Capital S3	Offre de travail S1	Offre de travail S2	Offre de travail S3
Valeur de base du taux d'intérêt réel sur la dette : 0.6%							
5 ans	+3%	0.16	0.27	0.54	0.83	0.81	0.79
10 ans	+3%	0.05	0.15	0.41	0.86	0.84	0.73
30 ans	+3%	-1.11	-1.09	-0.86	0.66	0.64	0.53
Année	Valeur testée	Salaires réels (déflaté par le prix de la valeur ajoutée) dans S1		Salaires réels (déflaté par le prix de la valeur ajoutée) dans S2		Salaires réels (déflaté par le prix de la valeur ajoutée) dans S3	
5 ans	+3%	-0.75		-0.70		-0.38	
10 ans	+3%	-0.85		-0.82		-0.51	
30 ans	+3%	-1.66		-1.68		-1.40	

CROISSANCE

Pour obtenir ce chiffrage, nous avons repris les simulations des premiers scénarios et nous avons ajouté une augmentation du taux d'intérêt réel de 3%.

On constate que si les taux d'intérêt augmentent, dans les trois scénarios, l'effet sur la valeur ajoutée est positif à court terme par rapport au baseline mais devient négatif à long terme. Face à une hausse du taux d'intérêt, le coût du

capital augmente (hausse du coût d'usage) entraînant une diminution du stock de capital (dans les trois scénarios). En effet, dans notre modèle, il n'existe pas de rigidité sur les coûts des facteurs de production. Donc en réaction, le coût du travail augmente moins rapidement (il diminue par rapport au baseline) et la quantité de travail augmente. En somme, la hausse du travail en volume compense la baisse du capital et explique la hausse de la valeur ajoutée à court terme (on a une substitution capital-travail). À long terme, l'effet défavorable sur l'accumulation domine (comme le montre le tableau 31, pour l'année 30, où l'écart négatif atteint respectivement -1.11%, -1.09%, et -0.86% en écart au Baseline pour les scénarios 1 2 et 3 respectivement).

En moyenne sur la période, c'est le scénario 3 (financement par les ménages et les entreprises) qui devient le plus avantageux. Pour rappel, dans la variante principale, c'était le scénario 1 (financement partiel par dette et par une hausse de l'impôt sur le revenu à moyen terme) qui était le moins désavantageux. Or, lorsque l'on augmente les taux d'intérêt de 3%, la valeur ajoutée augmente relativement plus dans le scénario 3.

Dans le scénario 1, les salaires diminuent davantage par rapport au baseline (ce qui avantage les entreprises), le travail augmente lui aussi davantage. Le coût d'usage du capital augmente davantage dans le scénario de financement partiel par dette et le capital diminue aussi davantage dans ce scénario 1.

Dans le scénario 3, le volume d'emploi augmente relativement moins, la baisse des salaires est relativement moins forte que dans les autres scénarios, la hausse du coût d'usage est moins élevée que dans le premier scénario et en résulte une quasi-stabilité du capital en moyenne sur la période et en écart dynamique par rapport au baseline - alors que le capital diminue dans les autres scénarios.

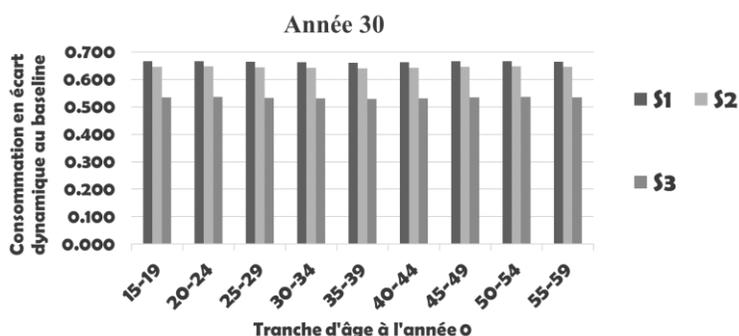
CONSOMMATION

La hausse des taux incite les ménages à réallouer leur consommation intertemporelle en faveur du présent, et donc à épargner moins sur l'ensemble de la période de simulation. Il y a une moindre accumulation du capital en volume et des revenus du travail plus dynamiques (liés à la hausse de l'emploi associée à une moindre progression des salaires).

On a donc une hausse de la consommation dans les trois scénarios - mais surtout dans le premier scénario car c'est le scénario où les prix à la consommation progressent relativement peu. Dans le premier scénario, la consommation augmente davantage car on n'a aucun signal prix carbone imposé aux entreprises (qui se répercutent sur les prix à la consommation), ni de taxe carbone pour les

ménages. Les effets positifs sur la consommation sont plus faibles dans le troisième scénario dans la mesure où ce scénario augmente la taxe carbone pour les ménages, ce qui n'est pas le cas dans les deux premiers scénarios. Les effets positifs sont aussi plus faibles dans le second scénario en comparaison au premier scénario car la hausse du prix de l'énergie pour les entreprises se répercute en partie sur les ménages (les entreprises ont moins de marge pour diminuer les prix, contrairement au scénario 1 sans signal prix carbone pour les entreprises).

EFFETS REDISTRIBUTIFS INTERGENERATIONNELS :



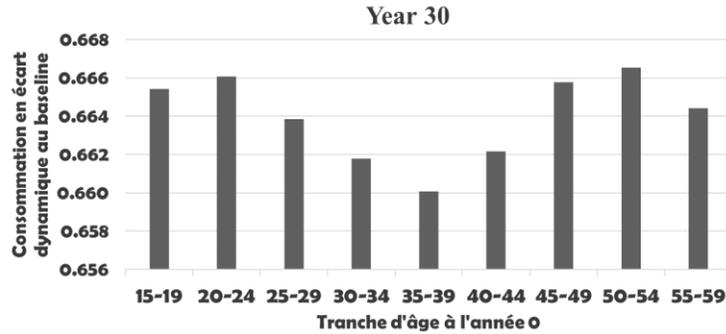
Sources : Résultats du modèle

Graphique 45: Consommation en écart dynamique dans les trois scénarios par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt réel de 3%

La consommation augmente relativement moins pour les générations qui sont relativement plus sensibles aux chocs sur les revenus du travail et du capital, soit les 35-39 ans.

Pour avoir une lecture plus fine, nous avons comparé le scénario de la variante principale avec le scénario postérieur à une hausse du taux d'intérêt. Il semble que dans les trois scénarios, la génération des 50-54 ans (à l'année 0) bénéficie d'une hausse de la consommation plus élevée (en écart dynamique par rapport au scénario de la variante principale). En effet, cette génération est censée accumuler les revenus du capital les plus élevés sur la période : ses revenus du capital augmentent dans la variante sur le taux d'intérêt.

Lorsque l'on observe la hausse de la consommation, dans tous les scénarios, elle est aussi relativement plus élevée pour les générations les plus jeunes (15-24) grâce à la baisse du coût du travail pour les entreprises qui relance l'emploi, ce dont ces générations vont bénéficier pendant toute leur vie active.



Sources : Résultats du modèle

Graphique 46: Consommation en écart dynamique dans le premier scénario -financement par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu-par rapport au scénario baseline , par tranche d'âges (à l'année 0) et à long terme, dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt réel de 3%

Les résultats de ce test de robustesse contribuent aussi à alimenter le débat lancé par O. Blanchard sur les implications intergénérationnelles supposées limitées en cas de financement par dette publique. Les résultats de la variante principale montraient que les effets redistributifs intergénérationnels défavorables étaient plus limités dans le cas d'un financement par dette publique ce qui semblait au moins partiellement confirmer la thèse de Blanchard, dans notre cadre précis d'une trajectoire d'investissements bas carbone dans le secteur électrique.

Or, les résultats de cette variante nous montrent que dans le cas d'une hausse du taux d'intérêt de 3%, c'est le financement conjoint par les entreprises et les ménages qui devient le plus avantageux au niveau agrégé, et avec des effets de redistribution intergénérationnelle qui favorisent relativement les jeunes actifs et les actifs proches de la retraite.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION SUR LE RECOURS À LA DETTE PUBLIQUE POUR FINANCER LES INVESTISSEMENTS ÉLECTRIQUES BAS CARBONE

Ce chapitre tire les principaux enseignements de la section résultats. *Les résultats semblent suggérer que des investissements bas carbone dans le secteur électrique financés par une dette publique remboursée à moyen terme sous forme de hausse d'un impôt générique, permet de réduire ces effets défavorables, comparé à un financement sous forme de hausse du prix de l'énergie pour les entreprises (scénario 2) ou de hausse du prix de l'énergie pour les entreprises et les ménages (scénario 3). Toutefois ce résultat est directement lié à l'évolution future des taux d'intérêt. S'ils augmentent par exemple de 3%, c'est le scénario 3 qui devient le plus avantageux en termes de croissance et de bien-être non environnemental, où les investissements bas carbone dans le secteur de l'électricité sont financés par des signaux-prix partagés entre les entreprises et les ménages.*

L'étude des impacts en termes de finances publiques révèle une détérioration de la situation budgétaire par rapport au scénario baseline dans la mesure où la hausse du coût de financement, l'effet d'éviction couplé à la hausse des prix de gros augmente la dette en pourcentage du PIB (par rapport au scénario de référence).

Dans cet exercice, il est important de noter que nous n'étudions qu'une partie des investissements nécessaires pour décarboner l'économie, à savoir les investissements du secteur de l'électricité uniquement. Nous n'étudions pas les investissements dans le secteur des transports et du bâtiment qui sont bien plus importants en termes de montants, et qui n'ont pas les mêmes caractéristiques - différence d'intensité capitalistique et différence dans les dynamiques intersectorielles entre autres- et peuvent donc apporter des résultats différents. Or, ces montants sont aussi nécessaires si la France souhaite atteindre son objectif de décarbonation d'ici 2050.

Le modèle montre qu'une hausse du progrès technique a des effets positifs sur le secteur productif et sur le bien-être (économique) des ménages. De fait, ces résultats pourraient plaider pour une

augmentation de la dette publique pour financer des investissements de recherche et de développement qui viseraient à atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050.

Sur les effets de chocs fiscaux

Landais et al (2010) montrent que les impôts sur la consommation et les cotisations sociales, sont globalement régressifs. Les impôts sur la consommation prélèvent près de 15 % des revenus des plus pauvres et à peine plus de 5 % de ceux des plus riches. Les cotisations sociales prélèvent 25 % des revenus les plus bas et moins de 5 % de ceux les plus élevés.

Dans notre modèle, nous trouvons que la hausse de l'impôt générique a un effet ³⁸ négatif sur les agents, qui est concentré sur ceux qui sont sous contrainte de liquidité. Ces ménages non-classiques ont une diminution plus forte de leur consommation en moyenne sur la période étudiée dans notre premier scénario -financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique par dette publique et par une hausse de l'impôt sur le revenu à moyen terme-.

Sur la dynamique de croissance en fonction de l'endettement public dans le modèle

Les résultats montrent que les conditions pour financer des investissements bas carbone dans le secteur électrique sans trop détériorer la croissance ni le bien-être des générations sont davantage réunies lorsque le financement se fait par dette publique, au moins quand les taux d'intérêt sont bas. Plus précisément, notre scénario de dette publique remboursée à moyen terme (sous forme de hausse de l'impôt générique) montre des effets défavorables plus contenus comparés aux autres scénarios de financement.

La littérature montre les effets de chroniques d'investissements dans le secteur de l'énergie avec des effets contenus en justifiant notamment ce résultat par la faible part de l'énergie dans l'économie (Kilian, 2008) ou l'importance du progrès technique dans les fluctuations de l'output (Kim et Loungani, 1992). La plupart de ces études négligent les évaluations quantitatives dans la mesure où cette littérature est essentiellement théorique (Dao and Dávila (2014)).

Aussi, une partie de la littérature étudie la possibilité d'une hausse de la taxe carbone dont les recettes permettraient à la fois un recyclage (pour limiter les effets nocifs et régressifs de la taxe) et une partie permettraient d'allouer les fonds vers des investissements bas carbone (Schwerhoff et al, 2017; Dam,

³⁸ Effet indirect à travers les effets de bouclage macroéconomique

2011). En revanche, aucun scénario n'envisage une intégralité des recettes de la taxe carbone destinée au financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique et dans nos scénarios, le recyclage de la taxe pour limiter son impact régressif n'est pas envisagé, ce qui rend ces études non directement comparables avec nos résultats.

Le recours temporaire à la dette publique creuse la dette en pourcentage du PIB. Bien que la baisse du PIB soit plus contenue dans ce scénario 1 comparé aux autres scénarios de financement (financement par une hausse du prix de l'énergie), la dette en pourcentage du PIB reste relativement plus élevée dans ce scénario.

Pour pouvoir se rapprocher davantage du scénario de dette publique de Blanchard (2019) et comparer nos résultats aux siens, une des variantes dans nos tests de sensibilité visait à rembourser la dette à long terme. Ainsi, les investissements bas carbone dans le secteur électrique sont partiellement financés par dette publique, remboursée (73% du montant) en fin de période sous forme de hausse de l'impôt générique. On constate, tout comme Blanchard, en moyenne sur la période, que le financement par dette publique au bout de 20 ans a des effets sur l'activité moins défavorables par rapport au scénario avec remboursement de la dette au bout de 10 ans, sous l'hypothèse de taux quasi-nuls comme le montre notre variante principale.

On voit dans le graphique que l'effet de la dette sur l'activité économique devient négatif à partir de la vingt-quatrième année, qui correspond au début de la période de refinancement dans la variante. Les effets sur le bien-être sont aussi plus avantageux (bien que l'effet positif soit contenu) mais cachent des disparités. En effet, en fin de période, ce scénario désavantage davantage les générations intermédiaires (35-59 ans).

Dans le modèle, une taxe carbone pèse relativement plus sur le bien-être des ménages jeunes

Dans notre troisième scénario, la taxe carbone s'ajoute au signal prix carbone payé par les entreprises. Ce scénario est proche de la situation présente où généralement la fiscalité de l'énergie est partagée entre ménages et entreprises.

Dans tous les scénarios, l'effet négatif de la baisse du capital et des salaires domine sur les revenus, la richesse et la consommation des ménages. Toutefois, dans notre troisième scénario, la hausse de la taxe carbone est telle que la hausse des prix à la consommation est relativement plus importante dans ce troisième scénario. Au final, comme Gonand et Jouvét (2015), l'effet prix pénalise davantage les jeunes (voir justification détaillée dans la partie sur les effets redistributifs intergénérationnels).

En termes de politique publique, une partie de la littérature discute le choix de politiques publiques en fonction de l'intérêt du décideur politique pour l'efficacité ou l'équité (Howarth, 1998; Metcalf, 1999; Parry and Williams III, 2010) ou en fonction de leur volonté de privilégier une génération plutôt qu'une autre. Gonand (2018) montre par exemple que si le décideur politique est sensible à l'équité intergénérationnelle, il devrait opter pour des transferts forfaitaires plutôt que pour une baisse de l'impôt sur le revenu des agents.

Au contraire, si le décideur politique privilégie les critères d'efficacité économique, il a intérêt à diminuer l'impôt sur le revenu des agents. Roach (2021) plaide pour un recyclage sous forme de transferts forfaitaires qui diminuerait le poids supporté par les ménages plutôt qu'une diminution de l'impôt sur le revenu. En utilisant un modèle d'équilibre général dynamique (Imaclim) dans le but d'étudier les effets de différents types de recyclage de la taxe carbone, Combet et Méjean (2017) montrent que les transferts forfaitaires atténuent l'effet des chocs de prix de l'énergie sur la consommation des ménages.

Toutefois, notre exercice de simulation montre que si le décideur politique souhaite favoriser (ou moins pénaliser) les jeunes générations, le niveau de la taxe carbone devrait être contenu. Au-delà des générations jeunes, on constate bien que, en moyenne pour toutes les générations, ce scénario n'est pas le plus avantageux en termes de bien-être car le niveau de consommation est relativement plus faible dans ce scénario, quel que soit l'horizon temporel considéré (court terme, moyen terme, long terme).

L'influence du progrès technique sur la croissance et le bien-être des ménages

Dans les tests de robustesse, on teste l'influence d'une hausse du progrès technique de 1 point de pourcentage. On note que l'effet est positif, aussi bien au niveau des effets macroéconomiques, qu'au niveau des effets redistributifs intergénérationnels.

Ainsi, on en conclut que, dans un contexte où le progrès technique serait supérieur, les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels négatifs du financement des investissements bas carbone électriques pourraient être plus contenus (résultat de notre test de sensibilité), ou devenir positifs dans le cas d'une hausse plus importante du taux de progrès technique (hausse supérieure de 1%).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse apporte un éclairage sur les effets redistributifs intergénérationnels de différentes modalités de financement des investissements bas carbone dans le secteur électrique en France, à l'horizon 2050.

Divers scénarios de financement d'investissements bas carbone, sont considérés, prenant en compte plusieurs secteurs et différentes générations d'agents. Ainsi, les investissements privés dans le secteur électrique sont soit financés par de la dette publique, remboursée ultérieurement par une hausse de l'impôt sur le revenu sur les agents privés (scénario 1), soit par un signal prix du carbone pour les entreprises uniquement (scénario 2), soit par un signal prix du carbone pour les entreprises et les ménages (scénario 3).

Les résultats montrent que de tels montants d'investissements de transition énergétique dans le secteur électrique uniquement pèsent sur l'activité économique et le bien-être non-environnemental des différentes générations. Le principal canal de transmission macroéconomique de nos simulations est la demande d'énergie (des ménages et des entreprises) via un effet à la hausse sur le prix relatif des énergies. L'effet favorable de la hausse des investissements bas carbone dans le secteur de l'énergie est aussi compensé par un effet d'éviction dans les autres secteurs, qui subissent une baisse de leurs investissements.

Si les effets sont défavorables pour l'activité économique et la consommation des ménages, ils diffèrent toutefois d'un mode de financement à l'autre.

Concernant les effets redistributifs intergénérationnels, les résultats suggèrent que les effets sont généralement plus préjudiciables aux générations d'âges intermédiaires et âgées, principalement parce que l'effet du choc sur les revenus du capital et du travail domine l'impact sur les prix. En effet, dans tous les scénarios, les revenus du capital et du travail diminuent. Si dans le premier scénario, c'est la hausse de l'impôt générique qui explique cette baisse des revenus du travail, dans les deux autres scénarios, c'est la hausse du coût pour les entreprises qui se transmet par une baisse des revenus du travail pour les ménages (baisse des salaires).

Le choc sur les revenus du capital concerne davantage les 55-74 ans. Son effet se cumule à l'effet sur les revenus du travail (qui concerne davantage les 45-59 ans), et un effet prix de moindre ampleur (qui impacte différemment les générations mais qui, en soi, pénalise davantage les jeunes).

Dans les trois scénarios de notre variante principale, l'impact le plus important sur le bien-être non environnemental des ménages concerne principalement la cohorte d'âge 35-39 ans à l'année 0 (soit, ici, en 2017) qui auront 65-69 ans l'année 30. Dans le scénario N03, ce sont surtout les individus âgés de 40 à 44 ans à l'année 0 (qui auront 70-74 ans l'année 30), qui sont les plus impactés - l'effet négatif sur les revenus du capital est en effet plus élevé que dans la première variante-.

Les résultats suggèrent aussi que l'effet prix plus élevé dans le troisième scénario a des effets plus importants sur les jeunes et les générations futures, car l'effet défavorable sur les prix à la consommation les pénalise davantage.

Si le deuxième scénario impacte plus fortement la consommation des ménages sous contrainte de liquidité (car l'impact sur les revenus du capital et du travail est plus fort), le troisième scénario est celui qui pénalise le plus les ménages classiques car ce scénario diminue davantage le volume de la consommation (quand les taux d'intérêt sont bas).

Sous l'hypothèse que les taux d'intérêt restent très bas, les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels sont relativement plus atténués lorsque les investissements à faible intensité de carbone sont financés par de la dette publique - même si les générations futures la remboursent. Au contraire, les effets négatifs sur l'activité économique sont plus élevés dans le second scénario dans la mesure où le signal prix carbone appliqué aux entreprises est plus élevé.

Il est intéressant de constater que lorsque l'on considère le scénario N03 de RTE qui compte une trajectoire d'investissements plus ambitieuse (avec un montant annuel moyen de 19.25 milliards d'euros par an sur la période), en moyenne sur la période et en écart au baseline, le troisième scénario - financement par les entreprises et les ménages- devient le plus défavorable sur l'activité économique (alors que dans la première variante il s'agissait du second scénario de financement par les entreprises uniquement). Ceci s'explique par le fait que la hausse des prix de l'énergie est sensible, car la hausse du prix de l'énergie pour les ménages a un effet relativement plus récessif sur l'activité économique

Si la remontée des taux d'intérêt se confirme à l'avenir – ce que les mouvements de politique monétaire du courant de l'année 2022 suggèrent singulièrement -, l'accumulation du capital ralentit et pèse sur la croissance. L'effet est plus défavorable dans le scénario 1 avec financement des investissements par de la dette publique, et c'est le scénario où la transition bas carbone dans le secteur électrique est financée sans dette mais par des signaux-prix conjointement sur les entreprises et les ménages qui permet de

limiter davantage les effets défavorables de la transition sur la croissance et le bien-être non environnemental.

La modélisation adoptée permet d'étudier l'impact sectoriel de nos différentes simulations. Dans le premier scénario, on peut penser que le secteur de l'énergie subira davantage le choc d'investissement dans la mesure où, en plus du choc d'impôt générique, le secteur de l'énergie subit la hausse des prix de gros de l'énergie et l'effet d'éviction des investissements décarbonés sur les autres investissements énergétiques endogènes (carbonés). Toutefois, le secteur de la construction est également significativement affecté par le choc (avec la dynamique du capital). En effet, le stock de capital diminue surtout dans le secteur de la construction car le secteur de l'énergie comptabilise aussi les investissements exogènes.

Dans le cas d'une trajectoire d'investissements plus ambitieuse, et sous l'hypothèse de taux très bas, on note que le troisième scénario deviendrait le plus défavorable sur l'activité économique (alors que dans la première variante il s'agissait du second scénario de financement par les entreprises uniquement). Ceci s'explique par le fait que, lorsque la hausse des prix de l'énergie est forte (car les montants à financer sont plus élevés), une hausse du prix de l'énergie pour les ménages a un effet relativement plus récessif sur l'activité économique. Une autre différence notable entre les deux scénarios d'investissement, est que l'effet récessif est plus fort dans les trois scénarios de cette deuxième variante qui est tirée du chiffrage de RTE (car les montants à financer sont relativement plus élevés).

Concernant les effets redistributifs intergénérationnels, dans la mesure où le choc d'investissement est relativement plus élevé dans la trajectoire du scénario N03 de RTE (on passe de 266 milliards d'euros à 616 milliards d'euros sur la période), bien que l'impact négatif sur les revenus du travail reste élevé, l'impact négatif sur les revenus du capital est plus fort. Ainsi, ce choc pénalise relativement plus la génération des 40-44 ans nés l'année 0 -qui ont entre 40 ans et 74 ans entre l'année 0 et l'année 30-.

D'autres questions de recherches s'inscrivent dans la continuité de ce travail. En effet, il serait intéressant d'étudier un financement de ces investissements avec un mix optimal dans les modes de tarification et d'étudier l'impact de ces politiques sur l'activité économique et sur le bien-être des agents. Il peut s'agir de différentes taxes (impôts sur le revenu, sur le capital, sur la consommation, sur la consommation carbone spécifiquement, etc). Le but étant surtout d'étudier les effets de ces politiques sous l'angle des effets redistributifs intergénérationnels. En effet, cette lecture détaillée permet également de penser à une forme de tarification différenciée en fonction des générations. Par exemple,

les effets négatifs d'une taxe sur le capital pénalisent davantage les générations intermédiaires et plus âgées, mais celles-ci bénéficient également de revenus plus importants. Le découpage générationnel permet de voir précisément les générations impactées, ce qui est un outil précieux pour les décideurs de politique publique.

Enfin, il serait intéressant d'étudier l'impact de ces montants d'investissement de transition énergétique dans d'autres secteurs, comme celui des transports ou de la construction, et de voir si les effets sont similaires à ceux dans le secteur de l'énergie.

BIBLIOGRAPHIE

1. Albis (d') H., Bonnet C., Navaux J., Pelletan J., Wolff F-C. (2016), « À quels âges les revenus excèdent-ils la consommation ? 30 ans d'évolution en France », *Population & Sociétés*, n°529. .
2. Albis (d') H., Bonnet C., Navaux J., Pelletan J., Wolff F-C. (2017), "Le déficit de cycle de vie en France: une évaluation pour la période 1979-2011", *Economie et Statistique*, vol. 491-492, pp. 51-76.
3. Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). "The environment and directed technical change". *The American Economic Review*, 102(1), 131-166.
4. Agénor, Pierre-Richard ; Lim, King Yoong (2018); "Unemployment, growth and welfare effects of labor market reforms" ; *Journal of Macroeconomics*, Vol.58, pp.19-38
5. Aghion P., Howitt P. (1998), "Capital Accumulation and Innovation as Complementary Factors in Long-Run Growth", *Journal of Economic Growth*, Vol. 3, No. 2 (Jun., 1998), pp. 111-130.
6. Agnolucci, P., De Lipsis, V. (2020), « Long-run trend in agricultural yield and climatic factors in Europe », *Climatic Change*, 159, 385–405.
7. Ahamada I., Fodha M., and Kirat D. (2017), "Regional Differences in CO2 Emissions from the French Residential Sector: Determinants and Distributional Consequences", *Revue d'économie Politique*, 127(3), 353.
8. Allais, M. (1947), "Economie et intérêt", Paris:Imprimerie,Nationale.
9. Allard-Prigent. C., C. Audenis, K. Berger, N. Carnot, S. Duchêne et F. Pesin (2002), « Présentation du modèle MESANGE - Modèle Économétrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Économie », Document de travail du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.
10. Allard, Patrick, La modélisation de la consommation des ménages en France / Modelling Aggregate Households' Consumption and Saving Behavior in France / Source : *Revue d'économie politique*, 1 September 1992, Vol.102(5), pp.727-768
11. Andersson, Julius J., 2019. "Carbon Taxes and CO2 Emissions: Sweden as a Case Study." *American Economic Journal: Economic Policy*, American Economic Association 11 (4): 1–30
12. André, M. & Biotteau, A.-L. (2021) "Medium-Term Effects of a Rise in VAT on Standard of Living and Inequality: A Microsimulation Approach", *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 522-523,5–21.
13. Antosiewicz, M. et al. (2020), "Distributional Effects of Emission Pricing in a Carbon-intensive Economy: the Case of Poland", *IZA Discussion Paper* 13481
14. Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a Bayesian DSGE model. *Renewable Energy*, 120, 60-68.
15. Ardagna Silvia, (2004), Fiscal stabilizations: When do they work and why, *European Economic Review*, 48, (5), 1047-1074
16. Arrow, K. J., Cropper M. and Gollier C., Groom B., Heal G M., Newell R G., Nordhaus W D., Pindyck R S., Pizer W A. and Portney P R. (2012), "How Should Benefits and Costs Be Discounted in an Intergenerational Context? The Views of an Expert Panel". *Discussion Papers* dp-12-53, Resources For the Future.
17. 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.
18. Auerbach A.J., Kotlikoff L.J. (1987), "*Dynamic Fiscal Policy*", Cambridge University Press.
19. Auerbach, Alan J. and Laurence J. Kotlikoff, *Dynamic Fiscal Policy*, Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1987.
20. Autume.A and Quinet.A, « Une maquette de moyen terme de l'économie française », *Economie & prévision* 2001/2 (no 148), p. 1-21.
21. Banks, James, Richard Blundell, and Sarah Tanner. 1998. "Is There a Retirement-Savings Puzzle?" *American Economic Review*, 88(4): 769–88.
22. Battistin, Erich, Richard Blundell, and Arthur Lewbel. 2009. "Why Is Consumption More Log Normal than Income? Gibrat's Law Revisited." *Journal of Political Economy*, 117(6): 1140–54
23. Baumol W.J., Oates W.E. [1988] : *The Theory of Environmental Policy*, Cambridge University Press, 2nd edition

24. R.J. Barro (1974), "Are Government Bonds net Wealth?", *Journal of Political Economy* 82, pp. 1095-1117
25. Bento, A. M., Goulder, L. H., Jacobsen, M. R., and Von Haefen, R. H. (2009). "Distributional and efficiency impacts of increased US gasoline taxes". *American Economic Review*, 99(3), 667–699.
26. Bernheim, B. Douglas, Jonathan Skinner, and Steven Weinberg. 2001. "What Accounts for the Variation in Retirement Wealth among U.S. Households?" *American Economic Review*, 91(4): 832–57
27. Bernstein, R. and R. Madlener, (2015). "Short- and Long-Run Electricity Demand Elasticities at the Subsectoral Level: A Cointegration Analysis for German Manufacturing Industries". *Energy Economics* 48:178–187. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.12.019>.
28. Berry A. (2017). "Compensating households from carbon tax regressivity and fuel poverty : a microsimulation study". FAERE Policy Paper, 2017-08.
29. Blanchard, Olivier J., "Debt, Deficits, and Finite Horizons," *Journal of Political Economy*, 1985, 93 (2), 223–247. Bohi, D.R. and M. Zimmerman (1984). "An Update on Econometric Studies of Energy Demand." *Annual Review of Energy* 9:105–154. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.09.110184.000541>.
30. Blanchard, Olivier (2019), « Public debt and low interest rates », *American Economic Review*, vol. 109, n° 4.
31. Böhringer Christoph and Loschel Andreas, "Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid Computable General Equilibrium Approach", *The Energy Journal*, 2006, vol. Hybrid Modeling, issue Special Issue #2, 135-150
32. Botman, Dennis P. J. and Laxton, Douglas and Muir, Dirk and Romanov, Andrei, A New-Open-Economy-Macro Model for Fiscal Policy Evaluation (February 2006). IMF Working Paper No. 06/45, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=892936>
33. Bovenberg A.L. and Goulder L.H. (1996), "Optimal environmental taxation in the presence of other taxes: General equilibrium analyses", *American Economic Review*, 1996, Vol.86(4), pp.985-1000
34. Bovenberg, A.L. and Heijdra, B. J. (1998). "Environmental tax policy and intergenerational distribution", *Journal of Public Economics*, 67(1), 1–24.
35. Bovenberg A.L. and Goulder L.H. (2002), "Environmental taxation" in Auerbach A. and M.Feldstein" (eds.), *Handbook of Public Economics*, North Holland, pp.1471-1547).
36. Boyer J. and Nordhaus W D. (2000), "Warming the world : economic models of global warming", The MIT Press.
37. Briand, A., and S. Oparowski. "Les Dépenses des Français en Électricité depuis 1960." Insee Première 1746 (2019).
38. Broome, J. (1992), "Counting the Costs of Global Warming", *White Horse Press, Cambridge*.
39. Bureau, B. (2011). "Distributional effects of a carbon tax on car fuels in France", *Energy Economics*, 33(1), 121–130.
40. Callonec Gaël, Combaud Matthieu (2019), « Les effets macroéconomiques et environnementaux de la fiscalité carbone », rapport particulier n° 4, Cour des comptes.
41. Caney, S. (2014), "Climate change, intergenerational equity and the social discount rate", *Politics, Philosophy and Economics*, 13(4), 320–342.
42. Cao, D., Wang, L. and Wang, S. (2017), "Complex dynamics induced by nonlinear pollution absorption, pollution emission rate and effectiveness of abatement technology in an OLG model", *Sustainability (Switzerland)*, 9(5), 1–11.
43. Capros P. et al. (1996) Double dividend analysis: First results of a general equilibrium model (GEM-E3) linking the EU-12 countries. In: Carraro C., Siniscalco D. (eds) Environmental Fiscal Reform and Unemployment. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM) Series on Economics, Energy and Environment, vol 7. Springer, Dordrecht.
44. Carbone, J. C., Morgenstern, R. D and al (2013). "Deficit Reduction and Carbon Taxes: Budgetary, Economic, and Distributional Impacts", *Resources for the future*.
45. Caron, J, Cole, R Goettle IV, C Onda, J McFarland, and J Woollacott (2018), "Distributional implications of a national CO 2 tax in the U.S. across income classes and regions: a multi-model overview", *Climate Change Economics*, 9(1).
46. Chen, Y.-H.H., S. Paltsev, J. Reilly, J. Morris, V. Karplus, A. Gurgel, N. Winchester, P. Kishimoto, É. Blanc and M. Babiker (2017), *Joint Program Technical Note*, March, 32 p.
47. Chen, J., Chepeliev, M., Garcia-Macia, D., Iakova, D., Roaf, J., Shabunina, A., van der Mensbrugghe, D., & Wingender, P. (2020). "EU Climate Mitigation Policy". In *EU Climate Mitigation Policy*. USA: INTERNATIONAL MONETARY FUND.

48. Chinn, Menzie David and Frankel, Jeffrey A., *Debt and Interest Rates: The U.S. and the Euro Area* (2007). Economics Discussion Paper No. 2007-11, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1716351> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1716351>
49. Chiroleu-Assouline, M. (2001), « Le double dividende. Les approches théoriques », *Revue Française d'économie*, 16(2), 119–147.
50. Chiroleu-Assouline, M., and Fodha, M. (2006), “Double dividend hypothesis, golden rule and welfare distribution”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(3), 323–335.
51. Chiroleu-Assouline, M., and Fodha, M. (2009), “Double dividend and distribution of welfare: Advanced results and empirical considerations”, *Economie Internationale*, 120(4), 91–108.
52. Chiroleu-Assouline, M., and Fodha, M. (2012), « L'environnement au secours de la réforme fiscale », *La vie des idées*.
53. Claudia Kemfert, “Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany”, *Energy Economics*, Volume 20, Issue 3, 1998, Pages 249-264, ISSN 0140-9883, [https://doi-orgs.proxy.bu.dauphine.fr/10.1016/S0140-9883\(97\)00014-5](https://doi-orgs.proxy.bu.dauphine.fr/10.1016/S0140-9883(97)00014-5).
54. Cline, W.R., (1992), “The Economics of Global Warming”, Institute for International Economics, Washington DC.
55. Cline, W.R. (1993), “Give greenhouse abatement a chance”, *Finance and Development* 30, 3–5
56. Colliard, J. & Montialoux, C. (2007), “Une brève histoire de l'impôt”, *Regards croisés sur l'économie*, 1, 56-65.
57. Combet, E. & Méjean, A. (2017), “The Equity and Efficiency Trade-off of Carbon Tax Revenue Recycling: A Reexamination”, CIREA.
58. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS - Stepping up Europe's 2030 climate ambition, Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people, European Commission
59. Correia-Nunes, J. and Stemitsiotis, L. (1995), BUDGET DEFICIT AND INTEREST RATES: IS THERE A LINK? INTERNATIONAL EVIDENCE. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 57: 425-449. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1995.tb00033.x>
60. Cossa, P. (2004): Uncertainty Analysis of the Cost of Climate Policies. Master of Science Thesis, MIT Technology and Policy Program, *Engineering Systems Division* (<http://globalchange.mit.edu/publication/14689>)
61. CPO, « La répartition et l'équité des prélèvements obligatoires entre générations », 06.11.2008
62. Daly, H.E., Cobb, J.B. Jr. (1989), “For the Common Good: Redirecting the Economy Toward Community, The Environment, and a Sustainable Future”, *Beacon Press, Boston*.
63. Dam L. (2011), “Socially responsible investment in an environmental overlapping generations model Lammertjan”, *Resource and Energy Economics* 33 (2011) 1015–1027.
64. Dao, N. T., Dávila, J. (2014), “Implementing steady state efficiency in overlapping generations economies with environmental externalities”, *Journal of Public Economic Theory*, 16(4), 620–649.
65. Dao, N. T., Edenhofer, O. (2018), “Feldstein meets George: Land rent taxation and socially optimal allocation in economies with environmental externality”, *Resource and Energy Economics*, 53, 20–41.
66. David, Nissim Ben (2010), “Government policy to reduce pollution emissions within the overlapping generations model”, *Applied Economics*. Sep2010, Vol. 42 Issue 23, p2985-2998. 14p. 5 Charts, 3 Graphs.
67. Davies, J. B., Shi, X., Whalley, J. (2014), “The possibilities for global inequality and poverty reduction using revenues from global carbon pricing”, *Journal of Economic Inequality*, 12(3), 363–391.
68. Dennis B., Douglas L ads al (2006), *A New-Open-Economy-Macro Model for Fiscal Policy Evaluation*, IMF Working Papers, 2006(045), A001. Retrieved Feb 26, 2022.
69. De Miguel, C., & Manzano, B. (2006), “Optimal oil taxation in a small open economy”, *Review of Economic Dynamics*, 9(3), 438-454.
70. Dhawan, R., & Jeske, K. (2008). “Energy price shocks and the macroeconomy: the role of consumer durables”. 40(7), 1357-1377.
71. Diamond, P. A. (1965), “National Debt in a Neo-classical Growth Model”, *American Economic Review*, 55(5): 1126—1150

72. Dissou, Y., & Karnizova, L. (2012). "Emissions cap or emissions tax? A multi-sector business cycle analysis". Working Paper, University of Ottawa.
73. Douenne, T. (2018), "The vertical and horizontal distributive effects of energy taxes: A case study of a French policy", FAERE Working Paper, 2018.10.
74. Ekins, P., Dresner, S. (2004) "Green Taxes and Charges", Joseph Rowntree Foundation, York
75. Etner, J., Jouvét, P.-A. (2001), « Comportement des groupes d'investissement face à une incertitude sur l'environnement », Louvain Economic Review, Vol. 67, pp. 39–59.
76. European Power Wholesale Price and Spreads Projections to 2050—Planning Case, February 2021
77. European power: Long-term projections—Planning Case:
78. Evans, Paul. "Do Large Deficits Produce High Interest Rates?" *The American Economic Review*, vol. 75, no. 1, American Economic Association, 1985, pp. 68–87, <http://www.jstor.org/stable/1812704>.
79. Faruqee, Hamid, et al. "Government Debt, Life-Cycle Income, and Liquidity Constraints: Beyond Approximate Ricardian Equivalence." *Staff Papers (International Monetary Fund)*, vol. 44, no. 3, Palgrave Macmillan Journals, 1997, pp. 374–82, <https://doi.org/10.2307/3867565>.
80. Frankhauser, S., (1994), « The economic costs of global warming damage: a survey », *Global environmental Change* 4, 301–309.
81. Fell, H., MacKenzie I A. and W A Pizer (2012), "Prices versus Quantities versus Bankable Quantities", *Resource and Energy Economics*, 34(4): 607-623.
82. Ferry J P. (2019), « Faut-il s'endetter pour le climat? », Bruegel.
83. Fiches - Revenus - Les revenus et le patrimoine des ménages - Insee Références - Édition 2018
84. 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.
85. Fischer, Carolyn ; Springborn, Michael; "Emissions targets and the real business cycle: Intensity targets versus caps or taxes", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2011, Vol.62(3), pp.352-366
86. Fleurbaey, M., Michel, P. (1992), « Quelle justice pour les retraites ? », *Revue d'économie Financière*, 23(4), 47–64.
87. Fodha, M., Seegmuller, T., and Yamagami, H. (2014), « Environmental Policies under Debt Constraint ».
88. Fragkos, Panagiotis ; Tasios, Nikos ; Paroussos, Leonidas ; Capros, Pantelis ; Tsani, Stella ; "Energy system impacts and policy implications of the European Intended Nationally determined Contribution and low-carbon pathway to 2050"; *Energy Policy*, January 2017, Vol.100, pp.216-226
89. Fried, S., Novan, K. and Peterman W. B. (2018), "The distributional effects of a carbon tax on current and future generations", *Review of Economic Dynamics*, 30, 30–46.
90. Garbinti.B and al (2020), "Wealth effect on consumption during the sovereign debt crisis: Households heterogeneity in the Euro area", Working paper, Banque de France.
91. G Le Treut, E Combet, F Ghersi, J Lefevre, "Construction of hybrid Input-Output tables for E3 CGE model calibration and consequences on energy policy analysis »(2014), GTAP Resource #4524
92. Garnaut R. (2008), "The Garnaut climate change review", Cambridge University Press.
93. Gollier, C. (2008), "Discounting with fat-tailed economic growth", *Journal of Risk and Uncertainty*, 37(2–3), 171–186.
94. Gollier, C. (2019), "Le climat après la fin du mois".
95. Gonand, F., Jouvét, P (2015), "The Second Dividend and the Demographic Structure", *Journal of Environmental Economics and Management*, July 2015, Vol.72, pp.71-97
96. Gonand, F. (2018) "Intergenerational Inequality and the Recycling of a Carbon Tax", *Revue Economique*, 2019, Vol.70(3), pp.411-440.
97. Gonand, F., Hasanov, F. J., & Hunt, L. C. (2019). Estimating the impact of energy price reform on Saudi Arabian intergenerational welfare using the MEGIR-SA model. *The Energy Journal*, 40(3)
98. 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, p. 271-297.
99. Goulder, L.H. (2013). "Climate change policy's interactions with the tax system", *Energy Economics*, 40(December), S3–S11.

100. Goulder, L., & Hafstead, M. (2017), "Confronting the climate challenge: US policy options", Columbia University Press.
101. 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.
102. Hainaut, Hadrien ; Cochran, Ian; "The Landscape of domestic climate investment and finance flows: Methodological lessons from five years of application in France"; *International Economics*, October 2018, Vol.155, pp.69-83
103. Hall Stephen, Foxon Timothy J & Bolton Ronan (2017), "Investing in low carbon transitions: energy finance as an adaptive market", *Climate Policy*, 17:3, 280-298
104. Hamilton, J. (1983), "Oil and the macroeconomy since World War II", *Journal of Political Economy*, 91, 228-248.
105. Hao, Ying ; Lu, Jing ,"The Impact of Government Intervention on Corporate Investment Allocations and Efficiency: Evidence from China", *Financial Management*, June 2018, Vol.47(2), pp.383-419
106. Hao, Ying ; Lu, Jing ,"The Impact of Government Intervention on Corporate Investment Allocations and Efficiency: Evidence from China", *Financial Management*, June 2018, Vol.47(2), pp.383-419
107. Hassler John, Krusell Per, Olovsson Conny, "Energy-Saving Technical Change", NBER Working Paper No. 18456 Issued in October 2012
108. Havranek, T., Irsova, Z., Gechert, S., & Kolcunova, D. (2019, November 14). Death to the Cobb-Douglas Production Function? A Meta-Analysis of the Capital-Labor Substitution Elasticity. <https://doi.org/10.31222/osf.io/6um5g>
109. Heijdra, B. J. and Heijnen, P. (2018), "Reversible Environmental Catastrophes with Disconnected Generations", IDEAS Working Paper Series from RePEc.
110. Heijdra, B. J., Kooiman, J. P. and Ligthart, J. E. (2006), "Environmental quality, the macroeconomy, and intergenerational distribution", *Resource and Energy Economics*, 28(1), 74–104.
111. Henriët, F., Maggiar, N. and Schubert, K. (2014), "A stylized applied energy-economy model for France", *Energy Journal*, 35(4), 1–37.
112. Henriët, F., Maggiar, N. and Schubert, K. (2014), "La France peut-elle atteindre l'objectif du Facteur 4 ? Une évaluation à l'aide d'un modèle stylisé énergie-économie", *Économie & prévision*, 2016, Vol.208(1), pp.1-21
113. Henriët, Fanny, Nicolas Maggiar, et Katheline Schubert. « La France peut-elle atteindre l'objectif du Facteur 4 ? Une évaluation à l'aide d'un modèle stylisé énergie-économie », *Économie & prévision*, vol. 208-209, no. 1-2, 2016, pp. 1-21.
114. Hippolyte d'Albis & Ikipidi Badji (« Les inégalités de niveaux de vie entre les générations en France», 2017),
115. Hoel, Michael, and Larry Karp (2002), "Taxes versus Quotas for a Stock Pollutant", *Resource and Energy Economics*, 24(4): 367-384.
116. Hoelscher, Gregory. "New Evidence on Deficits and Interest Rates." *Journal of Money, Credit and Banking*, vol. 18, no. 1, [Wiley, Ohio State University Press], 1986, pp. 1–17, <https://doi.org/10.2307/1992316>.
117. Hourcade J C., Combet E. (2017), "Fiscalité carbone et finance climat, Un contrat social pour notre temps", *Broché*.
118. Howarth R B. (1998), "An overlapping generations model of climate-economy interactions", *Scandinavian Journal of Economics*, 100(3), 575–591.
119. Howitt P. and Aghion P. (2019), "Capital Accumulation and Innovation as Complementary Factors in Long-Run Growth", *Journal of Economic Growth*, 1998, Vol.3(2), pp.111-130
120. IEA (2017), "Deep energy transformation needed by 2050 to limit rise in global temperature", [link: https://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/deep-energy-transformation-needed-by-2050-to-limit-rise-in-global-temperature.html](https://www.iea.org/newsroom/news/2017/march/deep-energy-transformation-needed-by-2050-to-limit-rise-in-global-temperature.html)
121. Insee, comptes nationaux, base 2014 ; Insee-DGFIP-Cnaf-Cnav-CCMSA, enquête Revenus fiscaux et sociaux 2017 ; enquête Budget de famille 2017.
122. Insee, Les revenus et le patrimoine des ménages, édition 2018 - Insee Références.
123. Insee première, « Les dépenses d'énergie des ménages depuis 20 ans :une part en moyenne stable dans le budget, des inégalités accrues », Sébastien Merceron, Maël Theulière, division Conditions de vie des ménages, Insee
124. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [2001], *Climate Change 2001: Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge.

125. Jacquinot.P & Mihoubi F. (2001), "Modèle à Anticipations Rationnelles de la Conjoncture Simulée : MARCOS," Documents de recherche 01-20, Centre d'Études des Politiques Économiques (EPEE), Université d'Evry Val d'Essonne.
126. John A., Pecchenino R., Schimmelpfennig D. et Schreft S. (1995), « Short-Lived Agents and the Long-Lived Environment », *Journal of Public Economics*, 58 (1),p. 127-141.
127. John A. and Pecchenino R . (1994), "An Overlapping Generations Model of Growth and the Environment", *Economic Journal*, Nov, 1994, Vol.104(427), p.1393(18).
128. Jorgensen, 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.
129. Jouvet, P. A., Michel, P. and Pestieau, P. (2000), "Altruism, voluntary contributions and neutrality: The case of environmental quality", *Economica*, 67(268), 465-475.
130. Karp L. and Rezaei A. (2014), "The Political economy of environmental policy with overlapping generations ", *International Economic Review*, August 2014, Vol.55(3), pp.711-733
131. Kim, I. & Loungani, P. (1992). The role of energy in real business cycle models. *Journal of Monetary Economics*, 29(2), 173-189.
132. Klaus Conrad & Tobias F. N. Schmidt (1998) Economic Effects of an Uncoordinated Versus a Coordinated Carbon Dioxide Policy in the European Union: An Applied General Equilibrium Analysis, *Economic Systems Research*, 10:2, 161-182
133. Klein, C. et Simon, O. (2010) : « Le modèle MÉSANGE réestimé en base 2000 – Tome 1 : Version avec volumes à prix constants », document de travail de l'Insee-Dese, n°G2010/03.
134. Kotlikoff, L. J. (2017), "Measuring Intergenerational Justice", *Intergenerational Justice Review*, 11(2), 56-63.
135. Kotlikoff, L. J., Kubler, F., Polbin, A., Sachs, J. D. and Scheidegger, S. (2019), "Making Carbon Taxation a Generational Win Win", *NBER Working Paper*, No. 25760, 56.
136. Kosonen, K. (2012), "Regressivity of environmental taxation: myth or reality?", In *Handbook of research on environmental taxation*. Edward Elgar Publishing.
137. Krysiak, F. C. (2010), "Discounting, Intergenerational Equity, and Demographic Change", *Department of Business and Economics, Working Paper*, Basel.
138. M. Kumhof, C. Freedman al, "Global effects of fiscal stimulus during the crisis", *Journal of Monetary Economics*, Volume 57, Issue 5, 2010, Pages 506-526
139. Kydland, F., & Prescott, E. (1982). Time to Build and Aggregate Fluctuations. *Econometrica*, 50(6), 1345-1370. doi:10.2307/1913386
140. Landais et al (2010), "Pour une révolution fiscale, Un impôt sur le revenu pour le XXIe siècle", Seuil, coll.
141. L. Lemiale, P. Zagamé [1998] : Taxation de l'énergie, efficacité énergétique et nouvelles technologies : les effets macro-économiques pour six pays de l'Union européenne in K. Schubert et P. Zagamé (eds), *L'environnement - Une velle dimension de l'analyse économique*, Vuibert, Paris.
142. Lennox, J., & Parrado, R. (2015). Capital-embodied Technologies in CGE Models. *Fondazione Eni Enrico Mattei*.
143. Levy-Garboua.V et Monnet.E, (2016), « Les taux d'intérêt en France : une perspective historique », *Revue d'économie financière*, vol.1 (n°121), p. 35-58.
144. Louche, Celine, Busch Timo, Crifo Patricia, Marcus Alfred; "Financial Markets and the Transition to a Low-Carbon Economy: Challenging the Dominant Logics"; *Organization & Environment*, March 2019, Vol.32(1), pp.3-17
145. Lutz.K (2008), "The Economic Effects of Energy Price Shocks." *Journal of Economic Literature*, 46 (4): 871-909.
146. Manne, A.S., Richels, R., 1992. *Buying Greenhouse Insurance}the Economic Costs of CO Emission Limits*. MIT Press Cambridge, MA.
147. Mehra, Yash P., Deficits and Long-Term Interest Rates: An Empirical Note (July 1, 1992). FRB Richmond Working Paper No. 92-2, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2123614> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2123614>
148. Metcalf, G E. (1999), "A Distributional Analysis of Green Tax Reforms", *National Tax Journal*, 52(4), 655-674.
149. Ministry for the ecological and solidary transition (2020), "National Low Carbon Strategy": https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/en_SNBC-2_complete.pdf

150. Modigliani, F. (1988), "The Role of Intergenerational Transfers and Life Cycle Saving in the Accumulation of Wealth", *Journal of Economic Perspectives*, 2(2), 15–40.
151. Morris, J.F., J.M. Reilly and S. Paltsev (2010), "Combining a Renewable Portfolio Standard with a Cap-and-Trade Policy: A General Equilibrium Analysis", Joint Program Report Series, 19 pages, Report No. 187
152. Newell R G., and Pizer W A. (2003), "Regulating stock externalities under uncertainty", *Journal of Environmental Economics and Management*, 45: 416-432.
153. Nicolas Herpin et Christophe Michel, « Avec le passage à la retraite, le ménage restructure ses dépenses de consommation », 2012.
154. Nordhaus, W.D. (1994), "Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change", MIT Press, Cambridge, MA.
155. W.E. Oates [1991] : Pollution Charges As A Source of Public Revenues, Resources of the Future discussion paper, QE92- 05.
156. Padilla, E. (2002), "Intergenerational equity and sustainability". *Ecological Economics*, 41(1), 69–83.
157. Paltsev, S., J.M. Reilly, H.D. Jacoby, R.S. Eckaus, J. McFarland, M. Sarofim, M. Asadoorian and M. Babiker (2005), *Joint Program Report Series*, 72 pages
158. Parry, IWH and RC Williams (2010), "What are the costs of meeting distributional objectives for climate policy?", *The BE Journal of Economic Analysis and Policy*, 10(2), Article 9, i–ii, 1–33.
159. Pearce D. (1991), "The role of carbon taxes in adjusting to global warming", *Economic Journal*, 101 (407), pp.938-948.
160. Philippe l'Hardy et André Villeneuve (« Le comportement des consommateurs d'après l'enquête « Budgets de famille » de 1963 », 1968)
161. Pizer W A. (2002), "Combining price and quantity controls to mitigate global climate change", *Journal of Public Economics*, 85: 409-434.
162. Pollitt H. et Mercure J. F. (2017), « The Role of Money and the Financial Sector in Energy-Economy Models Used for Assessing Climate and Energy Policy », *Climate Policy*, pp.1-1
163. Poterba J.M. [1993] : Global Warming Policy : A Public Finance Perspective, *Journal of Economic Perspectives*, 7, n° 4, pp. 47-63.
164. Rasmussen, T. N. (2003), "Modeling the economics of greenhouse gas abatement: An overlapping generations perspective", *Review of Economic Dynamics*, 6(1), 99–119.
165. Rausch S. (2013), "Fiscal Consolidation and Climate Policy: An Overlapping Generations Perspective", *Beiträge zur Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik 2013: Wettbewerbspolitik und Regulierung in einer globalen Wirtschaftsordnung - Session: Climate Policy I A04-V2*
166. Rausch Sebastian & Schwerin Hagen, 2018. "Does Higher Energy Efficiency Lower Economy-Wide Energy Use?," *CER-ETH Economics working paper series 18/299*, CER-ETH - Center of Economic Research (CER-ETH) at ETH Zurich.
167. Rausch S. and Yonezawa H. (2018), "The Intergenerational Incidence of Green Tax Reform", *Climate Change Economics*, 09(01), 1840007.
168. Rezai, A., Foley, D. K., and Taylor, L. (2012), "Global warming and economic externalities", *Economic Theory*, 49(2), 329–351.
169. 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.
170. Roach, T. (2021), "Dynamic carbon dioxide taxation with revenue recycling", *Journal of Cleaner Production*, 289, 125045.
171. Rossella Bardazzi, Filippo Oropallo, Maria Grazia Paziienza, Do manufacturing firms react to energy prices? Evidence from Italy, *Energy Economics*, Volume 49, 2015, Pages 168-181, ISSN 0140-9883, <https://doi-org-proxy.bu.dauphine.fr/10.1016/j.eneco.2015.01.014>.
172. Rotemberg, J., & Woodford, M. (1996) "Imperfect competition and the effects of energy price increases on economic activity", NBER Working Papers(w5634).
173. Samuelson, P. A. 1958. "An Exact Consumption Loan Model of Interest, With or Without the Social Contrivance of Money", *Journal of Political Economy*, 66(5):467—482.

174. Schmelzing, Paul (2020), « Eight centuries of global real interest rates, R-G, and the 'suprasecular' decline, 1311–2018 », Bank of England, staff working paper, n° 845.
175. Schwerhoff, G., Nguyen, T. D., Edenhofer, O., Grimalda, G., Jakob, M., Klenert, D., and Siegmeier, J. (2017), "Policy options for a socially balanced climate policy", *Economics*, 11, 1–11.
176. Senni, Colesanti Chiara, Energy Transition, Technological Spillovers and Elasticity of Substitution (November 24, 2017). CER-ETH – Center of Economic Research at ETH Zurich, Working Paper 17/281, November 2017 .
177. Shalizi, Z., and Lecocq, F. (2009), "Climate change and the economics of targeted mitigation in sectors with long-lived capital stock", World Bank Policy Research Working Paper.
178. Siegmeier, J., Mattauch, L., and Edenhofer, O. (2015), "Climate Policy Enhances Efficiency : A Macroeconomic Portfolio Effect", CESifo Working Papers, (5161).
179. Siegmeier, Jan & Mattauch, Linus & Franks, Max & Klenert, David & Schultes, Anselm & Edenhofer, Ottmar. (2017), "The fiscal benefits of stringent climate change mitigation: an overview", Climate Policy.
180. Smulders, S., & de Nooij, M. (2003). "The impact of energy conservation on technology and economic growth". *Resource and Energy Economics*, 25(1), 59-79.
181. Solow R. (1956), "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quarterly Journal of Economics*.
182. Solow R. (1974), "Intergenerational Equity and Exhaustible Resources", *Review of Economic Studies, Special Issue, Vol. 41 Issue 128*.
183. Statistics on resources and living conditions, 2018, INSEE.
184. Stern, N. H. (2007), "The Economics of Climate Change: The Stern Review", *Cambridge University Press, Cambridge, UK*.
185. Terkla, D. (1984), "The efficiency value of effluent tax revenues", *Journal of Environmental Economics and Management*, 11(2), 107–123.
186. Terry Barker (1999), "Achieving a 10% Cut in Europe's Carbon Dioxide Emissions using Additional Excise Duties: Coordinated, Uncoordinated and Unilateral Action using the Econometric Model E3ME", *Economic Systems Research*, 11:4, 401-422.
187. Theo Van De Klundert, "The energy problem in a small open economy" *Journal of Macroeconomics* ,Volume 5, Issue 2,1983,Pages 211-222,ISSN 0164-0704,[https://doi-org-s.proxy.bu.dauphine.fr/10.1016/0164-0704\(83\)90093-9](https://doi-org-s.proxy.bu.dauphine.fr/10.1016/0164-0704(83)90093-9).
188. Tobin, J. (1974), "What Is Permanent Endowment Income? ", *American Economic Review*, 64(2), 427–432.
189. Traisnel, J.-P. (2001), "Habitat et Développement Durable." *Les Cahiers du CLIP* (13):7–74.
190. Tullock, G. (1967), "Excess benefit", *Water Resources Research*, 3(2), 643–644.
191. Vidal, Jean-Pierre, « L'altruisme dans le modèle à générations imbriquées », *Louvain Economic Review*, 1 January 1996, Vol.62(1), pp.21-42
192. Voss, Graham M, "Public and private investment in the United States and Canada", *Economic modelling*, 2002, Vol.19(4), pp.641-664
193. Waisman, H., Guivarch, C., Grazi, F., and Hourcade, J. C. (2012), "The Imacim-R model: Infrastructures, technical inertia and the costs of low carbon futures under imperfect foresight", *Climatic Change*, 114(1), 101–120.
194. Weil.P (1987), "Love thy children. Reflections on the Barro debt neutrality theorem", *Journal of Monetary Economics*, 19, 377-391.
195. Weitzman, M L. (1974). "Prices vs. Quantities." *Review of Economic Studies*, 41(4): 477-491.
196. Weitzman, M. L. (1998), "Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(3), 201–208.
197. Weitzman M.L. (2004), "Discounting a Distant Future Whose Technology is Unknown".
198. Weitzman, M. L. (2007), "Subjective expectations and asset-return puzzles", *American Economic Review*, 97(4), 1102–1130.
199. Weitzman, M. L. (2018), "Prices or Quantities Dominate Banking and Borrowing", *NBER Working Paper Series, Jan 2018, p.24218*
200. Williams, Robertson (2010), "What Are the Costs of Meeting Distributional Objectives for Climate Policy?", *NBER Working Paper Series*, Oct 2010, p.16486

201. Zaddach, J. O. (2015), "Climate Policy Under Intergenerational Discounting: An Application of the Dynamic Integrated Climate-Economy Model", Broché.
202. Zidar O. [2018], "Tax cuts for whom ? Heterogeneous effects of tax changes on growth and employment", Journal of Political Economy.

RÉSUMÉ

La thèse modélise les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels de différents modes de financement des investissements privés de transition énergétique à faible émission de carbone dans le secteur électrique, en France à l'horizon 2050. Un modèle empirique d'équilibre général est développé, avec quinze générations et cinq secteurs économiques. Trois scénarios sont considérés, où les investissements privés dans le secteur électrique sont soit financés par de la dette publique, remboursée ultérieurement par une hausse d'un impôt générique (scénario 1), ou par un signal prix du carbone payé par les entreprises seulement (scénario 2), ou par un signal prix du carbone pour les entreprises et les ménages (scénario 3). Nous envisageons deux types de ménages qui se distinguent par leur contrainte de liquidité, ainsi que différentes variantes, en fonction notamment des volumes d'investissement, du prix de l'énergie, ou du niveau des taux d'intérêt. Les résultats suggèrent notamment que les effets redistributifs intergénérationnels sont généralement plus préjudiciables pour les générations intermédiaires et âgées, du fait des effets du choc sur les revenus du capital et du travail. L'effet sur les prix à la consommation pénalise relativement plus les jeunes générations. Si les taux restent bas à l'avenir, les effets macroéconomiques et redistributifs intergénérationnels sont relativement atténués en cas de financement par de la dette publique. Si les taux remontent, les effets négatifs sont plus atténués si les investissements sont financés par des signaux-prix conjoints sur les entreprises et sur les ménages.

MOTS CLÉS

Transition énergétique, Macroéconomie, Modèle CGE, Électricité

ABSTRACT

The thesis models the macroeconomic and intergenerational redistributive effects of different ways of financing private low-carbon energy transition investments in the electricity sector in France by 2050. An empirical general equilibrium model is developed, with fifteen generations and five economic sectors. Three scenarios are considered: private investments in the electricity sector are either financed by public debt, later reimbursed by an increase in a generic tax (scenario 1), by a carbon price signal paid by firms only (scenario 2), or by a carbon price signal for firms and households (scenario 3). We consider two types of households depending on whether they are liquidity constrained or not, as well as different sensitivities, depending in particular on investment volumes and energy prices, or on the level of interest rates. The results suggest notably that the intergenerational redistributive effects are generally more detrimental to the middle and older generations, in line with the effects of the shock on capital and labour incomes. The effect on consumer prices is relatively more detrimental to younger generations. If interest rates remain low in the future, the macroeconomic and intergenerational redistributive effects are relatively attenuated in the case of financing by public debt. If rates rise, the negative effects are more attenuated if investments are financed by joint price signals on companies and households.

KEYWORDS

Energy transition policies, Macroeconomics, CGE modelling, Electricity