Réforme de la fiscalité : impacts macro-sectoriels sous contrainte de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre

Claire-Marie Bono

▶ **To cite this version:**

Claire-Marie Bono. Réforme de la fiscalité : impacts macro-sectoriels sous contrainte de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre. Economies et finances. Ecole Polytechnique X, 2013. Français. NNT : . pastel-00820573

HAL Id: pastel-00820573
https://pastel.hal.science/pastel-00820573

Submitted on 6 May 2013

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.

Ecole Doctorale de l'Ecole Polytechnique - PREG-CECO

THÈSE

pour l'obtention du titre de
DOCTEUR EN SCIENCES ÉCONOMIQUES

présentée et soutenue par

Claire-Marie BONO

le 22 février 2013

Réforme de la Fiscalité : Impacts Macro-Sectoriels sous Contrainte de Réduction des Émissions de Gaz a Effet de Serre

---

Membres du Jury

Alain Ayong Le Kama
Professeur, Université Paris-Ouest, *Rapporteur*

Mourad Ayouz
Ingénieur-chercheur EDF R&D, *Examinateur*

Edouard Challe
Chargé de Recherches CNRS & Ecole Polytechnique, *Directeur de thèse*

Patricia Crifo
Professeur, Ecole Polytechnique, *Présidente du jury*

Mouez Fodha
Professeur, Université d'Orléans, *Rapporteur*

Jean-Pierre Ponssard
Directeur de Recherches Emerite & Ecole Polytechnique, *Co-Directeur de thèse*

"L'école Polytechnique et EDF R&D n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur."

Remerciements

Cette thèse est le fruit de la collaboration entre le Département d'Économie de l'École Polytechnique et EDF R&D. Je tiens ici à 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 les plus sincères à Edouard Challe et Jean-Pierre Ponssard pour avoir co-dirigé cette thèse et m'avoir permis de la réaliser dans les meilleures conditions. Je leur suis particulièrement reconnaissante de m'avoir accueillie au sien du laboratoire d'Économie, de m'avoir accordé leur confiance et leur soutien, et d'avoir contribué au travers de conseils avisés à la réussite de ces travaux.

Je remercie également Alain Ayong Le Kama et Mouez Fodha qui ont accepté de rapporter cette thèse. Je leur suis très reconnaissante de leur lecture attentive et renouvelée de ce manuscrit, de leurs précieuses remarques et de l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. Je suis également honorée que Patricia Crifo et Mourad Ayouz aient accepté de faire partie du jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes du département EFESE qui m'ont encadrée et accompagnée. Ma reconnaissance va en premier lieu à Mourad Ayouz, pour son soutien inestimable, tant sur le plan professionnel que personnel. Je lui suis infiniment redevable pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi, et j'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui. Je remercie également Florent Le Strat qui a co-encadré cette thèse, pour son écoute et ses conseils avisés. Je souhaite exprimer ici ma plus profonde gratitude à Marc Trotignon pour son aide inconditionnelle. C'est avec gentillesse, humilité et patience qu'il a su me faire partager ses connaissances inépuisables sur le secteur électrique. J'espère que ce travail est à la hauteur de ses espérances. Enfin, je remercie également Matthieu Cristofini pour son aide et sa disponibilité, ainsi que Virginie Pignon et Yoann Vaysse.

J'ai eu la chance de côtoyer et de collaborer avec de nombreuses personnes durant mon doctorat, et je tiens à remercier à ces collègues qui ont aussi contribué d'une façon ou d'une autre au succès de ce projet. Merci en particulier à l'équipe managériale d'EFESE qui m'a témoigné sa confiance et son soutien au cours de ces trois ans : Chantal Degand, Michèle Dhaussy, Michèle Jacquemelle, Xavier Mamo et Pascale Michalak. Je souhaite également remercier Guy Meunier pour sa lecture avisée de mes travaux et ses remarques constructives. Ma reconnaissance va aussi à mes collègues pour leur disponibilité, leurs conseils et leur aide de quelque nature qu'elle soit : Véronique Caumont, Lionel Cauret, Nabila Chafaï, Corinne Chaton, Frédéric Dufourd, Marc Guyon, Khalil Hélioui, Dominique Lafond, Elaine Mens, Benoît Peluchon, Denis Picon, et plus généralement l'ensemble des équipes R-13 et R-19.

Sur un plan personnel, je dois ma persévérance au soutien de mes amis qui ont été présents dans les moments de réussite comme dans les moments plus difficiles. Tout d'abord, merci aux anciens LLG pour qui ni le temps ni la distance n'auront eu raison de notre amitié : Hugo et Ali (qui seront d'ailleurs probablement déçus que je ne les remercie pas en anglais), Julien et surtout Xavier. Un grand merci à l'équipe du Havre (et ENSAE par ailleurs) dont je citerai en particulier Nath(e) et PF, Céline et Nath, Guillaume et Jérémy, et enfin Charles (qui aura été un précieux soutien dans cette aventure). Je tiens également à remercier tout particulièrement mes compagnons de thèse passés ou présents, qui m'ont encouragée, soutenue et aidée au quotidien (ou presque) : Adrien, Kenza, Marie, Romain. Certains d'entre eux ont même ajouté une dimension technique au soutien qu'ils m'ont accordé puisque sans Oskar, Céline et Guillaume, cette thèse n'aurait littéralement pas pu voir le jour. Un grand merci à Alvaro : je pourrais ici reconnaître que son idée d'utiliser des logarithmes a représenté une avancée spectaculaire dans mes résultats, mais il doit savoir que sa contribution à l'aboutissement de cette thèse s'étend bien au-delà de ce simple détail technique. Enfin, il me reste à souligner ma reconnaissance pour Céline. On peut retrouver son nom dans presque chaque catégorie évoquée précédemment, c'est dire si son aide, tant sur le plan matériel que moral, fut précieuse. Connaissant son point de vue sur les démonstrations publiques d'affection, je ne m'étendrai pas plus sur l'importance que sa présence et son soutien ont pu représenter pour moi au cours de ces trois ans. Je lui dirai seulement que les références bibliographiques sont achevées, elle peut maintenant dormir l'esprit tranquille...

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille. Si je ne les liste pas tous ici, famille nombreuse oblige, ils n'ont pas besoin de savoir que c'est grâce à eux que j'ai pu en arriver là. C'est en particulier auprès de mes frères et soeurs, parents et grand-parents que j'ai trouvé un soutien constant au cours de ces trois années. Malgré l'éloignement physique, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse et leur amour m'ont portée chaque jour. Cette thèse leur est dédiée.

Table des matières

Introduction générale **7**

1 Réforme fiscale environnementale : la dette publique oubliée ? **19**
1.1 Introduction . . . 21
1.2 Economie de la fiscalité et politique budgétaire : les principaux enseignements de la littérature . . . 21
1.2.1 Endettement public, croissance et fiscalité . . . 21
1.2.2 Fiscalité optimale et réforme fiscale . . . 25
1.3 Réforme fiscale environnementale et double-dividende . . . 31
1.3.1 L'instauration d'une taxe carbone : une fiscalité coûteuse en croissance 31
1.3.2 Le double-dividende : concilier fiscalité environnementale et efficacité économique . . . 34
1.3.3 Probabilité d'occurrence du double dividende . . . 36
1.3.4 Les conditions d'occurrence du double-dividende fort . . . 38
1.4 Conclusion : réconcilier politique climatique et politique budgétaire . . . 39

2 Réforme fiscale environnementale : cas d'un modèle OLG d'une petite économie ouverte à deux secteurs de production **45**
2.1 Introduction . . . 47
2.2 Description du modèle . . . 49
2.2.1 Les ménages . . . 49
2.2.2 Les entreprises . . . 52
2.2.3 La pollution . . . 54
2.2.4 Le gouvernement . . . 54
2.2.5 Le marché extérieur . . . 55
2.2.6 L'équilibre général . . . 55
2.3 Résolution du modèle . . . 56
2.3.1 Etat stationnaire . . . 56
2.3.2 Système d'équations dynamiques . . . 58
2.3.3 Calibrage . . . 60
2.4 Analyse positive des taxes . . . 62
2.4.1 Le salaire net réel : une variable centrale pour l'impact d'une réforme fiscale . . . 63
2.4.2 Analyse positive des différentes taxes : variantes chiffrées . . . 64
2.5 Un dividende en PIB : une occurrence éventuelle au détriment du secteur énergétique . . . 69
2.5.1 Scénarios de réformes fiscales environnementales et l'apparition d'un dividende en PIB . . . 69

2.5.2 Probabilité d'occurrence d'un dividende en activité : une situation d'endettement élevée favorable à une amélioration du PIB à long terme 73
2.6 Répartition intergénérationnelle des coûts et bénéfices associés aux réformes fiscales environnementales et double-dividende. 74
2.7 Conclusion 78

3 Coût du CO2, coût de la dette et coût de production dans le secteur électrique 83
3.1 Prioriser le remboursement de la dette publique ou rechercher un double-dividende ? 85
3.2 Coûts complets de production et Coût Moyen Pondéré du Capital 86
3.2.1 Coût complet de production : une approche par le Coût Marginal de Long Terme 87
3.2.2 Coût Moyen pondéré du Capital : un coût de financement spécifique au secteur 89
3.3 Les coûts de production actuels des différentes technologies. 90
3.3.1 Données et hypothèses 91
3.3.2 Le nucléaire 96
3.3.3 Centrales thermiques à combustible fossile 97
3.3.4 Energies Renouvelables 100
3.4 Une évaluation de la rentabilité des investissements : projection des coûts de production à l'horizon 2030 102
3.4.1 Mix électrique et coûts complets de production en 2030 105
3.4.2 Impact de la hausse du coût du capital. 106
3.4.3 Impact de la hausse des prix CO2 et importance de la prise en compte d'une modification du «merit order». 108
3.5 Réforme fiscale climatique et impacts sur les coûts de production : une projection à l'horizon 2030 110
3.5.1 Bouclage économique et correction du scénario de référence 2030 . . 110
3.5.2 Réforme fiscale climatique s'appuyant sur la valeur tutélaire du carbone. 114
3.5.3 Les limites de l'approche. 116
3.6 Coûts des investissements en technologies décarbonées 118
3.6.1 Les différentes options de remplacement 118
3.6.2 Les coûts d'investissement associés aux différentes options. 120
3.6.3 Limites de l'approche 123
3.7 Conclusion 124

Conclusion générale 127

Introduction générale

La dette publique et le changement climatique : deux problèmes à relier. Dans un contexte de crise obligataire des pays européens, le 9 décembre 2011, Sir Nicholas Stern (ancien économiste en chef et vice-président de la Banque Mondiale) déclarait en marge de la conférence climat de l'ONU à Durban (Afrique du Sud) : *"Nous devons gérer le problème immédiat de la stabilité de l'euro. [...] Je pense que c'est aussi le moment de regarder devant nous et de nous demander d'où viendra la croissance en Europe et dans le monde.[...] Cette croissance doit être, à mon sens, une croissance bas carbone (faiblement émettrice de CO2, l'un des principaux gaz à effet de serre (GES) à l'origine du réchauffement). Les deux questions sont donc étroitement liées de ce point de vue."*

Principales sources d'émissions de Gaz à Effet de Serre et potentiels de réduction

Le secteur énergétique : premier émetteur mondial de CO2. Les sources anthropogéniques d'émissions de Gaz à Effet de Serre sont nombreuses mais peuvent être rattachées à six secteurs d'activité : les industries de l'énergie (26% des émissions totales [1], essentiellement liée à la combustion, les industries manufacturières (19%), la sylviculture (17% incluant la déforestation) et l'agriculture (14%), le transport (13%) et le secteur résidentiel et tertiaire (8%) et enfin la gestion des déchets (3%). Les émissions de CO2 [2], le principal contributeur à l'effet de serre (GIEC -2001), sont essentiellement générées au cours de la combustion d'énergie fossile (gaz, charbon et pétrole). D'après l'AIE ("CO2 Emissions from Fossil Fuel Combustion Highlights" - 2012), le secteur énergétique (électricité et chauffage) et le secteur des transports étaient responsables de l'émission de 20 GtCO2, soit près de deux-tiers des émissions mondiales en 2010 (cf figure 1).

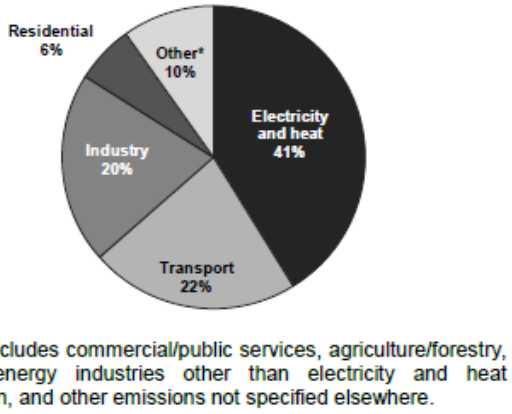

FIGURE 1 – Emissions mondiales de CO2 par secteur en 2010 - *source AIE (2012)*

Cette responsabilité très importante du secteur énergétique dans le changement climatique recouvre en réalité des disparités géographiques très importantes, dans la mesure où, au niveau national la part relative de ces secteurs dans les émissions totales dépend fortement de la politique énergétique du pays mais également de ses conditions économiques et de son niveau de développement. En effet, le lien entre croissance économique et émissions de GES est une thématique récurrente de la littérature de l'économie de l'environnement, remontant aux travaux fondateurs de Grossman et Krueger (1991). Il existerait selon ces

1. Estimations disponibles dans le Rapport d'Evaluation IV du GIEC (2007).
2. La catégorie des Gaz à Effet de Serre recouvre une variété de gaz plus large que le gaz carbonique seul : H_2O, N_2O, CH_4 en particulier entrent également dans cette catégorie.

auteurs une relation en forme de U inversé entre la pollution et le développement économique. Cette courbe appelée Courbe de Kuznets Environnementale[3] (CKE) suppose que pendant les premières étapes du développement économique les agents se soucient peu de l'environnement. Lorsque le niveau de revenu permet de pourvoir aux besoins primaires, un niveau de retournement est atteint, au delà duquel le souci pour l'environnement s'accroît et la tendance s'inverse. La croissance économique s'accompagne d'une amélioration des conditions environnementales et particulièrement d'une réduction de la pollution. Ainsi, l'intensité énergétique des pays développés (OCDE) devrait avoir tendance à décroître alors que la phase d'accélération de la croissance dans les pays en développement devrait s'accompagner d'une augmentation des émissions de CO2. Cette théorie tend à être confirmée par l'évolution géographiques des émissions.

Une forte disparité géographique des sources d'émissions. En 2010, une dizaine de pays étaient responsables, à eux seuls, de presque des deux-tiers des émissions mondiales (cf figure 2), parmi lesquels la Chine, les Etats-Unis, l'Union-Européenne, l'Inde, la Russie, et le Japon. Cette contribution par zone géographique aux émissions de CO2 recouvre des évolutions économiques majeures au cours des dernières années. Alors que le ralentissement économique lié à la crise financière de 2008 s'est traduit par un ralentissement des émissions de la plupart des pays de l'OCDE, l'accélération du rythme de croissance dans les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud) a fait d'eux des contributeurs essentiels aux émissions. La Chine en particulier est devenue depuis 2007 le pays le plus émetteur, devant les Etats-Unis. En revanche, l'intensité CO2 par habitant reste révélatrice des différences de développement entre les zones émettrices, alors que les pays développés restent en tête de ce classement.

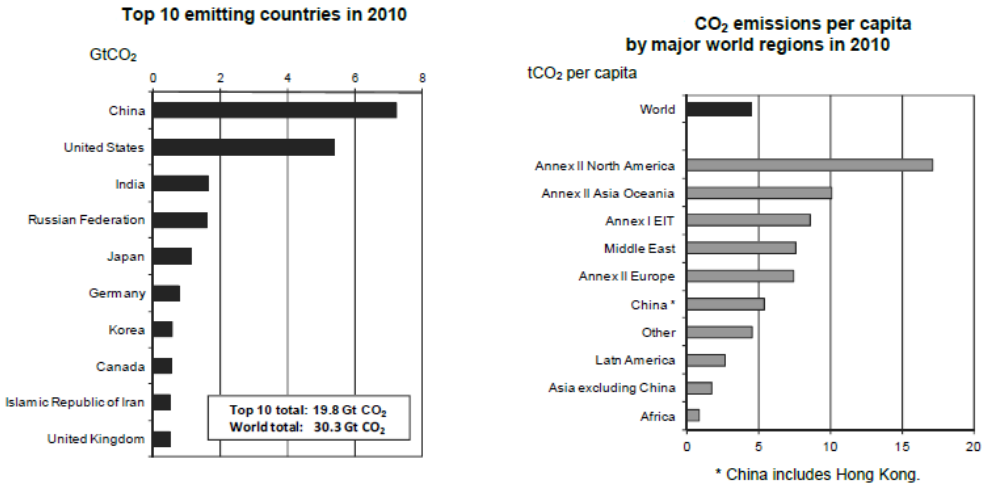

FIGURE 2 – Top 10 des pays émetteurs de CO2 en 2010 en niveau (gauche) et émissions de CO2 par tête par zone géographique (droite)- *source AIE (2012)*

Malgré la baisse des émissions de l'OCDE, due en partie au ralentissement économique dans ces pays, les trajectoires futures d'émissions ne laissent pas présager de réduction

3. Cet intitulé fait référence aux travaux de Simon Kuznets (1950) sur la relation entre le développement économique et les inégalités de revenus. Cette courbe en forme de U inversé a été transposée à la problématique environnementale par la suite. Pour une revue de littérature sur la Courbe de Kuznets environnementale, nous pouvons nous référer à Kijima *et. al.* (2010).

spontanée. Les émissions mondiales de CO2 ont atteint un record de 31.6 Gt en 2011 (d'après les premières estimations de l'AIE) soit une augmentation de 3.2% par rapport aux émissions de 2010. Cette croissance est essentiellement tirée par la hausse des émissions de la Chine (hausse de 6.1% qui a contrebalancé une réduction de 0.6% des émissions au sein de l'OCDE). Pourtant, les débats des dernières années autour des émissions de GES ont contribué à reconnaître l'existence de dommages qui seraient associés au changement climatique, et à populariser l'idée que les comportements émetteurs doivent dorénavant ralentir. Les experts s'accordent à dire que contenir les concentrations de GES en-dessous de 450 ppm est nécessaire pour contenir l'élévation de température à +2°C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, et ainsi limiter la probabilité d'occurrence de tels dommages. Entre atténuation et adaptation il faudrait donc choisir : une limitation des émissions de GES serait coûteuse pour l'économie, mais dans le cas où cet objectif ne serait pas respecté, les économies s'exposeraient également à un risque élevé de dommages générés par le changement climatique.

Atténuation ou adaptation ?

Adaptation : sans politique climatique, une anticipation de dommages économiques futurs, mais dont l'ampleur est incertaine. Il n'existe pas à ce jour de consensus sur l'amplitude des dommages liés au changement climatique, mais les chiffres avancés sont équivalents aux pertes cumulées des deux guerres mondiales et de la Grande Dépression. Stern (2006) estime que, sans action climatique, les dommages liés au réchauffement climatique seraient équivalents à un perte de consommation par tête (en niveau) comprise entre 5% et 20% (cf. figure 3). Les méthodes et hypothèses à l'origine de cette estimation [4] ont été vivement critiquées, laissant penser que les ordres de grandeur avancés en termes de dommages climatiques étaient surévalués. Cependant, le message défendu par l'auteur a été suffisamment médiatisé pour faire émerger un consensus sur la nécessité et l'urgence d'agir : le laissez-faire en matière climatique coûterait bien plus de richesses à l'humanité que les mesures de prévention requises pour maîtriser les émissions de Gaz à Effet de Serre.

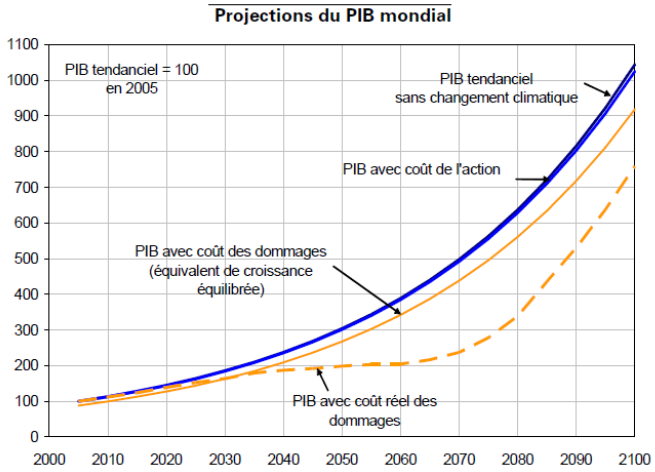

FIGURE 3 – Projections de PIB mondial avec ou sans atténuation - *Stern (2006)*

4. Choix d'un taux d'actualisation très faible en particulier.

Atténuation : des instruments de décarbonation coûteux pour le budget des administrations. Opérer une transition vers des économies décarbonées nécessite d'une part des instruments servant d'incitation à la réduction des émissions de GES (taxes, marché de permis ou normes), et d'autre part des investissements dans des technologies et des modes de production décarbonés. En particulier, selon l'AIE (Energy Technology Perspective 2010) le respect de l'objectif de réduction de 40 GtCO2 [5] à l'horizon 2050 s'appuiera sur quelques leviers : la capture et stockage de carbone (CCS), les énergies renouvelables (ENR), le nucléaire, la substitution de combustibles fossiles et l'efficacité énergétique. Le développement de ces leviers nécessitera des investissements importants (de l'ordre de 8000 Md$ par an au niveau mondial sur la période 2010-2050), qu'ils soient réalisés par les Etats ou les agents privés. Le groupe de travail III du GIEC estime que la stabilisation de la concentration des GES générerait effectivement un coût économique mais que celui-ci resterait raisonnable : une stabilisation entre 445 ppm et 535 ppm coûterait moins de 3% du PIB mondial d'ici à 2030. Pourtant, les conditions de financement, qu'elles s'appliquent aux particuliers ou aux gouvernements, sont et pourraient rester pendant plusieurs années exceptionnellement tendues, pour les pays de la Zone Euro en particulier.

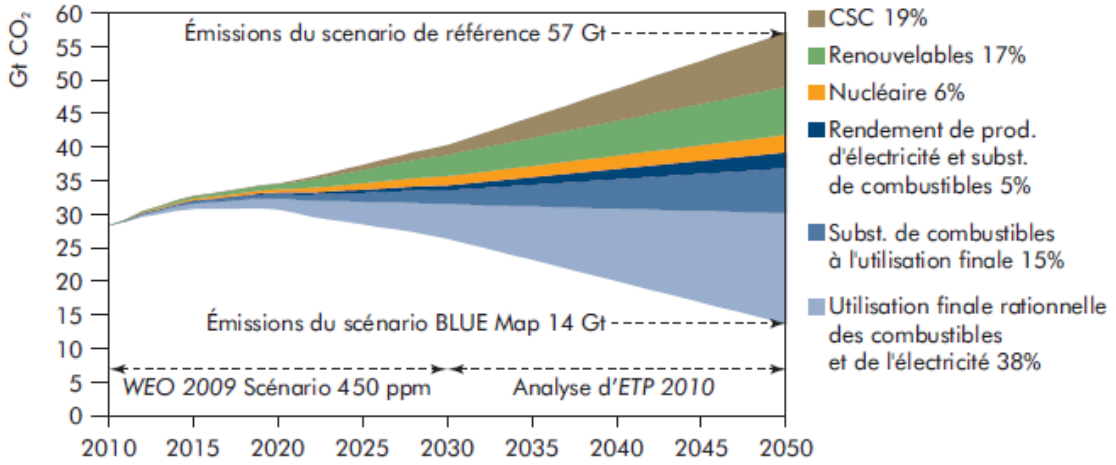

FIGURE 4 – Principales technologies pour réduire les émissions de CO2 dans le scénario Blue Map de l'AIE - *AIE (2010)*

Des conditions économiques mettant en péril une politique climatique volontariste dans les pays de la Zone Euro. Les conditions économiques et sociales dans les pays développés ont profondément évolué au cours des dernières années, suite à la crise financière de 2008 en particulier. Dans la plupart de ces pays développés, la crise a non seulement impacté les dynamiques de croissance mais a également provoqué une aggravation des déficits publics (cf. figure 5). Dans pas moins de douze pays de la Zone Euro, le niveau de dette publique a dépassé le seuil des 60% de PIB imposé comme référence maximale par le traité de Maastricht. La quasi-faillite de pays comme la Grèce ou les mesures drastiques prises par la Commission Européenne à l'encontre de l'Irlande ou du Portugal ont même pu faire penser à une explosion de la Zone Euro. Mais les pays européens ne sont pas les seuls touchés par cette dégradation des finances publiques : les Etats-Unis et le Japon ont connu une augmentation drastique de leur niveau d'endettement au cours des dernières années. Seuls les pays en développement et émergents sont restés relativement

5. Transition depuis les GtCO2 tendanciels vers l'objectif de 15 GtCO2.

épargnés par la crise financière et économique. À plus long terme se dessine pour les pays de la Zone Euro la perspective d'un affaiblissement de la croissance par rapport aux vingt dernières années, sous l'effet du vieillissement de la population et d'un ralentissement des gains de productivité. Ainsi, dans un contexte économique défavorable pour la plupart de ces pays, la problématique du changement climatique pourrait être reléguée au second plan. Les émissions de Gaz à Effet ont été spontanément réduites du fait du ralentissement de la croissance, et les investissements en technologies de décarbonation qui ne semblent alors plus urgent ne pourraient de toute façon être financés par des Etats dont les marges de manœuvre se sont resserrées.

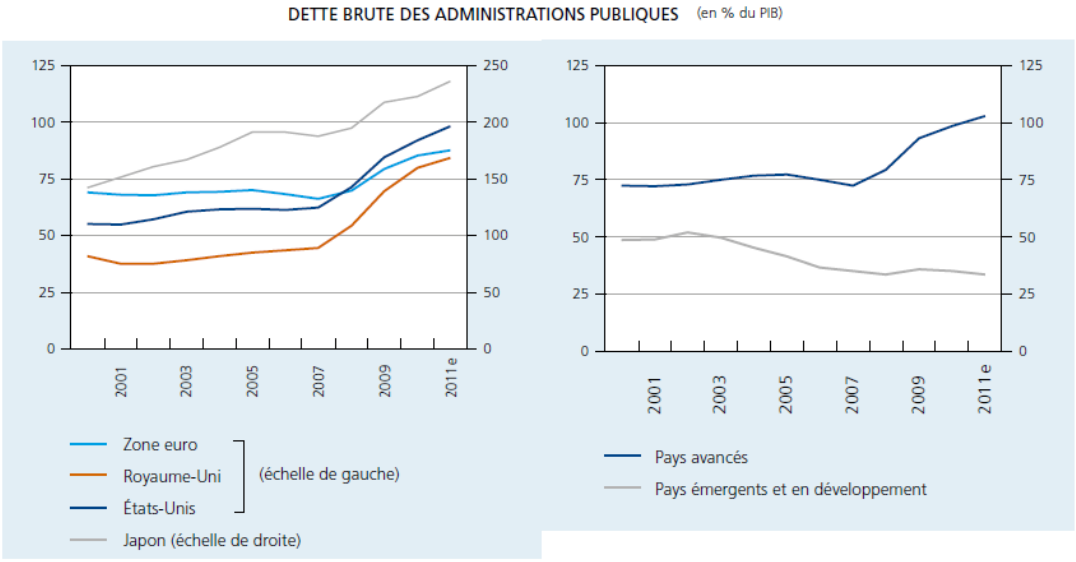

FIGURE 5 – Dette brute des administrations publiques (en % du PIB)- *Commission Européenne (2010)*

Concilier réforme budgétaire et politique climatique

La politique climatique : une problématique intergénérationnelle et supranationale. Les émissions de Gaz à Effet de Serre au travers des comportements de consommation et de production des agents économiques représentent une externalité négative au sens où la qualité de l'environnement (bien public) s'en trouve dégradée. Contrairement à des phénomènes d'externalités traditionnels, tels que la dégradation des routes, le réchauffement climatique est une externalité qui doit être appréhendée sous un angle géographique et temporel plus étendu : l'accumulation de GES dans l'atmosphère dépend des comportements d'émissions au niveau mondial et les effets négatifs liés à cette externalité affectent non seulement le bien-être des générations présentes mais surtout l'utilité des générations futures. En effet, les générations qui ne sont pas encore nées dépendent, par la qualité de l'environnement, des décisions d'aujourd'hui. Dans un monde sans incertitude où l'ensemble des pays émetteurs s'accorderaient sur une politique commune de réduction des émissions des GES, il serait alors possible de déterminer au travers d'un prix mondial du CO2 une politique climatique optimale [6] au regard de la répartition intergénérationnelle des coûts.

6. sous réserve de savoir estimer les coûts des dommages et de l'adaptation.

Les réticences à supporter le coût de la politique climatique : un critère d'équité non respecté. L'existence d'une externalité négative associée aux émissions de Gaz à Effet Serre justifie pleinement d'un point de vue théorique l'adoption d'un prix du CO2 permettant d'internaliser cette externalité. En pratique l'adoption de telles politiques se heurte à plusieurs obstacles cruciaux en termes d'acceptabilité sociale : l'incertitude entourant les dommages climatiques liés aux émissions, le principe d'équité, tant intragénérationnel qu'intergénérationnel, mais également la remise en cause de l'efficacité même de cet instrument. Les incertitudes sur la relation entre trajectoires d'émissions de GES, réchauffement climatique et l'évaluation monétaire des dommages futurs représentent un premier frein à la mise en œuvre d'un prix du CO2 : pourquoi faudrait-il que les générations actuelles supportent le coût de la décarbonation de l'économie alors que la mesure des dommages associés à une situation de laissez-faire sont incertains ? Les gouvernements pourraient dans ce cas attendre que ces informations soient connues avec certitude plutôt que de s'en tenir au "principe de précaution". D'autre part, la politique climatique est supposée avoir des effets inégalitaires, à la fois pour les générations actuelles (effet régressif du prix du CO2 [7]) mais également au travers de la répartition intergénérationnelle des coûts (seules les générations futures bénéficieraient de l'amélioration de la qualité environnementale alors que ce sont les générations actuelles qui supporteraient le coût économique de la transition énergétique). Enfin, dans la mesure où les politiques climatiques seraient implémentées de façon unilatérale (pas d'accord international), les fuites de carbone (délocalisation des entreprises émettrices) remettraient en cause l'efficacité même d'un prix du CO2 sur l'amélioration de la qualité environnementale, puisque ce sont les émissions totales mondiales et pas uniquement nationales qui importent. Alors que ces freins sont valables dans un contexte économique normal, la situation de crise que traversent aujourd'hui les pays européens laisse fortement penser que si une politique climatique doit être mise en place, il faudrait que le prix du CO2 recouvre bien plus qu'un simple rôle d'internalisation.

Un élargissement de la thématique de la politique climatique à une réforme budgétaire. Le contexte économique actuel dans la Zone Euro est marqué à la fois par une faiblesse de la croissance, qui devrait persister à moyen terme, et par la nécessité de consolider les finances publiques. Le vieillissement de la population à lui seul entraînerait une hausse des dépenses publiques de 2.6 points de PIB d'ici à 2030 dans les pays de la Zone Euro, et de 5 points à l'horizon 2060. A politique budgétaire inchangée, la dette publique suivrait alors une dynamique explosive (cf figure 6). Les niveaux d'endettement records enregistrés ces dernières années par les pays européens ont déjà contribué à susciter la méfiance des investisseurs qui doivent dorénavant être rassurés. Les gouvernements se trouvent donc dans une situation délicate : il leur faut relancer la croissance tout en réduisant leurs déficits, c'est-à-dire concilier une contrainte de court-moyen terme (état des finances publiques) avec une vision de long terme (stimulation de la croissance potentielle). La transition vers une économie moins intensive en carbone s'annonce alors délicate dans la mesure où la tolérance politique, vis-à-vis de coûts en activité économique, est relativement restreinte. La mise place d'une politique climatique devrait donc s'inscrire dans un cadre plus large, où la mise en place d'un prix du CO2 servirait de signal-prix pour la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre mais dont la vocation implicite serait de générer des recettes fiscales. Ces recettes devraient alors être utilisées à bon escient, selon les priorités retenues par les Etats : le remboursement de la dette, la réduction des distor-

7. Ce sont les ménages pauvres dont la part de l'énergie dans le panier de consommation est la plus élevée. Une hausse du prix de ce bien pénaliserait relativement plus leur consommation et accentuerait donc les inégalités de revenus.

sions associées au système fiscal initial, et par là une amélioration éventuelle de l'activité économique (dividende en PIB), ou encore le financement des dépenses publiques associées au vieillissement de la population comme cela fut évoqué, en particulier, par Combet *et al.* (2009). La taxation du CO2 serait dans ce cas envisagée comme un instrument s'inscrivant dans un cadre plus large de réforme budgétaire.

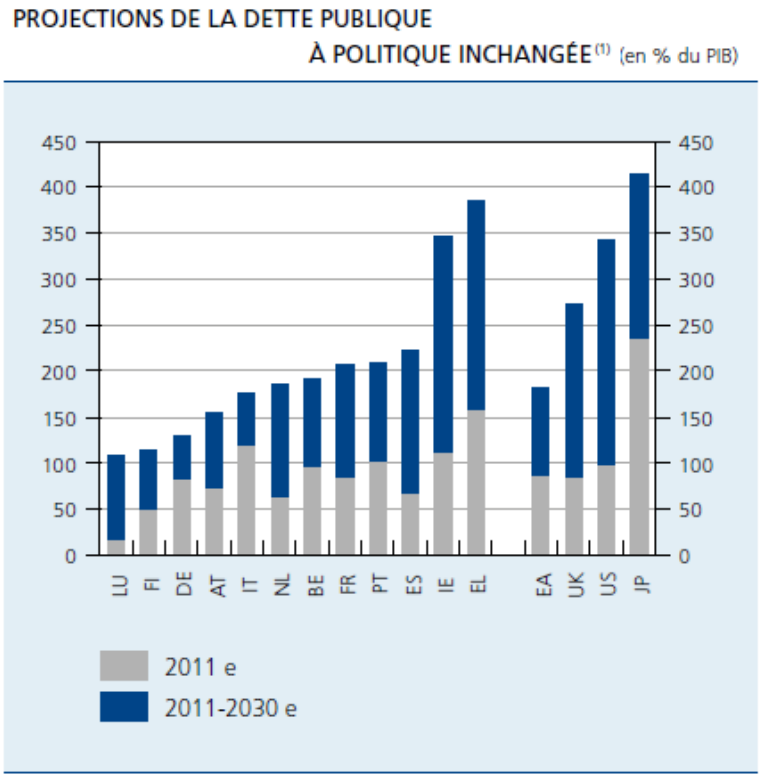

FIGURE 6 – Dette brute des administrations publiques (en % du PIB)- *Commission Européenne (2010)*

Apports et plan de la thèse

Apports de la thèse. D'après les constations précédentes, il apparaît clairement que le contexte actuel des pays européens ne peut être laissé de côté lorsqu'il est question de politique climatique. Alors que la littérature économique s'est très largement penchée sur la problématique des réformes fiscales environnementales, cherchant à montrer qu'il est possible de réaliser une transition vers un sentier de croissance moins carboné à moindre coût économique, nous montrerons que ce raisonnement doit être reconsidéré sous un éclairage dynamique et intergénérationnel lorsque l'on tient compte explicitement des contraintes d'endettement public. Dans cette thèse, nous nous proposons d'étudier les interactions entre politiques climatiques et budgétaires, dans un cadre unifié tenant compte de la dynamique de l'endettement des États, des arbitrages intergénérationnels, de l'ouverture des économies et de l'existence de disparités sectorielles. D'autre part, cette transition vers une économie moins émettrice suppose une modification profonde du système énergétique, et électrique en particulier. Dans des économies européennes où les niveaux d'endettement

souverains très élevés font peser des tensions haussières sur les taux d'intérêt longs, nous montrerons dans quelle mesure les variations du coût du capital peuvent impacter les coûts de production et les décisions d'investissement dans le secteur électrique.

Plan de la thèse Cette thèse s'articulera autour de trois parties. Dans un premier chapitre, nous nous attachons à concilier la littérature traitant des politiques budgétaires et climatiques. En effet, les grands enseignements de la théorie de la fiscalité optimale peuvent trouver une application dans le domaine des réformes fiscales environnementales, en particulier au travers des résultats en termes de distorsions fiscales qui trouvent écho dans la recherche théorique et empirique d'un double-dividende. Il apparaîtra nécessaire d'intégrer à ce raisonnement la notion d'endettement public, instrument à part entière de la politique budgétaire et outil complémentaire de la politique fiscale. Nous identifierons dans quelle mesure l'interaction entre dette publique, imposition et taux d'intérêt joue un rôle, rôle qu'il nous parait indispensable d'intégrer à l'étude des réformes fiscales environnementales.

Dans un deuxième chapitre nous construisons un modèle macroéconomique original développé pour répondre aux questions soulevées précédemment. La construction et la mise en oeuvre de cette maquette, qui représente une petite économie ouverte à deux secteurs de production, calibrée sur les données françaises, fournira des éléments de réponse analytiques et chiffrés quant aux conditions d'occurrence d'un double-dividende dans une économie contrainte par des finances publiques dégradées. De plus, le choix d'un modèle à générations imbriquées nous permettra d'approcher la thématique de la politique climatique et budgétaire en prenant compte des arbitrages intergénérationnels et de montrer que la taxation de l'énergie finale associée à une réduction des charges sur le travail permettrait de minimiser les coûts de la politique climatique en termes de PIB et de dégager un double-dividende.

Enfin, le troisième chapitre de cette thèse est une application au secteur électrique des enseignements dégagés précédemment, secteur en partie représenté dans la maquette que nous aurons utilisée dans le second chapitre. En effet, puisque ce secteur s'appuie en partie sur des technologies de production émettrices, il nous paraît intéressant d'étudier comment à la fois le prix du CO2 mais aussi le coût de la dette publique peuvent affecter son activité actuelle et future. Cette étude passera par une quantification des impacts de plusieurs scénarios de prix et de taux d'intérêt sur ces coûts de production actuels et sur la politique d'investissements, notamment au travers de coûts de financement plus élevés.

Bibliographie

[1] Combet E., Ghersi F., Hourcade J.-C. et C. Thubin (2009) "Economie d'une fiscalité carbone en France",*Centre CIRED HAL*

[2] IEA (2012) "CO2 Emissions from Fossil-Fuel Consumption : Highlights",*IEA Statistics*

[3] GIEC (2012) "Changements climatiques 2007"

[4] Grossman, G.M. et A.B. Krueger (1991) "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement",*National Bureau of Economic Research*

[5] Kijima M., Nishide M. et A. Ohyama (2010) "Economic models for the environmental Kuznets curve : A survey",*Journal of Economic Dynamics and Control*,N° 34, 1187-1201

[6] S. Kuznets (1950) "Shares of Upper Income Groups in Savings",*Shares of Upper Income Groups in Savings*, pp 45- 58

[7] Nautet M. et L. Van Meensel (2011), "Economic impact of the public debt" *Economic Review*, N°3.

[8] N. Stern (2006) "Stern Review : The Economics of Climat Change"

Chapitre 1

Réforme fiscale environnementale : la dette publique oubliée ?

1.1 Introduction

La crise financière débutée en 2008, et suivie d'une récession économique qui persiste encore, a durement affecté les pays de l'OCDE, et en particulier les pays du Sud de la Zone Euro. Alors que les mesures exceptionnelles de soutien à l'activité économique, mises en place pendant cette crise économique, ont eu pour effet de creuser significativement les déficits budgétaires, c'est dorénavant une crise des dettes souveraines qui menace ces pays. Dans un contexte où la croissance restera probablement faible durant plusieurs années (par rapport aux niveaux connus avant la crise), où le vieillissement de la population fera pression sur les dépenses publiques (augmentation de 2.6 points de PIB d'ici à 2030 selon le FMI), les Etats doivent adapter leur politique budgétaire et fiscale pour tenir également compte de contraintes climatiques pour lesquelles ils se sont engagés au niveau européen et international. La littérature s'accorde pour annoncer que cette transition vers un sentier de croissance décarboné sera coûteuse pour les économies. Les gouvernements auront maintenant pour tâche de concilier au mieux dans leur politique budgétaire les objectifs économiques et climatiques de long terme.

En substance, ce premier chapitre cherchera à synthétiser les grands enseignements de la littérature économique afin de mettre en lumière les conditions de réussite d'une réforme fiscale environnementale dans un contexte d'endettement public élevé. Puisque les niveaux d'endettement des Etats semblent impacter (du moins en théorie) la croissance économique et la politique fiscale nous reprendrons dans un premier temps les principaux résultats théoriques concernant les impacts économiques des politiques budgétaires et fiscales (existence de distorsions), afin de démontrer l'utilité de remaniements appropriés de la fiscalité (réforme de TVA sociale par exemple).

Une réforme fiscale environnementale peut en particulier s'inscrire dans cette perspective de politique fiscale optimale (en termes d'efficacité économique) tout en permettant d'orienter les agents vers des comportements plus sobres en émissions de GES. Nous nous intéresserons en particulier aux conditions pour lesquelles un double-dividende peut apparaître (répondant à ces deux objectifs).

1.2 Economie de la fiscalité et politique budgétaire : les principaux enseignements de la littérature

1.2.1 Endettement public, croissance et fiscalité

Andrew Scott (London Business School) l'a évoqué lors d'une présentation au Ministère italien des Finances et de l'Economie en 2009 : les marchés financiers reflètent une inquiétude grandissante des investisseurs quant à l'état dégradé des finances publiques des pays européens. Ainsi, les décideurs politiques font face à une pression de plus en plus importante quant à la considération et l'affichage de politiques fiscales de court mais aussi de moyen terme qui doivent rassurer les marchés. Scott soupçonne que, face à ces contraintes, la décennie connaîtra une révolution académique et institutionnelle sur la politique fiscale comparable à celle qui a remodelée la politique monétaire au cours de années 90. En particulier, la question de l'endettement des Etats, qui devrait perdurer [1] pendant plusieurs années, remet au goût du jour une littérature marginalisée sur les impacts économiques et financiers de la dette publique.

1. En effet, historiquement, si les variations des recettes et dépenses publiques sont en général affectées pendant quelques années, le niveau de dette est lui affecté de manière durable et une réduction de l'endettement s'effectue sur plusieurs décennies.

Face aux situations d'endettement élevé des pays développés, les craintes partagées par les économistes et les décideurs politiques sont les suivantes :

- une large émission de dette souveraine menant à une augmentation des taux d'intérêts, un effet d'éviction et in fine une dynamique instable de la dette,
- une politique fiscale urgemment reconsidérée et consistant en particulier à augmenter la pression fiscale,
- une réaction des gouvernements consistant à générer de l'inflation.

Dans cette première partie, nous répertorions les principaux enseignements de la littérature concernant le lien entre dette publique et croissance économique, en confrontant à la fois les résultats empiriques et les canaux de transmission théoriques.

Recherche empirique d'un lien entre dette souveraine et croissance

L'analyse des interactions entre dette publique et activité économique trouve ses origines dans un article fondateur de Diamond (1965, [31]) et s'est très largement étoffée au cours des années 90. En revanche, jusqu'à dernièrement, il existait peu de contrepartie empirique à cette littérature théorique, les quelques résultats existants se focalisant sur les économies en développement. Le contexte aidant, la recherche d'une évaluation chiffrée des impacts de l'endettement public sur la croissance a connu un nouvel essor ces deux dernières années. Reinhart et Rogoff (2010, [62]) et Kumar et Woo (2010, [43]) offrent pour la première fois une contrepartie empirique aux prédictions théoriques : il existe dans les faits une corrélation négative entre dette publique élevée et croissance [2].

Dans un cadre néoclassique, l'accent est généralement mis sur l'éviction des investissements productifs et l'équivalence ricardienne. Nautet et Van Meensel (2011, [54]) identifient ainsi théoriquement au moins deux canaux principaux par lesquels un accroissement de la dette publique peut impacter négativement la croissance de long terme : une diminution de l'investissement productif et une hausse des taux d'intérêt (effet d'éviction) dont découlent une baisse de la productivité du travail et une moindre innovation ; et l'accentuation du risque souverain qui alourdit les coûts de financement et menace la solvabilité des finances publiques.

Reinhart et Rogoff (2010, [62]) ont récemment analysé les évolutions conjointes de la dette publique et du taux de croissance de long terme sur un échantillon d'une quarantaine de pays pour une période s'étalant sur deux siècles. Leurs résultats suggèrent qu'il n'a y pas de lien évident entre ces deux variables lorsque le ratio dette/PIB est inférieur à 90%. Au delà de ce seuil, en revanche, le taux de croissance médian diminue d'un point de pourcentage et le taux de croissance moyen diminue davantage. L'existence d'un tel seuil d'endettement semble être confirmé par les études économétriques les plus récentes. Restreignant leurs données à douze pays de la zone euro, Checherita et Rother (2010, [26]) observent un impact clairement négatif sur la croissance lorsque la dette excède le seuil de 90% du PIB, mais qui peut se révéler à partir d'un seuil de 70%. Cechetti et *al.* (2011, [23]), sur un panel un peu plus large (données annuelles du PIB par tête et du stock de dette du secteur non financier pour 18 pays de l'OCDE sur 1980-2010) évaluent quant à eux ce seuil à 85%.

L'étude est prolongée par Kumar et Woo (2010, [43]) qui appliquent des méthodes

2. A proprement parler, la littérature théorique traitant des impacts de l'endettement dans le cadre de modèles à générations imbriquées identifient les canaux de transmission de l'endettement à l'activité économique, et pas directement à la croissance. La recherche d'une corrélation entre niveau de dette et croissance n'illustre donc pas *exactement* les conclusions théoriques sur le sujet mais les généralise. Cette recherche empirique se rapproche plutôt des conclusions théoriques obtenues dans le cadre de modèles de croissance endogène, une approche privilégiée en particulier par Saint Paul (1992, [64]).

économétriques sur un panel d'économies (développées et émergentes) au cours des 40 dernières années. Ils montrent alors que pour un ratio dette sur PIB qui augmente de dix points de pourcentage, la croissance annuelle du PIB réel par tête diminue d'environ 2 points de pourcentage par an sur l'ensemble du panel, avec un impact plus atténué dans les économies avancées. Cet effet s'expliquerait essentiellement par un ralentissement de la croissance de la productivité du travail dûe à un moindre investissement [3].

Enfin, Panizza et Presbitero (2012, [56]), de leur côté ne rejettent pas l'hypothèse d'une corrélation négative qui semble exister entre la croissance et la dette, notamment à partir de niveaux élevés d'endettement mais viennent nuancer ces résultats. En effet, comme les auteurs le rappellent, corrélation ne signifie pas causalité. Ce lien entre les deux variables pourrait simplement s'expliquer par le fait qu'une faible croissance économique entraîne des niveaux élevés d'endettement. En revanche, ils identifient un canal spécifique par lequel cette causalité se vérifierait : un niveau d'endettement élevé peut mener à des politiques budgétaires restrictives, qui déprimeront l'activité économique.

En conclusion de ces études, il semble bien qu'il existe un lien empirique négatif entre dette publique et croissance économique, surtout lorsque le ratio d'endettement du pays excède un certain seuil. Les Etats auraient donc tout intérêt à mettre en place dès aujourd'hui des politiques de consolidation budgétaire afin de réduire leur endettement. Le FMI, dans ses "Perspectives pour l'économie mondiale de 2010" estime qu'une réduction permanente de 10 points du ratio dette/PIB du G3 (Zone Euro, Etats-Unis et Japon) mènerait à une amélioration du PIB de 1.4% à long terme. D'après Nautet et Van Meensel (2011, [54]), pendant les trois premières années d'une consolidation budgétaire, les coûts seraient supérieurs aux gains, mais au-delà de cinq ans, les gains compenseraient exactement les pertes. Ces résultats s'appuient sur les différents canaux de transmission théoriques par lesquels la dette pèse sur l'activité économique, et qui sont identifiés dans la section suivante.

Impacts théoriques de la dette sur la sphère économique et financière

La littérature théorique, bien que très fournie, laisse souvent aux lecteurs un sentiment de frustration : cette littérature assez peu de préconisation *pratique* quant à un niveau de dette publique optimale [4]. Il est simplement reconnu qu'un niveau trop faible d'endettement ou au contraire un niveau trop élevé sont dommageables pour l'économie. Le concept de dette optimale est donc souvent laissé de côté au profit d'un concept de dette publique maximale acceptable, puisque les économistes sont plus loquaces en ce qui concerne la manière dont le niveau de dette devrait affecter l'économie. La définition canonique stipule que le niveau d'endettement soutenable doit être égal à la valeur actualisée des excédents primaires futurs, en référence au concept de solvabilité intertemporelle (pas de jeu à la Ponzi). Un endettement public trop élevé devrait en théorie affecter l'activité économique via plusieurs canaux de transmission bien identifiés dans la littérature.

Historiquement, si les variations des recettes et dépenses publiques sont en général affectées par des chocs exogènes pour quelques années, le niveau de dette est lui affecté de manière plus durable. Une réduction de l'endettement s'effectue donc sur plusieurs décennies [5]. La dynamique intrinsèque du taux d'endettement b (ratio dette-PIB) dépendra du déficit (ou excédent) primaire mais aussi de paramètres de l'économie comme taux de croissance du PIB g et le taux d'intérêt réel r. Le niveau d'endettement peut donc se stabiliser automatiquement grâce à l'obtention d'un excédent primaire spécifique apppelé

3. Quand la dette augmente de 10 points de pourcentage, l'investissement diminue de 0.4 point

4. Le modèle OLG classique donne une solution en fonction de la situation économique initiale en termes d'accumulation du capital.

5. Alesina et al. estiment que la durée moyenne des consolidations fiscales est de 20 ans.

excédent primaire d'équilibre e et défini par :

$$e = b(r - g).$$

Ainsi, les fluctuations du PIB, de l'inflation et des taux d'intérêt, ainsi que la politique fiscale sont autant d'éléments dont il faut tenir compte dans les études des politiques budgétaires.

Bien que plusieurs courants de pensée s'opposent sur le sujet [6], il est communément admis qu'une hausse de la dette aurait un effet négatif transitoire voire permanent sur la croissance, en transitant par les canaux décrits ci-après.

L'éviction du capital privé et la hausse des taux d'intérêt. Plusieurs théories s'affrontent quant à l'effet de la dette publique sur l'épargne privée. La théorie la plus communément acceptée (non ricardienne [7]) est qu'une hausse de l'emprunt public réduit l'accumulation de capital privé. Ceci tient au fait qu'en poussant les taux d'intérêt de long terme à la hausse [8], une augmentation de la dette ponctionne une plus grande partie de l'épargne domestique, relativement à l'investissement productif. Une diminution du stock de capital productif devrait alors diminuer la productivité du travail et la productivité totale des facteurs, ce qui réduit la croissance potentielle.

Le resserrement de la politique budgétaire, à savoir une diminution des dépenses publiques et/ou une augmentation de la pression fiscale. L'augmentation de la dette conduit à un relèvement des charges d'intérêt apparaissant dans la contrainte budgétaire de l'Etat. Celle-ci doit alors être compensée par une réduction des dépenses publiques ou une augmentation des recettes fiscales afin de réajuster le solde primaire, chacune de ces mesures pouvant peser sur la croissance. En effet, selon la mesure fiscale introduite, des effets négatifs peuvent se faire sentir sur la consommation (augmentation de la TVA et accises énergétiques), l'investissement (augmentation des charges fiscales sur le capital), ainsi que sur l'offre de travail (cas des taxes sur les salaires). Il est communément reconnu qu'une politique d'assainissement des finances publiques est coûteuse en activité économique, du moins dans les premières années, en raison des rigidités nominales provoquant une baisse de la demande.

L'inflation. Une partie de la littérature s'est concentrée sur la problématique plus spécifique de la monétisation de la dette (Sargent and Wallace (1981, [65]), Barro (1995, [12]), Cochrane (2011, [29])). Avec une dette publique fortement accrue, les pouvoirs publics peuvent être tentés de réduire la valeur de cette dette en créant de la monnaie, ce qui génère à terme de l'inflation. Dans ce cas, la poussée d'inflation peut conduire à une situation d'hyperinflation, comme cela fut observé par le passé (après une guerre ou des chocs économiques extrêmement négatifs).

6. Pour un bon aperçu de la littérature théorique sur la dette souveraine, nous pouvons nous référer à l'article d'Elmendorf et Mankiw (1999, [34]) paru dans le Handbook of Public Economics.

7. La théorie ricardienne consiste à considérer que les agents anticipent les variations futures de politique fiscale. Ainsi pour une hausse de dette aujourd'hui, les agents anticipent une hausse de la pression fiscale plus tard (nécessaire pour rembourser cet excédent de dette). Ils épargnent donc *plus* aujourd'hui en prévision de la hausse future des taxes et il n'y a donc pas d'effet d'éviction.

8. Baldaccci et Kumar (2010, [10]) ont confirmé empiriquement que des niveaux d'endettement et de déficits plus élevés mènent à des taux d'intérêt de long terme plus élevés via une augmentation des primes de risques apposés sur le taux d'intérêt de base.

L'exposition accrue aux chocs économiques et financiers. Au delà de sa vocation à financer des investissements ou dépenses publiques, la dette publique possède un rôle annexe qui s'est pourtant révélé crucial au cours de ces dernières années. En effet, la dette peut être également considérée comme un "stock tampon" permettant d'absorber des chocs économiques ou financiers exogènes (Barro (1979, [11]), Aiyagari *et. al.* (2002, [1]), Marcet et Scott (2009, [49])). Comme ce fut typiquement le cas pour la crise financière de 2008, les gouvernements doivent soutenir l'activité en période de récession et ne disposent alors que de cet instrument pour le faire. Pour des niveaux initialement très élevés de dette, il est alors beaucoup plus coûteux pour les Etats de financer des mesures ponctuelles.

D'après Giannitsarou et Scott (2008, [37]) [9], plus de 85% des déséquilibres des finances publiques sont corrigés à l'aide de variations de la balance primaire (modifications des taxes et/ou de des dépenses publiques), alors que les fluctuations du PIB, de l'inflation et des taux d'intérêt ne jouent qu'un rôle mineur dans ce retour à l'équilibre budgétaire. Des différents canaux evoqués précédemment, il nous faudra donc retenir comme effet de premier ordre l'impact de l'endettement des Etats sur leur politique fiscale. Dans cette perspective, nous passons maintenant en revue les grands enseignements de la fiscalité, du concept de "perte sèche" jusqu'aux bénéfices attendus d'une réforme fiscale bien pensée.

1.2.2 Fiscalité optimale et réforme fiscale

Pertes sèches et fiscalité optimale

Au delà de sa vocation à financer les dépenses publiques et de corriger certaines externalités (pollution par exemple), la fiscalité a surtout pour principe de modifier la répartition primaire des revenus via un système de prélèvements et de transferts afin de ramener l'équilibre concurrentiel vers l'optimum de Pareto (décentralisation de l'équilibre). L'élément central de la fiscalité optimale est l'information. Si l'Etat pouvait observer parfaitement et sans coût toutes les caractéristiques individuelles des agents, alors il pourrait opérer cette redistribution aux moyens de transferts forfaitaires, sans perte d'efficacité, et le problème de taxation optimale deviendrait trivial. Sans cette information privée, ce qui est le cas en pratique, le gouvernement doit alors utiliser des instruments fiscaux de second rang (taxes proportionnelles par exemple), assis sur des variables observables, mais impliquant une perte d'efficacité (distorsion).

En influençant les prix relatifs des facteurs et biens, les instruments de taxation non forfaitaires génèrent des distorsions dans les comportements des agents et éloignent ainsi l'économie de son optimum de premier rang. En règle générale, lors de la modification de la structure fiscale du pays, les agents économiques réagissent en modifiant leurs décisions de consommation ou d'épargne, leur offre de travail, voire leur source de revenus. Ainsi, une hausse de la taxation sur les revenus du travail n'aura pas les mêmes effets qu'une hausse de la TVA : la perte d'efficacité d'une taxe est d'autant plus importante que l'effet de substitution créé est élevé. Ainsi, la politique fiscale doit poursuivre sa vocation redistributive tout en compromettant le moins possible l'efficacité économique et c'est cet arbitrage entre équité et efficacité qui est à l'origine d'une littérature foisonnante sur la fiscalité optimale. L'enjeu de la discipline est donc de choisir à la fois le niveau et la structure des prélèvements obligatoires qui répondent aux objectifs de justice sociale et qui minimisent les pertes d'efficacité économique liées à l'imposition.

9. Les auteurs ont réalisé des estimations économétriques à partir des données 1960-2005 concernant les pays du G7 (à l'exception de la France).

Le terme de distorsion fiscale est un concept largement utilisé dans la littérature économique, et fait référence à une déviation de la situation étudiée par rapport aux conditions de l'efficacité économique (dite optimalité de Pareto). En effet, l'introduction de taxes non-neutres (cas des impôts proportionnels) entraîne une modification du système de prix relatifs, facteur de l'équilibre économique.
En ce sens, le terme de distorsion fiscale fait directement référence à la perte sèche (ou charge excédentaire) supportée par le consommateur, c'est-à-dire l'équivalent monétaire de la perte de bien-être pour les consommateurs provenant de l'impôt par rapport à un impôt forfaitaire (neutre).
Enfin, la notion de distorsion, est parfois élargie et fait référence à la fois aux pertes sèches générées par les taxes, mais aussi aux modifications des incitations qui en découlent (recherche de niches fiscales, fraude, etc.). Le coût social marginal des fonds publics donne une première idée de l'amplitude des distorsions fiscales dans un pays. Lorsque l'Etat décide de prélever 1€ supplémentaire par un impôt distorsif, la perte de bien-être supportée par les consommateurs est équivalente non pas à 1€ de consommation mais à (1+x)€ (coût social marginal des fonds publics). Ce coût devrait se situer entre 1.4 et 1.5 aux Etats-Unis selon Nordhaus (1991, [55]). En France, les dernières estimations du CSMFP ont été conduites par Bernard et Vielle (2003, [13]) et aboutissent à une valeur de 1.13 (probablement sous-estimée).

Encadré 1.1: Distorsions fiscales et pertes sèches

La théorie de la fiscalité optimale repose sur les travaux fondateurs de Ramsey (1927, [61]) et de Mirrlees (1971, [52]), qui a le premier proposé une modélisation de l'impôt optimal. Cette littérature s'est étendue avec toujours pour vocation la recherche d'un système fiscal qui soit efficace, c'est-à-dire qui minimise les distorsions dans une économie à un ou deux consommateurs (Allingham et Sandmo (1972, [2]) et Stiglitz (1982, [68])), mais également équitable, c'est à dire qui redistribue les revenus en fonction de l'aversion sociétale pour l'inégalité (d'Autume (2000, [30]) et Diamond (1998, [32])).

La thématique de la politique fiscale est généralement étudiée dans un cadre à la Ramsey : l'Etat détermine le profil dynamique des taxes linéaires de façon à maximiser une fonction de bien-être social qui reflète ces deux arbitrages[10]. Bien que la plupart des résultats sur la taxation optimale proviennent de l'utilisation d'une même classe de modèles (modèle à agent représentatif à durée de vie infinie), la variété de choix de spécification possibles à la fois pour les hypothèses sous-jacentes au fonctionnement de l'économie mais surtout pour cette fonction de bien-être social laisse alors présager pourquoi le champ d'étude sur le sujet est si vaste. Cependant, il est tout de même possible de dégager de cette littérature les grands résultats suivants :

- le taux d'imposition optimal du capital devrait tendre vers zéro à long terme,
- la taxation du salaire devrait être non linéaire (dépendre de la classe de revenus considérés),
- le taux de taxation d'un bien devrait dépendre de son élasticité-demande,
- sans distorsions préexistantes, le niveau de la taxe environnementale devrait être égal au dommage environnemental marginal.

Les résultats précédents sont expliqués plus en détail dans les encadrés ci-après.

10. L'efficacité économique y est représentée au travers des utilités individuelles des agents. Dans ces modèles, la capacité contributive des agents dépend de leurs revenus, ce qui signifie implicitement que le cœur de la problématique de la taxation optimale réside dans la relation entre taxation et revenus du travail et l'équité au travers de la spécification de l'agrégation de ces différentes utilités (moyenne pondérée).

Taux d'imposition optimal du capital : nul en moyenne à long terme. L'étude du taux d'imposition optimal du capital est au cœur d'un des plus grands débats de la théorie de la fiscalité. Ce débat trouve son origine dans le résultat bien connu de Chamley (1985, [24] et 1986, [25]) et Judd (1985, [40] et 1987, [41]) : le taux de taxation sur le revenu du capital devrait converger vers zéro à long terme[11]. La confrontation avec la réalité (recours dans les faits à la fiscalité sur le capital), mais aussi avec les conséquences que ce résultat pourrait générer en termes de politique fiscale ont donné naissance à un vif débat parmi les économistes. En effet, dans ce cas, l'Etat aurait intérêt à taxer à plus de 100 % le capital en période initiale pour satisfaire sa contrainte budgétaire pour toutes les périodes suivantes. C'est ainsi que la littérature plus récente s'est attachée à remettre en cause ce résultat via une contrainte sur la fiscalité de première période ou la considération de l'équité intergénérationnelle.

Imposition des biens et débat entre fiscalité directe et indirecte : elle est utile si les taux de taxation sont différenciés selon les biens. La taxation des biens s'inscrit dans une controverse toujours d'actualité au sujet de l'intérêt ou non d'une fiscalité indirecte. La distinction entre fiscalité directe et indirecte est mal définie. Atkinson (1977, [4]) suggère de distinguer ces deux types de fiscalité sur la base d'une information observable : la fiscalité directe concerne un instrument fiscal directement assis sur une caractéristique individuelle observable (cas de l'impôt sur le revenu) alors que la fiscalité indirecte est basée sur des transactions anonymes (TVA par exemple). Deux principaux points de vue s'opposent : pour les uns la fiscalité indirecte servirait l'objectif d'efficacité et contrebalancerait la fiscalité directe qui, elle, vise l'équité[12], alors que pour les autres la fiscalité directe est dans tous les cas préférable, une taxe sur les biens étant alors redondante (Atkinson et Stiglitz (1976, [5])).

Taux d'imposition optimal des revenus du travail : il est préférable d'adopter une taxation progressive. Puisque ce type de taxation repose sur une caractéristique directement observable, la théorie de la taxation optimale voudrait que l'Etat réalise une utilisation non-restreinte de cette information en utilisant des dispositifs tels que la progressivité de l'impôt (impôt non linéaire) : la taxation du travail devrait être réalisée selon la classe de revenus de l'individu dans la société (Saez). Les charges sur les revenus du travail devrait être lissées dans le temps grâce l'émission de dette publique (Lucas et Stockey (1983, [48]) et Ljungqvist et Sargent (2004, [47])). Ainsi, si l'économie converge vers un état stationnaire et que l'on adopte l'idée qu'une fiscalité indirecte n'est pas nécessaire, les finances publiques ne devraient à terme reposer que sur les taxes sur les revenus du travail (fiscalité sur le capital nulle).

Encadré 1.2: Principales préconisations de la littérature économique sur la fiscalité optimale.

Niveau pigouvien de la taxe environnementale dans un cadre sans distorsions pré-existantes : Ce type de taxe a pour vocation d'intégrer explicitement dans le prix d'un bien ou un service le coût environnemental induit par l'émission de Gaz à Effet de Serre ou la pollution par exemple. Dans une économie initialement à son optimum de premier rang (pas d'autres distorsions fiscales), l'économiste britannique a démontré que le niveau de cette taxe doit être égal au dommage marginal environnementale et être directement assise sur les sources d'émissions (ou pollution). Malheureusement, dans la pratique l'évaluation des coûts environnementaux est délicate à réaliser, en particulier pour une pollution de stock, ce qui est le cas des émissions de GES. Ainsi, le dommage environnemental marginal devrait mesurer la valeur actualisée des dommages futurs liés à une émission d'une tonne de CO2 supplémentaire, au travers de ses effets sur l'évolution de la température atmosphérique et océanique. Ne serait-ce que la difficulté d'estimer le lien entre concentration de CO2 et température atmosphérique (cf. discussions du GIEC par exemple) reflète l'impossibilité de mesurer précisément le coût marginal environnemental et donc le niveau pigouvien de la taxe carbone. En pratique, la valeur du carbone retenue suit une trajectoire qui a été déterminée comme étant celle permettant de respecter une cible d'émissions de GES. Il est important de souligner que si la prise en compte de distorsions fiscales préexistantes modifie les résultats précédents, l'existence d'externalités intergénérationnelles est elle-aussi un facteur déterminant qui éloigne le niveau optimal de la taxe environnementale de son niveau pigouvien (cf. Fodha).

Encadré 1.3: Principales préconisations de la littérature économique sur la fiscalité optimale (suite).

Les résultats évoqués précédemment passionnent toujours autant les économistes, qui, en relâchant telle ou telle hypothèse du cadre canonique à la Ramsey [13], cherchent à confirmer ou infirmer ces prédictions de taxation optimale. Cependant, la complexité du sujet et la variété des choix de spécification qui impactent la dynamique des profils de taxes laissent entrevoir la difficulté à dégager un message politique à transmettre aux dirigeants quant à la fiscalité optimale à adopter.

Une approche duale de la fiscalité optimale : trouver pas à pas un vecteur de taxes plus efficace Une approche alternative de cette thématique de la taxation optimale a été adoptée par certains auteurs, dont les études reposent en particulier sur des modèles à générations imbriquées (extensions du modèle d'Auerbach et Kotlikoff (1987, [6])). A la base de ces modèles se trouve la différenciation des horizons de planification : le gouvernement est censé perdurer à l'infini alors que les ménages ont une durée de vie finie et planifient leurs comportements en fonction de cet horizon de temps. Ce type de modèles permet alors de prendre explicitement en compte la thématique de l'équité intergénérationnelle. Mais à l'inverse d'un cadre à la Ramsey évoqué précédemment, ce type de modèle permet de s'intéresser plutôt à une analyse positive et non normative de la fiscalité : au lieu de poser le problème de maximisation du bien-être social, il s'agit plutôt d'examiner l'impact de changements exogènes de la politique fiscale. En effet, parce que différentes générations coexistent, il est délicat d'agréger les utilités individuelles en une fonction de bien-être social. Pour autant, ce cadre permet toutefois une analyse rigoureuse du bien-être des individus et de la distribution intergénérationnelle des richesses.

13. Aguiar et Amador (2011, [3]) montrent en particulier que différentes hypothèses sur le taux d'escompte des agents privés peut retourner le résultat de Ljungqvist et Sargent [47] : la taxation sur les revenus du travail devrait tendre vers zéro à long terme alors que les recettes fiscales proviendraient uniquement des charges sur le capital (non nulles)

La fiscalité optimale et la réforme fiscale : deux approches complémentaires. L'approche positive facilite en partie la résolution des modèles : il n'est pas nécessaire de connaître les trajectoires dynamiques complètes des variables entre un état initial et l'optimum mais seulement les variations de comportements des agents à la marge pour une légère modification du système fiscal. Il s'agit en réalité d'une vision duale de la fiscalité optimale : il ne s'agit pas de trouver le meilleur vecteur de taxes mais d'en identifier un qui soit préférable à la situation initiale. C'est par une implémentation successive de ce raisonnement qu'il serait alors possible de se rapprocher et d'identifier ce vecteur optimal. D'un certain point de vue, cette vision progressive de la fiscalité optimale est plus en accord avec la réalité que l'approche normative : pour une politique fiscale déjà en place, les gouvernements chercheront à réaliser des réformes à la marge afin d'augmenter l'efficacité du système budgétaire initial. Le vecteur optimal de taxes devrait être théoriquement atteint lorsque aucune réforme fiscale ne permet plus d'améliorer le bien-être social. Dans la pratique, cette approche pas à pas pourrait ne jamais conduire le système fiscal à ce vecteur optimal, si la direction à suivre n'était pas indiquée par des résultats déterminés à l'aide de maximisation d'une fonction du bien-être social. En ce sens, les deux approches évoquées précédemment sont complémentaires : si la pratique veut que seule une réforme marginale de la politique fiscale soit implémentée, il faut tout de même que cette réforme fasse évoluer le système de taxation dans la bonne direction, que seule une approche normative pourra indiquer. Si nous choisissons par la suite d'aborder dans notre exercice de modélisation (chapitre 2) une approche positive de la problématique, les théorèmes évoqués précédemment sur la taxation optimale des différents biens et facteurs, y compris le facteur responsable des externalités (énergie), devront sous-tendre notre analyse.

La réforme fiscale : une alternative préférable à l'augmentation des prélèvements obligatoire

Comme nous l'évoquions précédemment, l'objectif premier de la fiscalité est d'assurer à la fois équité et efficacité dans l'économie. Mais en pratique, l'imposition possède une troisième vocation : assurer des recettes permettant d'équilibrer le budget de l'Etat. Dans un contexte actuel de consolidation budgétaire, les gouvernements peuvent alors être tentés d'augmenter les prélèvements obligatoires. Pourtant, comme Arthur Laffer l'a popularisé à la fin des années 70, "l'allergie fiscale" peut conduire à l'inverse de l'effet escompté. Jean-Baptiste Say faisait référence à cet effet lorsqu'il déclarait "qu'un impôt exagéré détruit la base sur laquelle il porte". Ce concept, illustré par la courbe dite "de Laffer", stipule qu'à partir d'un certain seuil d'imposition, la relation positive entre la croissance du taux d'imposition et la croissance du produit de cet impôt est négative. Cette théorie reflète l'idée que pour un taux d'imposition élevé les agents sont désincités à l'activité (effet de distorsion) ; la base fiscale se réduit plus que ne recouvre l'augmentation du taux de prélèvement. Contrairement à l'intuition première, le meilleur moyen de réduire les déficits publics pourrait donc passer par une réduction des taux d'imposition.

Cependant, la validité empirique de cette courbe de Laffer reste encore controversée à ce jour. D'une part, le point d'inflexion de la courbe de Laffer (taux d'imposition optimal) reste inconnu, et d'autre part l'histoire récente plaide à la fois pour et contre cette théorie. En effet, l'observation des pays scandinaves où le taux de prélèvements a pu dépasser les 70%, sans entraîner les conséquences que prévoyait Laffer, montrerait que si cette théorie était vraie le taux d'imposition optimal serait supérieur à ce niveau et encore jamais atteint par aucun pays. L'augmentation des recettes fiscales passerait donc bien par l'accentuation des prélèvements. En revanche, le fait qu'en 2006 le Trésor Américain ait atteint le second

point le plus haut de son histoire, en termes de recettes fiscales, suite à la baisse des taux d'imposition de 2003, est pour certains économistes une illustration de la pertinence et de l'existence de la courbe de Laffer. Si l'idée de réduire le montant total des prélèvements obligatoires semble difficilement acceptable (politiquement parlant), il existe pourtant une possibilité qui intègre l'adage "trop d'impôt tue l'impôt" : il suffirait d'entreprendre une réforme fiscale consistant à baisser certaines charges et à en augmenter d'autres, à équilibre budgétaire inchangé *ex ante*.

Il y a quelques années, le gouvernement français avait évoqué la possibilité de procéder à une réforme fiscale, dit de TVA sociale. Reposant sur le principe précédemment expliqué, l'objectif de cette réforme était de recombiner les taxes sur les revenus du travail et de la TVA de manière à diminuer les inefficiences liées à la situation initiale. Réduire les cotisations sociales en augmentant en contrepartie le taux de la TVA devait pouvoir, à montant total de prélèvements obligatoires inchangé, stimuler l'emploi et l'activité économique. Stéphane Gauthier (2008, [36]) avait en particulier montré à l'aide d'une maquette de l'économie française qu'une baisse des cotisations sociales de 13 Md € financée par la TVA conduirait à une hausse de l'emploi estimée à 50000 individus dans le cas d'allègement uniforme des cotisations, et de 250000 emplois dans le cas d'allégement des charges pour la main d'œuvre peu qualifiée uniquement. D'autres pays européens, comme l'Allemagne, ont également montré leur intérêt pour ce type de réforme, en anticipant l'alternative qu'elle pourrait présenter face à la pression que le vieillissement de la population ferait peser sur les dépenses publiques à moyen terme.

La popularité des réformes fiscales consistant à remplacer des impôts directs (considérés comme plus distorsifs) par une fiscalité indirecte (la TVA par exemple) est bien illustrée par les nombreux articles qui sont consacrés à ce sujet. Nous pouvons citer en particulier un article de Botman et Danninger (2007, [15]) consacré à une réforme de type TVA sociale et ses implications en Allemagne. En s'appuyant sur le modèle Global Fiscal Model du FMI, les auteurs montrent qu'une réforme de TVA sociale permettrait d'améliorer la croissance à long terme au travers d'une hausse de l'emploi et de l'investissement, bien que cela se fasse au prix d'une contraction de la consommation et de la production à court terme. Si la transition budgétaire était uniquement supportée par une baisse des dépenses publiques, la perte de croissance à courte terme serait moindre mais les gains à long terme également. En généralisant ce type de réformes à des outils de consolidation plus variés (réduction des dépenses publiques, réduction des cotisations sociales, augmentation de la TVA), cette étude fait également apparaître une réduction substantielle de l'endettement à moyen terme, bien que la dette suive une trajectoire explosive à long terme engendrée par l'augmentation des dépenses sociales liées aux retraites en particulier.

Ce type d'études montre qu'un plan de réforme fiscal permet d'atteindre une politique budgétaire plus efficace : en passant d'une fiscalité directe à une fiscalité indirecte, le modèle GFM met en évidence une augmentation de la demande de travail et des incitations à épargner et investir. De plus, même si la soutenabilité de la dette n'est pas pour autant assurée à long terme, la trajectoire d'endettement est nettement améliorée grâce à cette réforme. Ces résultats laissent présager qu'il serait possible, via une réforme fiscale appropriée, de répondre à la fois aux objectifs d'efficacité du système fiscal mais aussi à la nécessité de réduire l'endettement des Etats. En élargissant ce raisonnement, nous pouvons alors envisager une réforme qui puisse également répondre aux objectifs climatiques évoqués en introduction : nous nous intéresserons pour cela à un type de réforme fiscale spécifique qui comprenne un instrument d'incitation à la réduction des GES. Dans la section suivante,

nous attacherons donc à identifier les grands résultats existants sur la réussite ou non des réformes fiscales environnementales et dans quelles conditions, une telle mesure politique pourrait générer un double-dividende.

Enfin, les résultats normatifs indiqués précédemment soulignent la nécessité d'aborder la problématique de la fiscalité environnementale sous un angle intergénérationnel. L'existence horizon de planification fini chez les ménages génère des distorsions dans leurs comportements qui vont affecter le bien-être des générations futures : en ne valorisant que son bien-être, chaque agent participe à une dégradation additionnelle de l'environnement. Ainsi, Fodha dans" l'Environnement : une nouvelle dimension de l'analyse économique" (2006)[67] montre comment en présence d'externalités intergénérationnelles l'équilibre concurrentiel n'est pas optimal si les générations actuelles ne tiennent pas compte du bien-être des générations futures. Si la prise en compte d'altruisme intergénérationnel ne suffit pas à corriger cet écart à l'optimum, la dette pourrait dans ce cadre représenter un moyen de décentraliser l'optimum, en permettant de réajuster l'épargne productive à son niveau optimal, via un effet d'éviction (voir Crettez, Michel et Wigniolles (1999)[8]). L'étude de thématiques telles que la fiscalité environnementale et l'endettement de l'Etat devraient donc dans la mesure du possible être évalués sous un angle intergénérationnel (Le Cacheux et touzé (2002)[**?**, cacheux].

1.3 Réforme fiscale environnementale et double-dividende

1.3.1 L'instauration d'une taxe carbone : une fiscalité coûteuse en croissance

Les années 80 ont vu émerger les premiers exercices de quantification des coûts de politiques climatiques, aboutissant à des valeurs élevées en termes de pertes de PIB. En effet, l'instauration (ou l'accentuation) d'une taxe carbone se matérialise par une hausse du prix final de l'énergie, ce qui se transmet à l'économie via deux principaux canaux : la baisse de la demande et la hausse des coûts de production.

La mise en place de la taxe carbone impactera à la hausse le prix à la consommation, au travers de l'augmentation du prix de l'énergie consommée par les ménages. Cet effet sera renforcé si la hausse des coûts de production se transmet aux prix finaux des biens produits dans l'économie domestique. La perte de pouvoir d'achat se traduit par une baisse de la demande (effet revenu) et peut également induire une baisse de l'offre de travail (si l'élasticité de l'offre de travail au salaire net réel est suffisamment élevée), ce qui impacte l'activité productive de l'économie. En revanche, lorsque les recettes générées par la taxe sont redistribuées forfaitairement aux ménages (hypothèse de recyclage standard), cet effet s'atténue.

D'un autre côté, l'énergie intervient en tant que facteur de production. Une hausse des coûts de production intermédiaire peut se transmettre aux coûts de production finaux, ce qui se traduira soit par une hausse du prix des biens soit par une contraction de la production. C'est en général la contraction de la production qui est reflétée par les modèles. En revanche, alors que la perte de compétitivité des entreprises pénalise les exportations, la balance commerciale ne s'en trouve pas forcément pour autant très affectée puisque les importations sont supposées diminuer elles-aussi. En effet, la hausse durable de la taxation sur l'énergie incite les agents à effectuer des substitutions entre énergies ce qui diminue les importations. L'impact de la politique climatique sur le commerce extérieur du pays est donc *a priori* ambigu.

Les canaux de transmission de la taxe à l'économie, via le secteur productif et le pouvoir d'achat des ménages sont en réalité bien reflétés par les évaluations quantifiées de mise en place d'un prix du carbone, quel que soit l'outil de modélisation utilisé : ces études concluent qu'instaurer une taxe carbone se traduit par des pertes de PIB non seulement à court terme mais aussi à long terme. L'amplitude du choc négatif dépendra par la suite d'hypothèses plus précises, comme les élasticités de substitution entre énergies ou la sensibilité de l'offre de travail au salaire réel.

Quelle que soit la catégorie de modèles utilisée[14] et les hypothèses de spécification et calibration sous-jacentes, les études réalisées dans les années 90 ont permis aux économistes de conclure sans équivoque : l'instauration d'une taxe carbone, dont les recettes sont redistribuées forfaitairement aux ménages, est coûteuse en PIB pour les économies. Ainsi, une étude réalisée par l'Energy Modelling Forum (EMF-16) concluait que la mise en œuvre et la conformité au protocole de Kyoto induirait une perte de PIB évaluée entre 0.5 et 2 % par rapport au compte central dans les pays de l'OCDE.

L'impact d'une taxe carbone sur le PIB est unanimement reconnu comme étant négatif, cependant la variété de chiffres que l'on trouve concernant l'amplitude de cet impact provient en grande partie des choix de modélisation réalisés par les auteurs. Repetto et Austin (1997, [63]) ont montré grâce à une méta-analyse réalisée sur les projections des coûts d'une politique climatique que ces variations d'amplitude sont expliquées évidemment par la différence des objectifs de réduction des émissions considérées mais également par :

- la famille de modèles : les études conduites à l'aide de modèles EGC semblent mener à des coûts inférieurs à ceux évalués par les modèles macro-économétriques ;
- la prise en compte de dommages climatiques ou non (qui viennent compenser les coûts de politiques climatiques préventives) ;
- l'existence d'accord internationaux sur la politique climatique (perte de compétitivité internationale moins importante) ;
- la disponibilité d'une technologie backstop à coût constant ;
- le degré de substitution entre biens ;
- la désagrégation des énergies fossiles et l'étendue de la substitution entre ces différents types d'énergie.

La répartition de ces couts : équité et efficacité

L'impopularité de la taxe carbone (en particulier en France) ne tient pas uniquement aux coûts économiques qu'elle impliquerait mais essentiellement à la façon dont se répartirait ces coûts, dans une perspective d'équité (qui reste un objectif explicite de tout instrument fiscal). De nombreuses études ont mis l'accent sur les disparités avec lesquelles cette taxe impacterait différentes catégories d'agents, et les compensations qui seraient nécessaires pour restaurer une certaine justice sociale.

La perte de compétitivité internationale. La mise en place unilatérale d'une politique climatique aurait pour principal effet de réduire la compétitivité des entreprises, via une hausse des coûts de production. Si la hausse du prix de l'énergie se répercute sur le prix final du bien, les termes de l'échange du pays se dégraderait et découragerait les exportations. Mais dans tous les cas, les entreprises nationales seraient incitées à délocaliser la production dans des pays avec des politiques climatiques moins contraignantes. A défaut

14. Pour un aperçu des différentes catégories de modèles et leurs caractéristiques, voir annexe.

d'une politique climatique mise en place à un niveau supranational, une alternative évoquée pour pallier cette disparité de compétitivité résiderait dans l'instauration d'une taxe "carbone" aux frontières de façon à rééquilibrer prix à la production et à l'importation.

Les disparités sectorielles. L'impact brut d'une taxe carbone sur un secteur productif dépendra de l'intensité-carbone du produit et de son exposition à la concurrence internationale. En particulier, la hausse du prix de l'énergie aura un impact relativement plus fort sur les secteurs les plus intensifs en énergie : agriculture, chimie, produits minéraux, métaux, bâtiment, transport et électricité. Cette disparité en termes d'impacts sectoriels a été illustrée pour le cas du Royaume-Uni par Pezzey (1991, [59]). Les études réalisées à l'aide du modèle GEMINI-E3 dans la cadre de la commission Quinet (2009, [60]) prévoyaient eux aussi un impact différencié d'une taxe carbone avec, pour grands perdants, les secteurs très intensifs en énergie et exposés à la concurrence internationale.

La regressivité de la taxe. La part des dépenses en énergie dans le revenu est plus importante chez les catégories de ménages les plus pauvres. Cette partie de la population sera donc relativement plus affectée par une taxe carbone assise sur les comportements de consommation d'énergie que les ménages les plus aisés. L'un des principaux obstacles à l'instauration d'une taxe carbone en France (Contribution Climat Energie) reposait en particulier sur cet aspect régressif de la taxe : cet instrument fiscal aggraverait les inégalités de richesse dans la population au lieu de les atténuer (principe de justice sociale visé par la fiscalité). A titre d'exemple, Symons *et. al.* (1994, [69]) estiment qu'une taxe carbone calibrée de façon à réduire les émissions de 20% au Royaume-Uni ferait augmenter le coefficient de Gini (une mesure de l'inégalité de richesse dans la population) de 0.386 à 0.397. Une partie de la littérature s'est attachée à répondre à ce caractère redistributif de la taxe en définissant un profil de taxe carbone et le mode de recyclage associé de façon à rendre la politique climatique moins régressive voire progressive. Nous pouvons citer en particulier Hourcade et Chiroleu-Assouline et Fodha (2011, [28]) qui se consacrent au cas français.

L'équité intergénérationnelle. Comme nous l'avons vu, le principe de justice sociale peut se comprendre comme la réduction des inégalités entre des individus d'une même génération, mais la politique climatique soulève un autre type d'inégalité : l'inégalité intergénérationnelle. D'un côté, si la qualité environnementale est considérée comme une ressource naturelle bénéficiant aux ménages et éventuellement comme facteur de production, l'implémentation de modèles de croissance optimale à la Ramsey (Ayong Le Kama (2001, [7]) par exemple) préconisent de suivre des trajectoires particulières de consommation et production afin d'éviter l'épuisement de ces ressources, en dehors desquels le bien-être des générations futures serait en partie sacrifié au profit du présent. D'un autre côté, l'un des principaux freins à la mise en place de telles politiques réside dans la question suivante : "pourquoi les générations actuelles devraient-elles supporter le coût de la politique climatique alors que seules les générations futures bénéficieront de l'amélioration de la qualité environnementale ?".Puisque ce sont les générations actuelles qui votent pour les décideurs politiques, il paraît crucial d'accorder toute son importance à la répartition intertemporelle des coûts et bénéfices d'une réforme fiscale environnementale. L'utilisation de modèles à générations imbriquées a permis de traiter explicitement la problématique des inégalités intergénérationnelle et de montrer que, selon les conditions structurelles initiales (Chiroleu-Assouline et Fodha (2006, [27])) les générations mettant en place la politique climatique pouvaient être sacrifiées au profit des générations futures (Marini et Scaramoz-

zino (1995, [50]), Bovenberg et Heijdra (1998, [16])). Une solution à cette disparité des coûts pourrait résider dans l'utilisation de dette publique (reportant le poids fiscal sur les générations futures) en tant qu'instrument de lissage de ces inégalités (Heijdra *et. al.* (2006, [39])).

Revenir sur l'hypothèse d'une redistribution des recettes sous forme de transferts forfaitaires : une réduction possible de ces coûts ?

En effet, comme l'a évoqué Terkla (1984, [70]), par rapport aux autres instruments d'externalisation (subventions, normes ou permis d'émissions), la taxe environnementale a pour avantage de générer des recettes qui peuvent être réinjectées dans l'économie afin de réduire les coûts totaux de la politique climatique. Tenir compte de cette particularité de la taxe environnementale a permis d'aboutir des coûts certes plus faibles mais toujours élevés, puisque par défaut l'hypothèse de recyclage retenue consistait à redistribuer les recettes fiscales aux ménages sous forme de transfert forfaitaire.

L'idée consistant à chercher un recyclage plus efficace a été introduite tout d'abord par Pearce (1991, [58]). Selon lui, il serait possible de combiner deux objectifs :

- décourager les actions polluantes.
- réduire les pertes sèches dues à l'existence de distorsions fiscales [15].

Dans un contexte (tout du moins européen) où les charges pesant sur le travail sont très élevées, les économistes se sont dès lors concentrés sur l'analyse de réformes fiscales environnementales bien particulières : lever une taxe sur l'énergie et réinjecter les recettes générées de façon à réduire en parallèle les cotisations salariales ou l'impôt sur le revenu.

1.3.2 Le double-dividende : concilier fiscalité environnementale et efficacité économique

Imprécision sur la nature et la mesure du dividende économique

L'hypothèse d'un double dividende (dividende écologique et économique) a été le sujet d'une controverse académique et politique intense au cours de ces dernières années. Il a régné pendant quelques années un certain flou quant à la nature exacte du second dividende, alimentant de façon sous-jacente le débat sur l'existence ou non du double dividende. Ainsi, les études théoriques et empiriques se sont concentrées alternativement sur un :

dividende en emploi ; lorsque le recyclage permet de réduire le taux de chômage. C'est le résultat le plus souvent recherché dans les études se fondant sur des modèles macroéconométriques. Selon la méta-analyse de Bosquet (2000, [14]) [16], 73% des simulations prédisent un dividende en emploi. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque ce sont les cotisations patronales s'appliquant aux travailleurs non-qualifiés qui sont réduites.

dividende en efficacité ; lorsque le recyclage réduit les distorsions fiscales totales et améliore donc le bien-être. C'est le résultat le plus souvent recherché dans les études se fondant sur des modèles d'équilibre général. Dans ce cas, les études numériques

15. cf. encadré en annexe

16. Bosquet a synthétisé les principaux résultats de la littérature empirique sur le double dividende, en analysant 139 simulations tirées de 56 études parues avant le printemps 2000. Les simulations considérées découlent de techniques de modélisation très variées, tant en termes de types de modèles (équilibre partiel, équilibre général calculable, macroéconométrique, entrée-sortie,etc.) qu'au niveau des hypothèses sous-jacentes (périmètre et durée d'implémentation de la taxe environnementale, mécanismes d'ajustement des prix, choix de recyclage des recettes environnementales via une réduction des cotisations sociales ou de l'impôt sur le revenu, etc.). Les résultats évoqués ci-après doivent donc être interprétés avec précaution.

utilisent le PIB ou la croissance comme mesure de ce dividende. Selon Bosquet (2000, [14]), 51% de la totalité des simulations prédisent une perte de PIB liée à la réforme fiscale. Cependant, dans le cas d'un recyclage via une réduction des cotisations sociales, 65% des études concluent à une amélioration du PIB à court terme. Les effets de long terme sont plus ambigus.

dividende en équité ; c'est le sujet d'un vaste débat politique actuel, et probablement l'obstacle le plus important quant à l'acceptabilité sociale et politique d'une taxe carbone (cf. cas de la France). Les études tendent à conclure que la mise en place d'une taxe environnementale serait régressive, c'est-à-dire que cet instrument aggraverait les inégalités de richesse de la population. En effet, si la consommation d'énergie est en valeur absolue plus élevée chez les ménages les plus riches, c'est chez les ménages les plus pauvres que la part des dépenses en énergie dans le revenu est la plus élevée. Instaurer une taxe environnementale aurait donc pour effet de pénaliser relativement plus les ménages pauvres que les ménages aisés. Trouver une modalité de recyclage qui annulerait le caractère régressif de la taxe représente un défi d'actualité qui intéresse de nombreux économistes. Chiroleu-Assouline et Fodha (2011, [28]) proposent par exemple de recycler les recettes de la fiscalité carbone par une baisse non linéaire de l'impôt sur le revenu, qui combine une réduction du taux d'imposition de la première tranche de l'impôt sur le revenu (ce qui bénéficie à tous les agents) et une hausse du taux des tranches supérieures (dont le coût sera supporté par les hauts revenus).

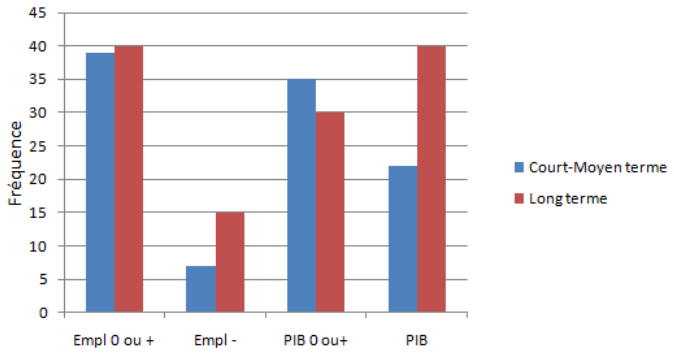

FIGURE 1.1 – Différentes estimations empiriques des impacts d'une réforme fiscale environnementale synthétisées par Bosquet (2000, [14]). Impact positif ("0 ou +") ou négatif ("-") sur l'empoi et le PIB à l'horizon court-moyen terme (moins de 10 ans) ou long-terme (10 ans ou plus)

Goulder (1995, [38]) a finalement clarifié le concept de double dividende en retenant le dividende d'efficacité comme définition du second dividende (dividende bleu) : c'est l'évaluation des variations du bien-être social en termes monétaires qui doit être privilégiée. D'un point de vue théorique, la perte de bien-être des ménages est mesurée par la variation de revenu compensatoire, à savoir le revenu supplémentaire qu'il faudrait verser aux consommateurs pour qu'ils retrouvent leur niveau d'utilité initial. Si cette variation de revenu compensatoire est de signe négatif, alors le second dividende existe. Pour des raisons pratiques (difficulté de mesurer le bien-être des ménages), la plupart des auteurs continuent d'utiliser la mesure du PIB ou de la croissance comme proxy de ce dividende, une approche que condamne Goulder [17]. De plus, Goulder réalise une distinction importante entre :

17. Il peut y avoir incompatibilité entre croissance économique et amélioration du bien-être au sens de Pareto. En effet, au-delà d'un certain niveau, la croissance peut se réaliser au détriment de la richesse des

- une forme faible du double dividende : lorsque les coûts d'une réforme fiscale environnementale à revenus inchangés sont relativement moins élevés dans le cas d'un recyclage via réduction d'autres taxes distorsives que dans le cas d'une redistribution forfaitaire des recettes.
- une forme forte : lorsque la réforme fiscale environnementale améliore non seulement la qualité environnementale mais également le bien-être économique.

1.3.3 Probabilité d'occurrence du double dividende

De la littérature prolifique qui concerne la problématique des réformes fiscales environnementales, il semble impossible de tirer une conclusion absolue sur l'existence ou non d'un double-dividende. Les économistes ont plutôt recensé un vaste nombre d'hypothèses censées influer sur la probabilité d'obtention du double-dividende, ces hypothèses allant de l'existence de salaires rigides, à la séparabilité de la consommation privée et des aménités environnementales dans l'utilité des ménages, en passant par la prise en compte de la qualité de l'environnement comme facteur de productivité.

L'existence d'un double dividende est fondamentalement liée aux rapports de force opposant deux principaux effets (Parry (1995, [57])) : l'effet de recyclage du revenu (qui permet de réduire les distorsions du système fiscal global) et l'effet d'interaction des taxes (qui peut au contraire exacerber ces distorsions). En effet, dans une économie présentant de multiples distorsions, il faut choisir avec soin laquelle distorsion. Dans certains cas, il est préférable de redistribuer les recettes de manière forfaitaire (neutre) plutôt que d'aggraver les écarts de prix relatifs entre facteurs ou biens.

De façon assez surprenante, l'ensemble des économistes se sont concentrés sur l'existence ou non de la forme forte du double dividende, reconnaissant implicitement la véracité d'un double dividende faible. Cependant, pour Babiker *et. al.* (2003, [9]), il s'agit d'un raccourci trompeur : en s'appuyant sur une maquette très stylisée d'une économie à deux biens, ils infirment l'hypothèse d'un double-dividende faible. Ils confrontent ensuite cette hypothèse aux données empiriques à l'aide du modèle du EPPA du MIT : en France un double-dividende faible se dégagerait si le recyclage choisi consistait à réduire les charges sur le travail, mais pas dans le cas d'une réduction de l'impôt sur le revenu.

Les premières études théoriques [18] dans un cadre d'équilibre général ont réfuté l'existence d'un double-dividende fort. Selon ces études, c'est l'effet d'interaction des taxes qui prendrait le dessus. Ce courant de pensée fonde ses arguments dans l'étude de Bovenberg et De Mooij (1994, [18]). Leur étude s'appuie sur un modèle statique d'une petite économie ouverte présentant deux distorsions : une distorsion environnementale liée à la consommation d'un facteur polluant (l'énergie) et une distorsion sur le marché du travail en raison d'une taxe sur le salaire. Les effets d'une réforme fiscale en termes de bien-être sont mesurés par la charge excédentaire générée par la modification de la fiscalité.

Le renforcement d'une taxe environnementale préexistante réduirait à la fois l'emploi et la production, selon la valeur de l'élasticité de l'offre de travail. En effet, une taxe carbone a pour effet de réduire le salaire réel net des ménages, en augmentant le prix des biens de consommation énergétiques. L'offre de travail des ménages diminue alors. Ainsi, l'érosion de l'assiette fiscale environnementale implique que pour une réforme à revenus inchangés,

individus (lorsque les coûts de production augmentent plus vite que les bénéfices).

18. Bovenberg et De Mooij (1994a, [18], 1994b, [53], 1997b, [44]), Bovenberg et Van der Ploeg (1994a, [18], 1994b, [20], 1996, [19]), Parry (1995, [57]), Goulder (1995, [38]) et Bovenberg et Goulder (1996, [19]).

la diminution des charges sur le travail n'est pas suffisante pour compenser exactement l'effet généré par la taxe carbone. Les auteurs concluent que dans ce cadre il ne peut y avoir de double dividende.

Dans son article fondateur, Goulder (1995, [38]) revient sur les résultats de Bovenberg et De Mooij et sur les raisons de l'inexistence d'un double dividende dans ce type de modèles. Il identifie alors deux conditions permettant d'augmenter la probabilité d'occurrence du double-dividende :

- un système fiscal initial fortement distordant.
- un impôt environnemental qui doit peser sur un bien ou input initialement peu touché par les distorsions, de sorte que la distorsion additionnelle soit la moins forte possible.

Ainsi, pour obtenir un double dividende, il faut partir d'un état initial sous-optimal c'est-à-dire avec d'importantes distorsions fiscales, comme c'est majoritairement le cas dans les économies développées. Pour dégager le dividende économique le plus important possible, le recyclage des recettes devra s'effectuer via une réduction d'un impôt très distordant : aux Etats-Unis il s'agit des charges sur le capital alors qu'en Europe et plus particulièrement en France il s'agira des charges sur le travail.

Les conditions évoquées ci-dessus recouvre en réalité un effet important lié à la taxation environnementale, dénommé l'effet d'interaction des taxes, et sous-jacent aux résultats de Bovenberg et de Mooij (1994, [18]). En effet, l'impact total d'une réforme fiscale environnementale sur le bien-être peut se décomposer en un effet revenu et un effet d'interaction des taxes. L'effet revenu recouvre le gain d'utilité associé à la réduction des charges sur le travail comparé à une redistribution forfaitaire aux ménages. L'effet d'interaction des taxes mesure la perte d'efficacité liée à l'exacerbation de distorsions pré-existantes liée à une augmentation de la taxe environnementale. Dans le cas d'une économie avec une externalité et pas de distorsion initiale, le niveau de taxation optimale doit s'établir au niveau pigouvien (dommage marginal de l'externalité générée). En revanche, en présence de distorsions initiales, générées en particulier par l'existence de taxes proportionnelles pré-existantes, le niveau optimal de la taxe environnementale s'écarte à la baisse du niveau pigouvien en raison des effets croisés qu'elle génère sur l'activité et en particulier sur les autres assiettes fiscales. Il est donc tout à fait possible qu'une réforme fiscale environnementale (hausse de la taxe carbone compensée par une baisse des charges sur le travail) aggrave les pertes sèches associées au système fiscal global plutôt que de les alléger. Dans le cas de Bovenberg et Goulder évoqué précédemment, l'étroitesse de la taxe carbone suggère que le niveau de taxe doit être suffisamment élevé pour permettre une diminution significative des charges sur le travail. La distorsion importante générée par la taxe carbone touche alors le marché des biens intermédiaires, puis des biens finaux affectant alors les marchés du travail et du capital. Cet effet d'interaction prend donc le pas sur l'effet revenu et l'hypothèse d'un double-dividende est alors rejetée.

Ligthart (1998, [45]) synthétise quelques résultats postérieurs à ceux de Bovenberg et De Mooij (1994 [18]) : puisque la hausse d'une taxation environnementale pèse in fine sur le travail, il est nécessaire de transférer la charge fiscale vers d'autres facteurs de production ou d'autres catégories de ménages pour obtenir un double-dividende au sens fort. Il distingue ainsi trois cibles finales du poids fiscal :

- un facteur de production fixe, à savoir un facteur qui n'est pas susceptible d'évasion fiscale. Dans ce cas, illustré par Ligthart et Van der Ploeg (1996, [46]), il faut également que le travail soit un meilleur substitut aux ressources naturelles que ce facteur fixe. En revanche, dans un cadre classique à deux facteurs de production que sont le

travail et le capital, si celui-ci est internationalement mobile (ce qui est le cas à long terme), le double-dividende disparait (Bovenberg et van der Ploeg (1996, [19])).
- les ménages dont les revenus ne proviennent pas du travail ((Bovenberg et Van der Ploeg (1996, [19])), Koskela and Schöb (1990, [42])). En particulier, dans un cadre de chômage involontaire (frictions sur le marché du travail), la mise en place d'une réforme fiscale peut générer un double-dividende. La hausse de la taxe carbone (ou proxy) se transmet au prix à la consommation qui touche les deux catégories d'agents (travailleurs et chômeurs), en revanche seuls les travailleurs voient leur perte de pouvoir d'achat compensée par la baisse des charges sur le travail. ((Bovenberg (1997, [17])), Koskela and Schöb (1990, [42])).
- les pays étrangers qui ne peuvent pas influencer les termes d'échange[19], si le pays domestique est lui-même assez important (monopsone).

D'autres extensions du modèle de référence de Bovenberg et Goulder (1996, [19]) ont également été explorées, en se concentrant essentiellement sur le traitement de la qualité environnementale et son interaction avec le reste de l'économie. Alors que bien de consommation, permet également de dégager un double-dividende fort.

Les résultats théoriques obtenus sur l'occurrence ou non du double dividende ne sont globalement pas concluants : alors que dans les années 90 le consensus rejetait l'hypothèse du double dividende, cette position a depuis été revue par certains économistes pour lesquels sous certaines conditions spécifiques l'hypothèse serait vérifiée. Du côté des études numériques, il est également difficile de trouver un accord sur le sujet, comme le résument Hourcade et Shukla (2001, [51]). Dans le cas des pays européens, les résultats diffèrent au sein d'études pourtant réalisées à partir des mêmes types de modèles, à savoir des modèles d'Equilibre Général Calculable. Typiquement, Carraro et Soubeyran (1996, [22]) positionnent leurs résultats en faveur d'un double dividende fort en Europe, alors que Bernard et Vielle (1999, [13]) rejettent cette hypothèse.

1.3.4 Les conditions d'occurrence du double-dividende fort

Sans pouvoir conclure de manière absolue sur l'occurence ou non d'un double-dividende fort, nous pouvons toutefois isoler les principaux points d'achoppement dont il faudra tenir compte dans l'étude d'une réforme fiscale environnementale.

L'élasticité de l'assiette des émissions à la taxe. Si la réforme fiscale est pensée à revenus inchangés, l'occurrence du double dividende dépend de la sensibilité des activités polluantes à la taxe ; la base peut s'éroder très fortement et très vite. La probabilité d'un dividende économique est alors d'autant plus faible que la probabilité d'un dividende écologique est forte. L'importance de cet effet est soulignée dans l'étude de Bovenberg et de Mooij, puisque la variation de l'assiette des activités polluantes empêche une diminution substantielle des charges sur le travail et donc l'amélioration de l'emploi. Ainsi, Combet (2009) met l'accent sur le choix des élasticités intégrées aux exercices de modélisation (en particulier dans les modèles d'équilibre général calculable).

Le plein emploi ou non. Comme il a été mentionné précédemment, la probabilité d'obtention d'un double dividende dépend de la possibilité de reporter la charge fiscale vers d'autres facteurs que le travail, dans le but de s'orienter vers une économie plus

19. Goulder (1995, [38])

intensive en travail et moins intensive en énergie (ou facteur polluant). Typiquement, dans une économie de plein emploi, selon Goulder il est peu probable de générer l'apparition d'un double-dividende. L'hypothèse de chômage involontaire tient donc un rôle crucial dans l'étude de réformes fiscales environnementales. Par exemple, dans le modèle de Bovenberg et van der Ploeg, ce chômage involontaire tient à l'existence d'un salaire rigide et trop élevé et la réforme fiscale fait apparaître un double dividende en permettant le report de la charge fiscale vers le capital. D'autres articles comme celui de Schneider (1997, [66]) lient directement l'existence d'un double dividende au chômage involontaire, sous hypothèse d'endogénéité du salaire.

L'élasticité de l'offre du travail. Comme le soulignent Babiker *et. al.*, en augmentant l'élasticité de l'offre de travail, les distorsions fiscales initiales sont augmentées et la probabilité du double-dividende est donc mécaniquement augmentée (cf. conditions de Goulder). Il leur faut accroître la valeur de ce paramètre d'élasticité jusqu'à 1 pour voir apparaître un possible double-dividende fort en Europe. Malheureusement, cette valeur est très éloignée des valeurs communément retenues et mesurées pour cette élasticité.

La situation initiale de la politique budgétaire. La première contrainte énoncée dans le point ci-dessus (élasticité de l'assiette de émissions à la taxe) a été levée par Fernandez *et. al.* (2011, [35]). Alors qu'il a déjà été montré dans la littérature qu'un double dividende peut apparaître sous certaines conditions, les auteurs prouvent l'existence du double dividende même lorsque ces conditions ne sont pas vérifiées. Ce résultat tient au fait que le gouvernement peut utiliser la dette publique comme instrument additionnel de financement de la réforme. En effet, l'émission de dette permet une réduction plus importante de l'impôt sur le revenu (si cet impôt est choisi comme mode de recyclage) par rapport à une réforme à recettes fiscales inchangées, et générer un stimulus plus fort pour la croissance future. Il est implicitement admis dans cet article que l'assiette des émissions est ou sera insuffisante pour permettre une réduction substantielle des impôts distorsifs. Il faut donc que l'Etat finance par la dette ce manque à gagner initial en misant sur le gain de croissance généré par la réforme pour stabiliser voire rembourser la dette.

Alors que les relations entre finances publiques et fiscalité ont été largement étudiées dans la littérature purement macroéconomique, il est intriguant de remarquer que, dans la vaste littérature traitant des réformes fiscale environnementales, la question de la dette publique est souvent complètement omise. En effet, la réforme fiscale est systématiquement pensée à revenus inchangés, et la dette souveraine, lorsqu'elle est prise en compte, sert d'instrument de financement ponctuel.

1.4 Conclusion : réconcilier politique climatique et politique budgétaire

Dans un contexte économique où les Etats occidentaux ont vu leurs taux d'endettement et leurs déficits atteindre des niveaux record, le redressement des finances publiques devrait passer par une réduction des dépenses gouvernementales mais aussi par la recherche de recettes fiscales. Alors que les taux de prélèvements obligatoires sont déjà élevés dans certains pays européens, et en particulier en France, la nécessaire remise à plat du système fiscal pourrait passer par une réforme comprenant un mécanisme d'incitation à la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre, de façon à concilier les impératifs budgétaires et les objectifs de politique climatique.

Ainsi, Carbone *et. al.* (2012)[21], évoquent la possibilité d'intégrer une taxe carbone comme instrument d'un ensemble de mesures visant à réduire le déficit public aux Etats-Unis. La littérature sur les conditions de réussite d'une réforme fiscale environnementale, qui pourrait induire des comportements plus sobres en émissions sans pour autant compromettre l'efficacité économique, doit alors être revue dans un contexte de tension sur l'endettement des Etats. Il serait typiquement impensable d'appliquer les recommandations de Fernandez *et. al.*, c'est-à-dire d'émettre de la dette souveraine, alors que les niveaux de celle-ci deviennent peu à peu insoutenables.

Les conditions d'obtention d'un double-dividende, clairement identifiées dans ce chapitre, nous permettent à présent de répondre à la problématique de la réussite ou non d'une réforme fiscale environnementale dans un exercice de simulation dynamique qui nous permettra de déterminer les impacts de différents types de réformes sur l'efficacité économique (PIB), les recettes publiques, la distribution intergénérationnelle et sectorielle des coûts.

Bibliographie

[1] S.R. Aiyagari, A. Marcet, T.J. Sargent, and J. Seppälä. Optimal taxation without state-contingent debt. *Journal of Political Economy*, 110(6) :1220–1254, 2002.

[2] M.G. Allingham and A. Sandmo. Income tax evasion : A. 1972.

[3] M. Amador and M. Aguiar. Fiscal policy in debt constrained economies. In *2011 Meeting Papers*, number 527. Society for Economic Dynamics, 2011.

[4] A.B. Atkinson. Optimal taxation and the direct versus indirect tax controversy. *Canadian Journal of Economics*, pages 590–606, 1977.

[5] A.B. Atkinson and J.E. Stiglitz. The design of tax structure : direct versus indirect taxation. *Journal of public economics*, 6(1-2) :55–75, 1976.

[6] A.J. Auerbach and L.J. Kotlikoff. *Dynamic fiscal policy*. Cambridge University Press Cambridge, 1987.

[7] A.D. Ayong Le Kama. Sustainable growth, renewable resources and pollution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(12) :1911–1918, 2001.

[8] Michel P. et B. Wigniolle B. Crettez. *Monnaie, Dette et Capital*. Economica, 1999.

[9] M.H. Babiker, G.E. Metcalf, and J. Reilly. Tax distortions and global climate policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(2) :269–287, 2003.

[10] E. Baldacci and M. Kumar. Fiscal deficits, public debt, and sovereign bond yields. *IMF Working Papers*, pages 1–28, 2010.

[11] R.J. Barro. On the determination of the public debt. *The Journal of Political Economy*, pages 940–971, 1979.

[12] R.J. Barro. Inflation and economic growth. Technical report, National Bureau of Economic Research, 1995.

[13] A.L. Bernard and M. Vielle. Measuring the welfare cost of climate change policies : A comparative assessment based on the computable general equilibrium model gemini-e3. *Environmental Modeling and Assessment*, 8(3) :199–217, 2003.

[14] B. Bosquet. Environmental tax reform : does it work ? a survey of the empirical evidence. *Ecological Economics*, 34(1) :19–32, 2000.

[15] D.P.J. Botman and S. Danninger. *Tax Reform and Debt Sustainability in Germany : An Assessment Using the Global Fiscal Model*, volume 7. International Monetary Fund, 2007.

[16] A. Bovenberg and B.J. Heijdra. Environmental tax policy and intergenerational distribution. *Journal of Public Economics*, 67(1) :1–24, 1998.

[17] A.L. Bovenberg. Environmental policy, distortionary labor taxation and employment : Pollution taxes and the double dividend. *New directions in the economic theory of the environment*, 1997.

[18] A.L. Bovenberg and R.A. de Mooij. Environmental levies and distortionary taxation. *The American Economic Review*, 84(4) :1085–1089, 1994.

[19] A.L. Bovenberg and L.H. Goulder. Optimal environmental taxation in the presence of other taxes : general-equilibrium analyses. *The American Economic Review*, 86(4) :985–1000, 1996.

[20] A.L. Bovenberg and F. Van der Ploeg. Environmental policy, public goods and the marginal cost of public fund. *The Economic Journal*, pages 444–454, 1994.

[21] J. Carbone, R.D. Morgenstern, and R.C. Williams. Carbon taxes and deficit reduction. In *AERE Summer Conference*. Association of Environmental Resource Economists, 2012.

[22] C. Carraro, M. Galeotti, and M. Gallo. Environmental taxation and unemployment : some evidence on the "double dividend hypothesis" in europe. *Journal of Public Economics*, 62(1) :141–181, 1996.

[23] S. Cecchetti, M. Mohanty, and F. Zampolli. The real effects of debt. 2011.

[24] C. Chamley. Efficient tax reform in a dynamic model of general equilibrium. *The Quarterly Journal of Economics*, 100(2) :335–356, 1985.

[25] C. Chamley. Optimal taxation of capital income in general equilibrium with infinite lives. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 607–622, 1986.

[26] C. Checherita-Westphal and P. Rother. The impact of high and growing government debt on economic growth : an empirical investigation for the euro area. 2010.

[27] M. Chiroleu-Assouline and M. Fodha. Double dividend hypothesis, golden rule and welfare distribution. *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(3) :323–335, 2006.

[28] M. Chiroleu-Assouline and M. Fodha. Verdissement de la fiscalité. *Revue de l'OFCE*, (1) :409–431, 2011.

[29] J.H. Cochrane. Understanding policy in the great recession : Some unpleasant fiscal arithmetic. *European Economic Review*, 55(1) :2–30, 2011.

[30] A. d'Autume. L'imposition optimale du revenu : une application au cas français. *Revue française d'économie*, 15(3) :3–63, 2001.

[31] P.A. Diamond. National debt in a neoclassical growth model. *The American Economic Review*, 55(5) :1126–1150, 1965.

[32] P.A. Diamond. Optimal income taxation : an example with a u-shaped pattern of optimal marginal tax rates. *American Economic Review*, pages 83–95, 1998.

[33] P.A. Diamond and J.A. Mirrlees. Optimal taxation and public production ii : Tax rules. *The American Economic Review*, pages 261–278, 1971.

[34] D.W. Elmendorf and N. Gregory Mankiw. Government debt. *Handbook of macroeconomics*, 1 :1615–1669, 1999.

[35] E. Fernández, R. Pérez, and J. Ruiz. Optimal green tax reforms yielding double dividend. *Energy Policy*, 39(7) :4253–4263, 2011.

[36] S. Gauthier. Un exercice de tva sociale. *Economie & prévision*, (1) :65–81, 2009.

[37] C. Giannitsarou and A. Scott. Inflation implications of rising government debt. In *NBER International Seminar on Macroeconomics 2006*, pages 393–442. University of Chicago Press, 2008.

[38] L.H. Goulder. Environmental taxation and the double dividend : a reader's guide. *International Tax and Public Finance*, 2(2) :157–183, 1995.

[39] B.J. Heijdra, J.P. Kooiman, and J.E. Ligthart. Environmental quality, the macroeconomy, and intergenerational distribution. *Resource and energy economics*, 28(1) :74–104, 2006.

[40] K.L. Judd. Redistributive taxation in a simple perfect foresight model. *Journal of public Economics*, 28(1) :59–83, 1985.

[41] K.L. Judd. The welfare cost of factor taxation in a perfect-foresight model. *The Journal of Political Economy*, 95(4) :675–709, 1987.

[42] E. Koskela and R. Schöb. Alleviating unemployment : : The case for green tax reforms. *European Economic Review*, 43(9) :1723–1746, 1999.

[43] M. Kumar and J. Woo. Public debt and growth. *IMF Working Papers*, pages 1–47, 2010.

[44] A. Lans Bovenberg and R.A. De Mooij. Environmental tax reform and endogenous growth. *Journal of Public Economics*, 63(2) :207–237, 1997.

[45] J.E. Ligthart. *The Macroeconomic Effects of Environmental Taxes-A Closer Look at the Feasibility of" Win-Win" Outcomes (EPub)*. International Monetary Fund, 1998.

[46] JE Ligthart and F. Ploeg. Optimal government policy, the environment, employment, and tax shifting. *Environmental fiscal reform and unemployment*, pages 93–120, 1996.

[47] L. Ljungqvist and T.J. Sargent. European unemployment and turbulence revisited in a matching model. *Journal of the European Economic Association*, 2(2-3) :456–468, 2004.

[48] R.E. Lucas and N.L. Stokey. Optimal fiscal and monetary policy in an economy without capital. *Journal of monetary Economics*, 12(1) :55–93, 1983.

[49] A. Marcet and A. Scott. Debt and deficit fluctuations and the structure of bond markets. *Journal of Economic Theory*, 144(2) :473–501, 2009.

[50] G. Marini and P. Scaramozzino. Overlapping generations and environmental control. *Journal of environmental economics and management*, 29(1) :64–77, 1995.

[51] B. Metz, O. Davidson, R. Swart, and J. Pan. *Climate change 2001 : mitigation - contribution of Working Group III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2001.

[52] J.A. Mirrlees. An exploration in the theory of optimum income taxation. *The review of economic studies*, pages 175–208, 1971.

[53] R.A. Mooij and AL Bovenberg. Environmental taxes and labor-market distortions. *European Journal of Political Economy*, pages 655–683, 1994.

[54] M. Nautet and L. Van Meensel. Economic impact of the public debt. *Economic Review*, (II) :7–19, 2011.

[55] W.D. Nordhaus. To slow or not to slow : the economics of the greenhouse effect. *The economic journal*, 101(407) :920–937, 1991.

[56] U. Panizza and A. Presbitero. Public debt and economic growth : Is there a causal effect ? Technical report, Institute of Public Policy and Public Choice-POLIS, 2012.

[57] I.W.H. Parry. Pollution taxes and revenue recycling. *Journal of Environmental Economics and management*, 29(3) :64–77, 1995.

[58] D. Pearce. The role of carbon taxes in adjusting to global warming. *The Economic Journal*, 101(407) :938–948, 1991.

[59] J. Pezzey. *Impacts of greenhouse gas control strategies on UK competitiveness : a survey and exploration of the issues*. Department of Trade and Industry, 1991.

[60] A. Quinet. La valeur tutélaire du carbone. Technical report, Centre d'Analyse Stratégique, 2009.

[61] F.P. Ramsey. A contribution to the theory of taxation. *The Economic Journal*, pages 47–61, 1927.

[62] C.M. Reinhart and K.S. Rogoff. Growth in a time of debt. Technical report, National Bureau of Economic Research, 2010.

[63] R. Repetto and D. Austin. The costs of climate protection. *Washington, DC : World Resources Institute*, 1997.

[64] G. Saint-Paul. Fiscal policy in an endogenous growth model. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(4) :1243–1259, 1992.

[65] T.J. Sargent and N. Wallace. Some unpleasant monetarist arithmetic. *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review*, 5(3) :1–17, 1981.

[66] K. Schneider. Involuntary unemployment and environmental policy : The double dividend hypothesis. *The Scandinavian Journal of Economics*, 99(1) :45–59, 1997.

[67] K. Schubert and P. Zagamé. *L'environnement : une nouvelle dimension de l'analyse économique*. Vuibert, 2006.

[68] J.E. Stiglitz. Self-selection and pareto efficient taxation. *Journal of Public Economics*, 17(2) :213–240, 1982.

[69] E. Symons, J. Proops, and P. Gay. Carbon taxes, consumer demand and carbon dioxide emissions : a simulation analysis for the uk. *Fiscal Studies*, 15(2) :19–43, 2005.

[70] D. Terkla. The efficiency value of effluent tax revenues. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11(2) :107–123, 1984.

Chapitre 2

Réforme fiscale environnementale : cas d'un modèle OLG d'une petite économie ouverte à deux secteurs de production

2.1 Introduction

Les réformes fiscales environnementales représentent une thématique qui a largement été étudiée dans la littérature : ce type de réforme consiste à intégrer explicitement dans le système fiscal un instrument qui a vocation à corriger les externalités environnementales générées par l'économie. En effet, les décisions de production et de consommation réalisées par les générations actuelles affectent durablement la qualité de l'environnement (bien public), via une accumulation du stock de pollution ou de gaz à effet de serre, compromettant le bien-être des générations futures. Dans le cas plus spécifique d'une politique climatique, l'adjonction d'un instrument public assis sur les comportements d'émissions voit sa justification dans l'existence de cette externalité. Cependant, une partie des évaluations réalisées sur l'introduction brute d'une taxe carbone conclut que la transition vers une trajectoire de croissance décarbonée devrait être coûteuse en croissance et en activité économique[1]. Dans un contexte européen marqué par des perspectives de croissance faible à court-moyen terme et de dégradation des finances publiques, il pourrait sembler *a priori* compromis de concilier les impératifs de politique climatique et la nécessité de relancer l'activité.

Pourtant, le concept de double-dividende, défini par Goulder (1995, [18]) et Bovenberg (1999, [7]), laisse présager qu'il serait possible, par une réforme fiscale appropriée, d'orienter efficacement l'économie vers un sentier de croissance moins émetteur sans pour autant compromettre la croissance. En effet, en accentuant la fiscalité sur les comportements polluants et en allégeant en contrepartie les charges sur le travail, les gouvernements pourraient s'attendre à un regain d'activité porté par la croissance du marché de l'emploi. Les conditions de réussite de ce double-dividende sont propres à chaque pays et concernent principalement l'élasticité de l'assiette des émissions, les caractéristiques du marché de l'emploi et l'état initial du système fiscal. Les études réalisées sur les réformes fiscales environnementales, et en particulier l'article pionnier de Bovenberg et de Mooij (1994, [8]) mettent en évidence l'importance de raisonner dans un cadre d'équilibre général afin de tenir compte des interactions générées par les instruments fiscaux sur les différents marchés de l'économie. Les caractéristiques du marché du travail telles que l'existence de chômage involontaire (Bovenberg et Van Der Ploeg (1996, [6])) ou l'élasticité de l'offre de travail (Babiker *et. al.* (2003, [2])) revêtent une importance cruciale sur les conséquences économiques de ces réformes. D'autre part, la dynamique d'endettement public suppose en contrepartie une évolution du système fiscal permettant de stabiliser le niveau d'endettement à long terme et agit sur l'efficacité économique d'une réforme fiscale environnementale au travers d'un effet d'interaction des taxes (Parry (1995, [29])).

De plus, la politique climatique est par essence une politique affectant plusieurs générations d'agents dont les comportements dépendent d'horizons de planification finis. Une approche de la relation entre croissance et environnement dans un cadre à générations imbriquées peut conduire à des résultats différents d'un cadre d'un agent représentatif à durée de vie infinie, à cause des externalités intergénérationnelles (John et Pecchenino (1994, [24])). De ce point de vue, l'évaluation de la problématique sous un angle intergénérationnel parait naturelle, d'autant plus qu'elle permet d'évaluer la répartition des coûts et bénéfices d'une réforme sur les différentes générations d'agents. Dans ce cadre, la dette publique peut être considérée non plus comme un instrument permettant d'équilibrer les soldes budgétaires mais également comme un moyen de transférer des richesses d'une génération à l'autre. C'est ainsi que la prise en compte de l'endettement public est souvent utilisée afin de lisser les coûts de réformes fiscales environnementales initialement répartis de façon inégale sur les différentes générations (Heijdra et Van der Horst(1998, [21])).

1. cf. chapitre 1 p.27

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'évaluation des impacts de différents types de réformes fiscales et aux conditions de succès de celles-ci, au regard de plusieurs critères. Puisque la vocation première de la fiscalité est d'assurer une certaine justice sociale sans compromettre l'efficacité économique, la mise en place d'une réforme fiscale environnementale se doit de respecter une certaine notion d'équité qui peut se comprendre comme la distribution des richesses entre les agents au sein d'une même génération mais également entre plusieurs générations. La notion d'équité évoquée précédemment peut donc se comprendre comme un partage équitable des coûts entre les générations actuelles et les générations futures, et la dette publique peut alors permettre d'ajuster la répartition intergénérationnelle de ces coûts. D'autre part, les études réalisées sur l'impact d'une taxe carbone ou énergétique laissent transparaître une préoccupation quant à la répartition intersectorielle des coûts de la politique climatique dans la mesure où les secteurs intensifs en énergie (secteur électrique, acierie, transports, et autres) supporteraient la majorité de ces coûts [2]. Ce papier aura donc pour vocation de répondre à la fois aux questions suivantes :

- Quel type de réforme fiscale environnementale permettrait d'assurer efficacement une transition vers une économie décarbonée ?
- Comment cette transition se traduit-elle en termes d'équité (intergénérationnelle et sectorielle) ?

Le modèle sur lequel nous nous appuierons pour répondre à la problématique est un modèle d'équilibre général à générations imbriquées à la Diamond (1965, [12]) d'une petite économie ouverte, avec une offre de travail endogène, que nous avons étendu de façon à intégrer la qualité de l'environnement et calibré sur données françaises. Le choix de ce type de modèle permet de représenter explicitement les externalités générées par les comportements myopes d'agents dont les décisions en termes d'épargne ou de consommation sont fondées sur un horizon de vie fini, à la fin duquel l'absence d'héritage ou d'altruisme les poussent à dilapider l'intégralité de leur richesse. Le choix de modélisation d'une petite économie ouverte nous permet à la fois de tenir compte d'importations énergétiques et de faciliter la résolution du système via un taux d'intérêt exogène [3]. Dans ce cadre, le niveau d'endettement public n'influe pas sur le taux d'intérêt (pas d'effet d'éviction) mais impactera l'économie au travers de la politique fiscale (taxes proportionnelles et forfaitaires) qui doit permettre sa stabilisation à long terme. L'introduction d'un bien polluant (l'énergie) permet de modéliser une évolution de la qualité environnementale liée aux comportements de consommation des agents, dans une perspective similaire à celle retenue par Heijdra et Van der Horst (1998 [21]). En revanche, nos travaux s'écartent de ce cadre par l'introduction d'un second secteur de production (semblable à la représentation retenue par Bréchet *et. al.* (2010, [9])), ce qui nous permet d'ajouter une dimension de désagrégation de l'économie et d'envisager la possibilité de taxer l'énergie finale (spécification traditionnelle de la politique fiscale climatique) en tant qu'input de production, mais également que bien de consommation. Le modèle ainsi développé nous permet donc de traiter des impacts quantifiés de différents types de réformes fiscales environnementales en termes d'emploi, d'activité économique (PIB), de disparités sectorielles et de répartition intergénérationnelle des coûts et bénéfices.

Notre objectif est d'étudier les conséquences de différentes réformes fiscales et de les hiérarchiser au regard des différents critères d'efficacité et d'équité évoqués précédemment. Nous montrerons en particulier qu'une réforme consistant à taxer l'énergie finale en tant que

2. En particulier les études réalisées à l'aide de modèles d'équilibre général calculables desagrégés en plusieurs secteurs (IMACLIM-R, GEMINI-E3, MIT-EPPA).

3. L'endogénéité du taux d'intérêt rend la résolution analytique de modèles à générations imbriquées particulièrement compliquée.

facteur de production et à réduire les cotisations sociales en contrepartie permet de générer un double-dividende pour les générations futures, à savoir une amélioration simultanée de la qualité environnementale et du bien-être privé. La réussite de cette réforme passe en particulier par la réduction des distorsions sur le marché du travail (dividende en emploi), mais se réalise au détriment du secteur énergétique, grand perdant de cette réforme.

Dans une première partie, nous décrirons en détail nos choix de spécification pour ce modèle, et caractériserons dans une deuxième partie l'état stationnaire ainsi que la dynamique du système autour de cet équilibre, ainsi que les choix de calibrage du modèle. La résolution et la mise en ?uvre du modèle nous permet de présenter dans la section 3 une analyse positive des différentes taxes, permettant d'appréhender les canaux de transmission qui seront déterminants dans la réussite de réformes fiscales plus complexes. Enfin, la section 4 s'intéressera à une évaluation des impacts macroéconomiques et sectoriels des différentes réformes fiscales environnementales envisageables, alors que la dernière section traitera plus spécifiquement des effets des réformes sur le bien-être et l'occurrence ou non d'un double-dividende.

2.2 Description du modèle

Le modèle à générations imbriquées retenu représente une petite économie ouverte à deux secteurs de production, dans laquelle interagissent quatre catégories d'agents : l'Etat, les ménages, les entreprises et le reste du monde. Les principales caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- L'offre de travail des ménages est endogène et ceux-ci consomment deux types de biens : le bien final domestique (non-énergétique) et l'énergie finale.
- L'activité économique est soutenue par deux secteurs productifs :
  - l'énergie finale produite domestiquement à partir de capital, de travail et d'énergie fossile importée.
  - le bien de consommation non-énergétique produit à partir de capital, de travail et d'énergie finale.
- Le taux d'intérêt domestique, ainsi que le prix de l'énergie fossile (en monnaie étrangère) sont exogènes (fixés par le reste du monde).
- L'État dispose d'instruments de financement des dépenses publiques tels que des taxes proportionnelles et l'émission de nouvelle dette souveraine.

2.2.1 Les ménages

Nous considérons que N_t individus naissent à chaque date t, avec pour horizon de planification un cycle de vie constitué de deux périodes : une période d'activité (jeunesse) et une période de retraite (vieillesse). La population croît à un rythme régulier n exogène : $N_{t+1} = (1+n)N_t, \forall t \geq 0$, pour N_0 donné.

Seuls les individus jeunes sont actifs sur le marché du travail : ils offrent du travail h_t [4] rémunéré par un salaire brut w_t, et déterminent leur consommation totale $\widetilde{c}_t$ (consommation de bien domestique et d'énergie) et leur niveau d'épargne s_t en prévision de leur retraite. Ils sont soumis à un impôt t_t^w prélevé sur les revenus du travail (à savoir le salaire brut) par l'État. Les impôts sur les biens consommés s'appliquent explicitement au niveau de désagrégation suivant mais sont implicitement inclus dans le prix à la consommation

4. h_t représente ici le nombre d'heures travaillées. En notant a_t le loisir, on a $h_t + a_t = 1$; puisque le montant total de travail est normalisé à 1.

p_t^c. La contrainte budgétaire d'un individu jeune s'écrit donc :

$$p_t^c \widetilde{c}_t + s_t = w_t(1 - t_t^w)h_t \tag{2.1}$$

Devenus retraités en $t+1$, les individus vieux sont inactifs sur le marché du travail. Ils consomment alors l'intégralité de ce qu'ils avaient épargné dans leur jeunesse (pas de legs) : $\widetilde{d}_{t+1}$. Bien que ce choix soit discutable au vu des résultats les plus récents sur la fiscalité du capital, nous adopterons dans notre étude la position historique sur le sujet, à savoir que nous supposerons dans ce modèle que la taxation des revenus de l'épargne est nulle. En revanche, la taxation des biens de consommation se retrouve toujours implicitement dans le prix à la consommation. De plus, ces individus sont soumis à un prélèvement forfaitaire de la part de l'État T_{t+1} qui assure la stabilisation de la dette publique. La contrainte budgétaire d'un individu retraité s'écrit :

$$p_{t+1}^c \widetilde{d}_{t+1} + T_{t+1} = (1 + r_{t+1})s_t \tag{2.2}$$

où r_{t+1} est le taux d'intérêt réel s'appliquant entre les périodes t et $t+1$.

En combinant (2.1) et (2.2), la contrainte budgétaire intertemporelle (CBI) d'un individu est la suivante :

$$p_t^c \widetilde{c}_t + \frac{p_{t+1}^c \widetilde{d}_{t+1} + T_{t+1}}{1 + r_{t+1}} = (1 - t_t^w)w_t h_t \tag{2.3}$$

Les individus dérivent une utilité (ou un bien-être) de leur consommation totale des deux biens (énergie et bien domestique), du niveau de pollution [5] Q_t et du nombre d'heures travaillées : $U_t = U(\widetilde{c}_t, h_t, Q_t, \widetilde{d}_{t+1}, Q_{t+1})$. La fonction $U(.)$ est strictement concave, croissante par rapport à la consommation des deux biens, décroissante par rapport à la quantité d'heures travaillées et au niveau de pollution, deux fois différentiable et respecte les conditions d'Inada. Puisque cette fonction d'utilité est identique pour tous les individus (ainsi que leurs contraintes), nous nous ramènerons donc à l'étude du programme d'un individu représentatif par la suite.

Pour des raisons de simplicité, nous supposerons que l'utilité sera séparable entre la composante purement économique (bien-être privé) et la composante environnementale. L'utilité d'un individu dépend négativement du niveau de pollution et nous supposons que la valorisation de cette perte de bien-être γ_E est identique quelle que soit la période de vie de l'individu (jeunesse ou vieillesse) [6]. Nous retenons alors une spécification des préférences individuelles sous la forme suivante : :

$$\begin{aligned} U(\widetilde{c}_t, h_t, Q_t, \widetilde{d}_{t+1}, Q_{t+1}) = {} & \ln(X(\widetilde{c}_t, h_t)) - \nu \ln(Q_t) \\ & + \frac{1}{1+\rho}[\ln(X(\widetilde{d}_{t+1})) - \nu \ln(Q_{t+1})] \end{aligned}$$

où la composante économique du bien-être (panier consommation-loisir) est notée $X(.)$, $\frac{1}{1+\rho}$ est le facteur d'escompte (ρ représente le taux de préférence pour le présent), $Q_i, i = t, t+1$ représente le niveau de pollution à la période i.

5. Cette pollution de stock peut en particulier faire référence aux Gaz à Effet de Serre émis lors de la consommation d'énergie.

6. Il est intéressant de noter que cette hypothèse pourrait être relâchée dans un contexte où les individus à la retraite pourraient relativement plus valoriser une atmosphère moins polluée (car plus sensibles à des problèmes respiratoires par exemple) que les individus jeunes (John et Pecchenino (1994, [?])).

Nous retiendrons pour le panier consommation-loisir, une spécification initialement développée par Greenwood *et. al.* (1998, [19]) [7], à savoir

$$X(\widetilde{c}_t, h_t) = \widetilde{c}_t - \frac{{h_t}^{1+\frac{1}{\sigma_L}}}{1+\frac{1}{\sigma_L}}$$

où $\sigma_L \geq 0$ représente l'élasticité non compensée de l'offre de travail au salaire. De même, $X(\widetilde{d}_t) = \widetilde{d}_t, \forall t$ car le ménage n'offre pas de travail en deuxième période de vie.

Puisque les ménages sont atomistiques, ils ne tiennent pas compte de l'externalité environnementale (pollution) générée par leurs comportements individuels. La pollution est donc une donnée exogène dans leur programme de maximisation du bien-être, qui s'écrit :

$$\max_{\widetilde{c}_t, \widetilde{d}_{t+1}, h_t} \left\{ U(\widetilde{c}_t, h_t, \widetilde{d}_{t+1}) \;\middle|\; p_t^c \widetilde{c}_t + \frac{p_{t+1}^c \widetilde{d}_{t+1} + T_{t+1}}{1+r_{t+1}} = (1-t_t^w) w_t h_t \right\}$$

Les conditions du premier ordre permettent de retrouver l'équation d'Euler classique, décrivant l'arbitrage intertemporel de consommation totale (consommation de biens et loisir) :

$$\frac{X(\widetilde{d}_{t+1})}{X(\widetilde{c}_t, h_t)} = \frac{\widetilde{d}_{t+1}}{\widetilde{c}_t - \frac{{h_t}^{1+\frac{1}{\sigma_L}}}{1+\frac{1}{\sigma_L}}} = \frac{p_t^c}{p_{t+1}^c} \frac{1+r_{t+1}}{1+\rho}$$

De plus, ces conditions impliquent que le taux marginal de substitution entre le loisir et la consommation (salaire de réserve) est égal au salaire réel. L'offre de travail dépend positivement du salaire net réel :

$$h_t = \left(\frac{(1-t_t^w) w_t}{p_t^c} \right)^{\sigma_L}$$

Les fonctions marshalliennes de consommation, d'épargne et d'offre de travail sont alors données par :

$$\widetilde{c}_t = \left(\tfrac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}\right)^{1+\sigma_L} \left[\tfrac{1+\rho+(2+\rho)\sigma_L}{(1+\sigma_L)(2+\rho)}\right] - \tfrac{1+\rho}{2+\rho} \tfrac{1}{p_t^c} \tfrac{T_{t+1}}{1+r_{t+1}} \tag{2.4}$$

$$s_t = \left(\tfrac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}\right)^{1+\sigma_L} \left[\tfrac{p_t^c}{(2+\rho)(1+\sigma_L)}\right] + \tfrac{1+\rho}{2+\rho} \tfrac{T_{t+1}}{1+r_{t+1}} \tag{2.5}$$

$$h_t = \left(\tfrac{(1-t_t^w) w_t}{p_t^c}\right)^{\sigma_L} \tag{2.6}$$

$$d_{t+1} = \left(\tfrac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}\right)^{1+\sigma_L} \left[\tfrac{p_t^c}{p_{t+1}^c} \tfrac{1+r_{t+1}}{(1+\sigma_L)(2+\rho)}\right] - \tfrac{1}{2+\rho} \tfrac{T_{t+1}}{p_{t+1}^c} \tag{2.7}$$

La consommation, l'épargne et l'offre de travail seront toutes des fonctions croissantes du pouvoir d'achat du ménage $\dfrac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}$. En revanche, l'anticipation d'un prélèvement forfaitaire pendant sa retraite se répercute en une diminution de sa consommation en première période et une augmentation de son épargne.

7. Une spécification sous la forme $U(c,l) = U(c - G(l))$, avec $G(.)$ une fonction croissante et concave, permet d'éliminer les effets de substitution intertemporelle dans la fonction d'offre de travail. L'offre de travail est déterminée indépendamment du choix intertemporel de consommation-épargne, et ne dépendra que du salaire réel. La forme de $G(.)$ que nous retenons a été proposée par Heijdra et Van der Horst (1998, [21]).

Le ménage détermine son niveau de consommation du bien final c_t^g et de l'énergie finale c_t^e conditionnellement au niveau de consommation totale déterminé précédemment, selon une structure de consommation sous forme de CES imbriquée :

$$\widetilde{c}_t = \left(\beta (c_t^e)^{\frac{\sigma_C - 1}{\sigma_C}} + (1-\beta)(c_t^g)^{\frac{\sigma_C - 1}{\sigma_C}} \right)^{\frac{\sigma_C}{\sigma_C - 1}}$$

tout en respectant la contrainte budgétaire suivante :

$$p_t^c \widetilde{c}_t = (1 + t_t^g) c_t^g + p_t^e (1 + t_t^{e,m}) c_t^e.$$

Ainsi σ_C représente l'élasticité de substitution entre la consommation de bien non-énergétique et d'énergie finale ; t_t^g est la taxe sur le bien final domestique, p_t^e le prix hors taxe de l'énergie finale et $t_t^{e,m}$ la taxe sur l'énergie finale à destination des ménages. Le bien domestique non-énergétique est considéré comme le bien numéraire de l'économie ; son prix est normalisé à 1. Le prix à la consommation p_t^c s'exprimera donc également comme une fonction CES des prix *taxes comprises* des deux biens, comme nous l'évoquions précédemment.

Le ménage choisit son niveau de consommation pour chaque type de bien, de façon à vérifier le programme suivant :

$$\max_{c_t^e, c_t^g} \left\{ \left(\beta (c_t^e)^{\frac{\sigma_C - 1}{\sigma_C}} + (1-\beta)(c_t^g)^{\frac{\sigma_C - 1}{\sigma_C}} \right)^{\frac{\sigma_C}{\sigma_C - 1}} \;\middle|\; p_t^c \widetilde{c}_t = (1 + t_t^g) c_t^g - p_t^e (1 + t_t^{e,m}) c_t^e) \right\}$$

La résolution de ce programme donne les conditions du premier ordre suivantes :

$$\left(\frac{c_t^g}{\widetilde{c}_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta) \frac{p_t^c}{1 + t_t^g} \tag{2.8}$$

$$\left(\frac{c_t^e}{\widetilde{c}_t} \right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta \frac{p_t^c}{p_t^e (1 + t_t^{e,m})} \tag{2.9}$$

et la résolution du programme de maximisation de la consommation se traduit par l'expression duale du prix à la consommation :

$$p_t^c = \left[\beta^{2 - \frac{1}{\sigma_C}} \left(p_t^e (1 + t_t^{e,m}) \right)^{\frac{1 - \sigma_C}{\sigma_C}} + (1-\beta)^{2 - \frac{1}{\sigma_C}} \left(1 + t_t^g \right)^{\frac{1 - \sigma_C}{\sigma_C}} \right]^{\frac{\sigma_C}{1 - \sigma_C}} \tag{2.10}$$

Les expressions précédentes transposées pour la seconde période de vie de l'individu donnent :

$$\left(\frac{d_{t+1}^g}{\widetilde{d}_{t+1}} \right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta) \frac{p_{t+1}^c}{1 + t_{t+1}^g} \tag{2.11}$$

$$\left(\frac{d_{t+1}^e}{\widetilde{d}_{t+1}} \right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta \frac{p_{t+1}^c}{p_{t+1}^e (1 + t_{t+1}^{e,m})} \tag{2.12}$$

2.2.2 Les entreprises

On suppose que les entreprises fonctionnent en concurrence pure et parfaite sur chacun des deux secteurs : secteur du bien final et secteur du bien énergétique. Nous nous ramenons alors au cas d'une firme représentative exerçant sur chaque secteur de production. A partir de leurs inputs respectifs (travail, capital et énergie), chaque firme cherche à maximiser son profit. Nous supposons en plus qu'il y a parfaite mobilité du travail et du capital entre

ces deux secteurs. Cette hypothèse revient à imposer des rémunérations identiques de ces deux inputs de production, quelle que soit la firme considérée.

L'entreprise produisant le bien final domestique à partir de travail L_t^g, de capital K_t^g et d'énergie finale E_t résout le programme suivant :

$$\max_{L_t^g, K_t^g, E_t} \{\pi_t^g = Y_t^g - w_t L_t^g - Ck_t K_t^g - p_t^e(1 + t_t^{e,e})E_t\}$$

où $Y_t^g = F^g(L_t^g, K_t^g, E_t)$; $F^g(.)$ est une fonction concave homogène de degré 1. Pour des raisons de simplicité, cette fonction est choisie comme une fonction Cobb-Douglas à trois facteurs : $Y_t^g = (L_t^g)^{\gamma_L}(K_t^g)^{\gamma_K}(E_t)^{\gamma_E}$, avec $\gamma_L + \gamma_E + \gamma_K = 1$. Les conditions du premier ordre en résultant sont :

$$\gamma_L \frac{Y_t^g}{L_t^g} = w_t \tag{2.13}$$

$$\gamma_K \frac{Y_t^g}{K_t^g} = Ck_t = r_t + \delta \tag{2.14}$$

$$\gamma_E \frac{Y_t^g}{E_t} = p_t^e(1 + t_t^{e,e}) \tag{2.15}$$

où w_t représente le salaire brut nominal, Ck_t le coût du capital (égal au taux d'intérêt réel r_t augmenté du taux de dépréciation du capital δ) et $p^e(1 + t_t^{e,e})$ représente le prix *taxes comprises* de l'énergie finale produite par le secteur énergétique et utilisée comme input dans le secteur domestique. Comme précisé précédemment, le prix du bien final domestique est normalisé à 1. Les rémunérations des facteurs sont donc égales à leurs productivités marginales respectives.

Le bien énergétique Y_t^e, assimilable à l'énergie finale (utilisé pour la production du bien précédent et la consommation des ménages) est lui-même produit à partir de capital K_t^e, de travail L_t^e, et d'énergie fossile totalement importée Z_t. Le prix en monnaie étrangère de l'énergie fossile est exogène et notée $(p_t^z)^*$. Exprimée en monnaie domestique, ce prix s'écrit alors $p_t^z = \frac{(p_t^z)^*}{ner_t}$, si ner_t représente le taux de change nominal au certain à l'instant t.

La fonction de production $F^e(.)$ a des rendements d'échelle constants, et est également choisie comme une fonction Cobb-Douglas des trois inputs. Le programme de l'entreprise s'écrit :

$$\max_{L_t, K_t, E_t} \{\pi_t = p_t^e(L_t^e)^{\varepsilon_L}(K_t^e)^{\varepsilon_K}(Z_t)^{\varepsilon_Z} - w_t L_t^e - Ck_t K_t^e - (1 + t_t^z)p_t^z Z_t\}$$

où $\varepsilon_L + \varepsilon_K + \varepsilon_Z = 1$. Nous supposons pour simplifier que le salaire et le coût du capital sont identiques pour les deux secteurs de production (pas d'opportunité d'arbitrage). La maximisation du profit donne les conditions du premier ordre suivantes :

$$\varepsilon_L \frac{Y_t^e}{L_t^e} = \frac{w_t}{p_t^e} \tag{2.16}$$

$$\varepsilon_K \frac{Y_t^e}{K_t^e} = \frac{r_t + \delta}{p_t^e} \tag{2.17}$$

$$\varepsilon_Z \frac{Y_t^e}{Z_t} = \frac{p_t^z(1 + t_t^z)}{p_t^e} \tag{2.18}$$

L'énergie fossile est importée à un prix exogène p_t^z auquel est appliqué une taxe $(1 + t_t^z)$.

2.2.3 La pollution

Conformément à la spécification retenue par Howarth et Norgaard (1992, [23]), nous supposons que la consommation d'énergie finale [8] génère l'émission de pollution (Gaz à Effet de Serre) qui s'accumulent au stock déjà présent dans l'atmosphère.

$$Q_{t+1} = (1-m)Q_t + \theta_1 N_t c_t^e + \theta_2 N_{t-1} d_t^e + \theta_3 E_t$$

où $0 < m < 1$ désigne le degré de régénération naturelle de l'atmosphère, et $\theta_j \geq 0$ ($j = 1, 2, 3$) le taux d'émission de pollution issu de chaque usage énergétique. A chaque période une partie du stock de pollution est absorbée par l'atmosphère, et nous supposons que ce taux de régénération est constant quel que soit le niveau de pollution [9]. Par simplicité, nous supposerons également que la consommation d'une unité d'énergie finale génère un flux égal de pollution, quel que soit l'usage qui en est fait (consommation par un individu jeune ou vieux, utilisation dans un processus de production) : $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$.

Sans activité humaine, le niveau de pollution devrait naturellement tendre à être nul. Ce sont les usages énergétiques de la population qui, évoluant au rythme de la croissance économique, auront tendance à pousser le stock de pollution vers l'infini. En effet, la régénération naturelle de l'atmosphère (constante) n'est pas suffisante pour contenir l'évolution du stock de pollution. Sans maintenance environnementale ou activité de dépollution pour contrer les émissions croissantes liées à la consommation d'énergie, cette variable croîtra à long terme au rythme de l'économie et tendra vers l'infini.

2.2.4 Le gouvernement

A chaque période, le gouvernement fait face à des dépenses publiques G_t exogènes, financées soit par les recettes fiscales assises sur l'activité économique (taxes sur la consommation, charges sur les revenus du travail, taxes énergétiques), soit par émission de dette publique B_t (notée $b_t = \frac{B_t}{N_t}$ par tête). Nous supposons ainsi que les obligations d'État ont une maturité d'une période ; B_{t-1} émise à la période $t-1$ est intégralement remboursée en t, et supporte le même taux d'intérêt que le capital. La contrainte budgétaire de l'État s'écrit alors :

$$\begin{aligned} B_t + t_t^z p_t^z Z_t + t_t^{e,e} p_t^e E_t + N_t(t_t^g c_t^g + t_t^{e,m} p_t^e c_t^e + t_t^w w_t h_t) \\ + N_{t-1}[t_t^c d_t^g + t_t^{e,m} p_t^e d_t^e + T_t] = G_t + (1+r_t)B_{t-1} \end{aligned} \tag{2.19}$$

où apparaît la dynamique d'accumulation de la dette publique, qui permet d'ajuster l'écart entre les recettes fiscales et les dépenses publiques à chaque période. Nous adoptons une spécification pour $T_t = \alpha(b_t - \bar{b})$ qui permet de stabiliser le niveau de dette à son niveau stationnaire de long terme $\bar{b}$ [10] (où α mesure la vitesse de convergence de la dette). Ainsi, à l'état stationnaire, $\bar{T} = 0$.

8. La taxation climatique est assise sur le contenu en émissions de l'énergie finale, qui comprend implicitement le contenu CO2 de l'énergie fossile qui a été auparavant consommée. Supposer que la consommation d'énergie fossile génère des Gaz à Effet de Serre reviendrait donc à compter deux fois le contenu CO2 de l'énergie finale.

9. Ce taux d'absorption devrait lui-même dépendre du niveau de pollution : $m = m(Q_t)$ (Prieur (2006, [30]).

10. Le système d'équilibre n'est pas récursif sans ce prélèvement forfaitaire. La résolution de ce système pour un vecteur de variables exogènes données (taxes forfaitaires et dépenses publiques) permet néanmoins de déterminer le niveau de long terme vers lequel la dette *per capita* doit tendre $\bar{b}$. Conformément à Challe et Ragot (2011, [10]), qui s'appuient eux-même sur les conclusions de Bohn (1998, [4]) et Gali et Perotti (2003, [15]), cet impôt forfaitaire doit suivre une régle fiscale permettant d'assurer la convergence de la dette publique vers son niveau de long-terme.

2.2.5 Le marché extérieur

Au certain, le taux de change réel représente les termes de l'échange entre l'énergie fossile importée au prix p_t^Z exprimé en monnaie domestique et le bien non énergétique domestique exporté au prix $p_t^g = 1$ (numéraire). Le taux de change réel q_t s'exprime donc comme :

$$q_t = \frac{p_t^g ner_t}{(p_t^z)^*} = \frac{1}{p_t^z}$$

Il n'existe pas d'arbitrage de consommation entre les biens domestiques et étrangers dans notre modèle, le taux de change réel reste donc constant *a priori* et sera alors considéré comme une variable exogène [11].

Les exportations sont quant à elles intrinsèquement déterminées par le fonctionnement de marché du bien non-énergétique : il s'agit en effet du différentiel entre la production et l'absorption domestique du bien.

$$XP_t = Y_t^g - N_t c_t^g + N_{t-1} d_t^g - G_t - (K_{t+1} - (1-\delta)K_t)$$

2.2.6 L'équilibre général

Tous les marchés sont parfaits et s'équilibrent.

Taux d'intérêt. Puisque le capital est supposé parfaitement mobile (à la fois entre secteurs de production domestique mais aussi au niveau international), à chaque période le taux d'intérêt domestique est égal au taux d'intérêt mondial r_t^* : $r_t = r_t^*$

Marché du travail. Il n'existe pas de chômage involontaire dans ce modèle : l'offre de travail est égale à la demande globale de travail de la part des deux entreprises. L'équilibre du marché du travail implique donc : $L_t = L_t^g + L_t^e = N_t h_t$.

Marché du capital. L'épargne des ménages domestiques se répartit entre l'achat d'obligations étatiques, de capital productif ou de titres étrangers F_t .

$$N_t s_t = B_t + K_{t+1} + F_t$$

où F_t représente les actifs étrangers (investissement net étranger). Une fois le stock de capital déterminé, il se répartit sans préférence entre les deux firmes (rendement du capital identique) : $K_t = K_t^g + K_t^e$.

Marché de l'énergie. L'énergie finale produite est entièrement consommée par l'économie domestique, qu'il s'agisse de la demande en input de la firme du secteur du bien final ou de la consommation des ménages :

$$Y_t^e = E_t + N_t c_t^e + N_{t-1} d_t^e$$

11. Les modèles traitant des évolutions du taux de change réel s'appuient sur l'existence de plusieurs biens de consommation substituables dont un serait importé de l'étranger. Les importations d'énergie fossile évoquées dans notre modèle peuvent s'avérer trompeuses, et n'intègrent pas ce type de raisonnement puisque les deux biens consommés par les ménages (énergie finale et bien non-énergétique) sont produits domestiquement.

Marché des biens. Cet équilibre est assuré automatiquement si les précédents le sont (loi de Walras). Ainsi, à l'équilibre, les avoirs extérieurs du pays F_t évoluent en fonction de la balance des paiements, en sachant que les importations sont constituées uniquement des importations d'énergie et que seule une partie du bien non-énergétique est exportée. Cet équilibre se traduit par l'équation suivante [12]

$$F_t = (1+r_t)F_{t-1} + \underbrace{(Y_t^g - (N_t c_t^g + N_{t-1} d_t^g) - G_t - (K_{t+1} - (1-\delta)K_t - p_t^z Z_t)}_{\text{balance commerciale}}$$

2.3 Résolution du modèle

La mise en ?uvre du modèle passera par une trajectoire dynamique transitoire des variables permettant à l'économie d'atteindre un sentier de croissance équilibrée de long terme, que nous caractérisons dans cette section.

La résolution du modèle passe par la recherche d'un équilibre décentralisé par les prix et s'effectue par blocs. Le salaire horaire et le prix de l'énergie finale découlent des frontières des prix des deux secteurs productifs et ne sont fonction que des variables exogènes :

$$w = \left(\frac{p^z(1+t^z)}{\varepsilon_Z}\right)^{\frac{-\gamma_E \varepsilon_Z}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{1+t^{e,e}}{\gamma_E}\right)^{\frac{-\gamma_E}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} {\gamma_L}^{\frac{\gamma_L}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{r+\delta}{\gamma_K}\right)^{\frac{-\gamma_K}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{r+\delta}{\varepsilon_K}\right)^{\frac{-\gamma_E\varepsilon_K}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} {\varepsilon_L}^{\frac{\gamma_E\varepsilon_L}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \tag{2.20}$$

$$p^e = \left(\frac{p^z(1+t^z)}{\varepsilon_Z}\right)^{\frac{\gamma_L \varepsilon_Z}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{1+t^{e,e}}{\gamma_E}\right)^{\frac{-\gamma_E\varepsilon_L}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{\gamma_L}{\varepsilon_L}\right)^{\frac{\gamma_L\varepsilon_L}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{r+\delta}{\gamma_K}\right)^{\frac{-\gamma_K\varepsilon_L}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \left(\frac{r+\delta}{\varepsilon_K}\right)^{\frac{\gamma_L\varepsilon_K}{\gamma_L+\gamma_E\varepsilon_L}} \tag{2.21}$$

Le prix à la consommation est alors automatiquement déterminé par :

$$p_t^c = \left[\beta^{2-\frac{1}{\sigma_C}} \left(p_t^e(1+t_t^{e,m})\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}} + (1-\beta)^{2-\frac{1}{\sigma_C}} \left(1+t_t^g\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}}\right]^{\frac{\sigma_C}{1-\sigma_C}} \tag{2.22}$$

Une fois le système de prix et le salaire déterminés, le comportement des ménages est connu (consommations, épargne et offre de travail). Le retour aux conditions de premier ordre des programmes de production des deux secteurs combinées à la contrainte d'équilibre du marché de l'emploi permet alors de caractériser les demandes des facteurs de production, les niveaux de production et le stock de capital total présent dans l'économie. Enfin, la contrainte budgétaire de l'État et la condition d'équilibre sur le marché de l'épargne caractérisent les variables restantes, à savoir le stock de dette publique et les avoirs extérieurs par tête.

2.3.1 Etat stationnaire

Nous résolvons le système dynamique décrit précédemment le long d'un sentier de croissance régulier. En effet, pour une croissance démographique régulière au taux n ($N_{t+1} = (1+n)N_t$, $\forall t \geq 0$, et N_0 donné), les autres variables en volume croissent au même rythme.

12. Démonstration disponible en annexe.

Nous réécrivons le système d'équations en variables intensives, où chaque variable (en volume) par tête est dénotée par une lettre minuscule. Ainsi $y_t^g = \frac{Y_t^g}{N_t}$, $l_t^g = \frac{L_t^g}{N_t}$, etc.[13]. Le long d'un sentier de croissance équilibrée, les variables définies *per capita* atteignent alors un état stationnaire (puisque le taux de croissance de la variable par tête devient nul). Étant donné un vecteur de variables exogènes (taux de taxation, dépenses publiques, taux de change réel et taux d'intérêt), l'état stationnaire sera caractérisé par le vecteur de variables endogènes (notations minuscules surmontées d'une barre $x_t = x_{t+1} = \bar{x}$) qui sera solution du système suivant (systèmes 2.1 et 2.2) :

$$\frac{\bar{\tilde{c}}}{\bar{\tilde{c}} - \frac{\bar{h}^{1+\frac{1}{\sigma_L}}}{1+\frac{1}{\sigma_L}}} = \frac{1+r^*}{1+\rho} \tag{2.23}$$

$$\bar{\tilde{c}} = \left(\frac{\bar{w}(1-t^w)}{\bar{p^c}}\right)^{1+\sigma_L} \left[\frac{1+\rho+(2+\rho)\sigma_L}{(1+\sigma_L)(2+\rho)}\right] \tag{2.24}$$

$$\bar{s} = \left(\frac{\bar{w}(1-t^w)}{\bar{p^c}}\right)^{1+\sigma_L} \left[\frac{\bar{p^c}}{(2+\rho)(1+\sigma_L)}\right] \tag{2.25}$$

$$\bar{h} = \left(\frac{(1-t^w)\bar{w}}{\bar{p^c}}\right)^{\sigma_L} \tag{2.26}$$

$$\bar{p^c} = \left[\beta^{2-\frac{1}{\sigma_C}} \left(\bar{p^e}(1+t^{e,m})\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}} + (1-\beta)^{2-\frac{1}{\sigma_C}} \left(1+t^g\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}}\right]^{\frac{\sigma_C}{1-\sigma_C}} \tag{2.27}$$

$$\left(\frac{\bar{c^g}}{\bar{\tilde{c}}}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta)\frac{\bar{p^c}}{1+t^g} \tag{2.28}$$

$$\left(\frac{\bar{c^e}}{\bar{\tilde{c}}}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta\frac{\bar{p^c}}{\bar{p^e}(1+t^{e,m})} \tag{2.29}$$

$$\bar{p^c}\bar{\tilde{c}} = (1+t^g)\bar{c^g} + \bar{p^e}(1+t^{e,m})\bar{c^e} \tag{2.30}$$

$$\left(\frac{\bar{d^g}}{\bar{\tilde{d}}}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta)\frac{\bar{p^c}}{1+t^g} \tag{2.31}$$

$$\left(\frac{\bar{d^e}}{\bar{\tilde{d}}}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta\frac{\bar{p^c}}{\bar{p^e}(1+t^{e,m})} \tag{2.32}$$

$$\bar{p^c}\bar{\tilde{d}} = (1+t^g)\bar{d^g} + \bar{p^e}(1+t^{e,m})\bar{d^e} \tag{2.33}$$

$$\bar{y^g} = (\bar{l^g})^{\gamma_L}(\bar{k^g})^{\gamma_K}(\bar{e})^{\gamma_E} \tag{2.34}$$

$$\gamma_L\frac{\bar{y^g}}{\bar{l^g}} = \bar{w} \tag{2.35}$$

Système d'équations 2.1: Etat stationnaire (1/2)

13. Les variables concernant le comportement des individus (consommation, épargne, offre de travail) restent inchangées puisque ces variables étaient déjà dérivées de programmes de maximisation résolus au niveau individuel

$$\gamma_K \frac{\bar{y^g}}{k^g} = r^* + \delta \tag{2.36}$$
$$\gamma_E \frac{\bar{y^g}}{\bar{e}} = \bar{p^e}(1 + t^{e,e}) \tag{2.37}$$
$$\bar{y^e} = (\bar{l^e})^{\varepsilon_L} (\bar{k^e})^{\varepsilon_K} (\bar{z})^{\varepsilon_Z} \tag{2.38}$$
$$\varepsilon_L \frac{\bar{y^e}}{\bar{l^e}} = \frac{\bar{w}}{\bar{p^e}} \tag{2.39}$$
$$\varepsilon_K \frac{\bar{y^e}}{\bar{k^e}} = \frac{r^* + \delta}{\bar{p^e}} \tag{2.40}$$
$$\varepsilon_Z \frac{\bar{y^e}}{\bar{z}} = \frac{1 + t^z}{q\bar{p^e}} \tag{2.41}$$
$$(t^g \bar{c^g} + t^{e,m} \bar{p^e} \bar{c^e} + t^w \bar{w} \bar{h}) + \frac{t^c \bar{d^g} + t^{e,m} \bar{p^e} \bar{d^e}}{1+n} + \frac{t^z \bar{z}}{q} + t^{e,e} \bar{p^e} \bar{e} \tag{2.42}$$
$$= g + \bar{b} \frac{\bar{r} - n}{1+n}$$
$$\bar{l^g} + \bar{l^e} = \bar{h} \tag{2.43}$$
$$\bar{k} = \bar{k^g} + \bar{k^e} \tag{2.44}$$
$$\bar{s} = \bar{b} + (1+n)\bar{k} + \bar{f} \tag{2.45}$$
$$\bar{y^e} = \bar{e} + \bar{c^e} + \frac{\bar{d^e}}{1+n} \tag{2.46}$$

Système d'équations 2.2: Etat stationnaire (2/2)

Variables exogènes : $t^w, t^g, t^{e,m}, t^{e,e}, g, r^*, q$
variables endogènes : $\bar{\tilde{c}}, \bar{c^g}, \bar{c^e}, \bar{\tilde{d}}, \bar{d^g}, \bar{d^e}, \bar{h}, \bar{s}, \bar{p^c}, \bar{w}, \bar{y^g}, \bar{l^g}, \bar{k^g}, \bar{e}, \bar{y^e}, \bar{p^e}, \bar{l^e}, \bar{k^e}, \bar{z}, \bar{b}, \bar{k}, \bar{f}$

2.3.2 Système d'équations dynamiques

Lorsque des perturbations exogènes (modification des taxes, du taux d'intérêt, etc.) éloignent l'économie de son état stationnaire, la dynamique transitoire de retour vers un nouvel état stationnaire sera alors déterminée par le système suivant :

$$\frac{\widetilde{d}_{t+1}}{\widetilde{c}_t - \frac{h_t}{1+\frac{1}{\sigma_L}}} = \frac{p_t^c}{p_{t+1}^c}\frac{1+r_{t+1}}{1+\rho} \tag{2.47}$$

$$\widetilde{c}_t = \left(\frac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}\right)^{1+\sigma_L}\left[\frac{1+\rho+(2+\rho)\sigma_L}{(1+\sigma_L)(2+\rho)}\right] - \frac{1+\rho}{2+\rho}\frac{T_{t+1}}{1+r_{t+1}} \tag{2.48}$$

$$s_t = \left(\frac{w_t(1-t_t^w)}{p_t^c}\right)^{1+\sigma_L}\left[\frac{p_t^c}{(2+\rho)(1+\sigma_L)}\right] - p_t^c\frac{1+\rho}{2+\rho}\frac{T_{t+1}}{1+r_{t+1}} \tag{2.49}$$

$$h_t = \left(\frac{(1-t_t^w)w_t}{p_t^c}\right)^{\sigma_L} \tag{2.50}$$

$$p_t^c = \left[\beta^{2-\frac{1}{\sigma_C}}\left(p_t^e(1+t_t^{e,m})\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}} + (1-\beta)^{2-\frac{1}{\sigma_C}}\left(1+t_t^g\right)^{\frac{1-\sigma_C}{\sigma_C}}\right]^{\frac{\sigma_C}{1-\sigma_C}} \tag{2.51}$$

$$\left(\frac{c_t^g}{\widetilde{c}_t}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta)\frac{p_t^c}{1+t_t^g} \tag{2.52}$$

$$\left(\frac{c_t^e}{\widetilde{c}_t}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta\frac{p_t^c}{p_t^e(1+t_t^{e,m})} \tag{2.53}$$

$$p_t^c\widetilde{c}_t = (1+t_t^g)c_t^g + p_t^e(1+t_t^{e,m})c_t^e \tag{2.54}$$

$$\left(\frac{d_t^g}{\widetilde{d}_t}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = (1-\beta)\frac{p_t^c}{1+t_t^g} \tag{2.55}$$

$$\left(\frac{d_t^e}{\widetilde{d}_t}\right)^{\frac{1}{\sigma_C}} = \beta\frac{p_t^c}{p_t^e(1+t_t^{e,m})} \tag{2.56}$$

$$p_t^c\widetilde{d}_t = (1+t_t^g)d_t^g + p_t^e(1+t_t^{e,m})d_t^e \tag{2.57}$$

$$y_t^g = (l_t^g)^{\gamma_L}(k_t^g)^{\gamma_K}(e_t)^{\gamma_E} \tag{2.58}$$

$$\gamma_L\frac{y_t^g}{l_t^g} = w_t \tag{2.59}$$

$$\gamma_K\frac{y_t^g}{k_t^g} = Ck_t = r_t + \delta \tag{2.60}$$

$$\gamma_E\frac{y_t^g}{e_t} = p_t^e(1+t_t^{e,e}) \tag{2.61}$$

$$y_t^e = (l_t^e)^{\varepsilon_L}(k_t^e)^{\varepsilon_K}(z_t)^{\varepsilon_Z} \tag{2.62}$$

$$\varepsilon_L\frac{y_t^e}{l_t^e} = \frac{w_t}{p_t^e} \tag{2.63}$$

$$\varepsilon_K\frac{y_t^e}{k_t^e} = \frac{r_t+\delta}{p_t^e} \tag{2.64}$$

$$\varepsilon_Z\frac{y_t^e}{z_t} = \frac{1+t_t^z}{q_t p_t^e} \tag{2.65}$$

$$b_t + (t_t^g c_t^g + t_t^{e,m}p_t^e c_t^e + t_t^w w_t h_t) + \frac{t_t^c d_t^g + t_t^{e,m}p_t^e d_t^e + T_t}{1+n} + \frac{t_t^z Z_t}{q_t} + t_t^{e,e}p_t^e e_t \tag{2.66}$$
$$= g_t + (1+r_t)b_{t-1}$$

$$l_t^g + l_t^e = h_t \tag{2.67}$$

$$k_t = k_t^g + k_t^e \tag{2.68}$$

$$s_t = b_t + (1+n)k_{t+1} + f_t \tag{2.69}$$

$$y_t^e = e_t + c_t^e + \frac{d_t^e}{1+n} \tag{2.70}$$

$$\tag{2.71}$$

Système d'équations 2.3: Système d'equations dynamique

Trajectoire de la pollution. L'évolution dynamique de la pollution n'est pas explicitée dans les systèmes précédents, car cette variable n'intervient pas dans la détermination de l'équilibre de l'économie. En revanche, son évolution est impactée par les trajectoires de différentes variables telles que la consommation d'énergie finale des ménages et des entreprises, et la variation du niveau de pollution induit des effets de bien-être sur les agents. La croissance du stock pollution est tirée par la croissance de la consommation d'énergie (égale au taux de croissance de la population), comme précisé à la section précédente. Ainsi, l'utilité des ménages décroîtra automatiquement avec le temps : sans intervention de dépollution, l'augmentation tendancielle de la consommation d'énergie se traduit par une augmentation tendancielle de la pollution [14]. Le bien-être environnemental des générations futures sera donc systématiquement inférieur à celui des générations actuelles, quelle que soit la réforme fiscale. En revanche, la réforme fiscale environnementale influera sur le niveau de ce bien-être à une date fixée (cf. annexe).

2.3.3 Calibrage

Les différents paramètres et variables exogènes ont été calibrés de manière à retrouver les grands agrégats macro-financiers mesurés dans la comptabilité nationale française, ainsi que quelques faits stylisés. Nous détaillons dans cette partie nos choix de calibration pour la maquette, ainsi que la sensibilité des résultats attendus à ces choix.

Paramètres

Parmi les paramètres à calibrer, la plupart des valeurs choisies proviennent de données comptables nationales (INSEE) ou d'estimations déjà réalisées dans la littérature (par exemple modèle MESANGE). Les paramètres plus délicats à calibrer seront ajustés de façon à ce que la maquette reproduise les grands faits stylisés présentés dans la sous-section suivante. Le pas de temps du modèle (durée réelle d'une période) est fixé à 30 ans.

Taux de croissance démographique. Le taux de croissance moyen de la population active est d'environ 0.6% par an (INSEE, données 1968 à 2009). Ainsi, sur une période du modèle, le taux de croissance démographique s'élèvera à $n = (1 + 0.006)^{30} - 1 = 0.20$

Élasticités des fonctions de production. En France, la part de l'énergie dans la valeur ajoutée du secteur non-énergétique est estimée à 4%, et à 20% dans le secteur énergétique. Nous retiendrons donc comme valeurs des élasticités de substitution concernant l'énergie : $\gamma_E = 0.05$ et $\varepsilon_Z = 0.2$. Ensuite, il nous faut vérifier $\gamma_L + \gamma_K = 0.95$ et $\varepsilon_K + \varepsilon_L = 0.8$. Dans la littérature s'appuyant sur des fonctions de production Cobb-Douglas à deux facteurs, les parts respectives du capital et du travail dans la valeur ajoutée sont en moyenne de 40% et 60% en France. Ainsi, nous respecterons ces quotas en choisissant :$\gamma_K = 0.95 \times 40\%$; $\gamma_L = 0.95 \times 60\%$; $\varepsilon_K = 0.80 \times 40\%$ et $\varepsilon_L = 0.80 \times 60\%$.

Élasticité de l'offre de travail non compensée au salaire. Ce paramètre est dans les faits assez délicat à mesurer : les élasticités microéconomiques de ce paramètre sont assez faibles, en revanche le passage à l'échelle macroéconomique tend à augmenter les valeurs

14. La qualité de l'air (ou au contraire la pollution ici) est en réalité un bien public non-exclusif : définir un stock de pollution par tête n'a pas vraiment de sens et nous ne pouvons pas dans ce cas nous appuyer sur une valeur stationnaire de la pollution.

de ce paramètre. Nous nous appuierons donc sur la méta-analyse réalisée par Chetty *et. al.* (2011, [11]) et nous retiendrons une valeur de 0,51 pour cette élasticité.

Élasticité de la fonction CES de répartition de la consommation totale des ménages. La valeur retenue s'appuie sur la spécification du modèle français MESANGE (DGTPE) : $\sigma_C = 0.4$.

Part de la consommation d'énergie dans le panier de consommation totale. D'après les données INSEE (comptes nationaux 2007), la part des biens énergétiques dans la consommation totale des ménages s'élève à 7%, d'où $\beta = 0.07$.

Taux de préférence pour le présent. La valeur traditionnellement retenue pour ce paramètre dans les modèles est comprise entre 0.01 ou 0.05 par an, nous retiendrons une valeur annuelle de 1%. Le taux de préférence pour le présent utilisé dans le modèle sera choisi égal à $\rho = (1 + 0.01)^{30} - 1 = 0.35$

Taux de dépréciation du capital. D'après une étude de Askenazy parue dans Economie et Statistique (INSEE, (2006, [1])), le taux de dépréciation annuel du capital, évalué en moyenne sur une dizaine de secteurs, varie entre 7 et 12% selon les secteurs. Nous choisissons alors un taux de dépréciation annuel de 10%. Le taux de dépréciation du modèle vaudra alors $\delta = 1 - (1 - 0.1)^{30} = 0.96$.

Taux d'absorption naturelle de la pollution et émissions de Gaz à Effet de Serre. Pareillement au choix de spécification de cette variable, nous nous référons à Howarth et Norgaard (1992, [23]) pour le calibrage des différents paramètres. Le taux d'absorption naturelle de la pollution m est fixé à 10%, et nous considérons que le coefficient d'émissions associé à la consommation d'énergie finale est égal à 90%, soit $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0,9$.

Variables exogènes et faits stylisés

Taux d'intérêt et ratio capital-PIB. On estime que le ratio annuel du stock de capital rapporté au PIB est d'environ 3 en France [15]. En tenant compte de la distinction stock(capital)/flux(PIB), ce ratio doit être adapté au pas de temps du modèle et devra s'ajuster donc à $\frac{\bar{k}}{\bar{y} \times 25} = \frac{3}{25} = 0.12$. Sachant que le taux d'intérêt annuel oscille autour de 4% dans les faits, nous choisissons une valeur annuelle de 4.7% de façon à respecter l'objectif du ratio capital-PIB évoqué précédemment. Nous retiendrons alors comme taux d'intérêt mondial (et donc domestique) pour une période du modèle : $\bar{r} = (1 + 0.047)^{30} - 1 = 2.96$.

Taux de change réel. Dans une perspective d'état stationnaire de long terme, nous supposons que la loi du prix unique s'applique à notre modèle. Ainsi, $\bar{q} = 1$.

Part de la masse salariale dans le PIB. La part des salaires dans le PIB reste stable autour de 60% en France. Nous nous assurons donc que la maquette résolue à l'état stationnaire respecte ce ratio, à savoir que : $\frac{\bar{w}\bar{h}}{\bar{y}} = 0.60$.

15. D'après Backus *et. al.* (2008, [?]), le ratio capital sur PIB valait 3.1 en 2005 en France.

Taux de taxation. Selon les données publiées par Eurostat (2010), le taux de taxation implicite sur la consommation en France était de 19.1% en 2008. Le taux de taxation implicite du travail y est également estimé à 41.4%.
Dans notre modèle, nous retenons cet ordre de grandeur pour les charges sur le travail : $t^W = 40\%$. Le taux de taxation sur le bien non-énergétique (que nous appelons TVA) s'établit lui à $t^g = 19.6\%$. Dans un premier temps, la taxe sur les importations d'énergie fossile est considérée nulle car peu pertinente pour les premières études. Enfin, concernant la taxe pesant sur le facteur énergie, la démarche de calibrage s'avère plus délicate. En effet, les instruments fiscaux pesant sur les énergies sont en général des accises, plutôt que des taxes. Il nous faudrait alors calculer le taux de taxation implicite s'appliquant pour chaque type d'énergie et ces calculs font apparaître une très grande disparité des taux de taxation selon le type d'énergie ciblée. Nous retiendrons plutôt que les recettes fiscales énergétiques représentent en France environ 2.5% des recettes publiques, conformément à l'estimation réalisée par l'ADEME sur la fiscalité comparée de l'énergie et du CO2 en Europe (2009). Ainsi, le taux de taxation retenu est, pour le compte central, $t^{e,e} = t^{e,m} = 10\%$.

Ratio dette-PIB. La problématique de cette thèse en elle-même suppose que notre économie soit représentée dans un contexte de dette publique élevée. Sans pour autant adopter de parti pris trop fort sur la situation budgétaire initiale, nous nous placerons dans le cas limite où le ratio dette sur PIB est supérieur à la valeur seuil du critère de Maastricht, comparable aux niveaux observés en France en 2011 soit 94%. Un calcul similaire à la manipulation précédente (stock versus flux) nous permet de retenir comme ratio de calibration : $\frac{\bar{b}}{\bar{y}\times 25} = \frac{0.94}{25} = 0.037$. Compte tenu des différents taux de taxe fixés précédemment, ce sont les dépenses publiques par tête qui sont ajustées pour que la dette publique respecte ce ratio. Une fois le niveau de dépenses publiques ajusté, cette variable ne sera affectée dans aucune des variantes que nous réaliserons, de façon à ne pas induire des effets de richesse qui biaiseraient nos résultats.

Il convient de préciser qu'une hausse des prélèvements obligatoires (à hauteur d'un point de PIB *ex ante*) a préalablement été simulée à l'aide de notre modèle calibré. Pour une telle mesure, le PIB diminuerait à long terme de 1.33% par rapport à l'état initial de l'économie. Ce résultat se rapproche des prédictions obtenues à l'aide du modèle MESANGE (-1.4% de PIB), ce qui nous conforte dans l'idée que nos choix de calibration sont plausibles.

2.4 Analyse positive des taxes

Le modèle décrit précédemment nous permet de réaliser des variantes consistant à modifier marginalement le vecteur de taxes initial. En partant d'un état stationnaire initial, la modification d'un taux de taxation oriente la trajectoire de l'économie, qui convergera vers un nouvel état stationnaire. Notre cadre analytique nous permet d'identifier et d'expliciter les effets de premier ordre qui interviennent entre deux états stationnaires, alors que la mise en ?uvre de simulations propose une contrepartie chiffrée à cette étude de statique comparative. Nous montrerons en particulier que nous retrouvons les conditions évoquées par Goulder [16] (1995, [18]) quant à l'impact d'une modification des taxes sur l'offre de travail et *in fine* sur l'occurrence d'un double-dividende. Pour le moment, nous laisserons de côté l'étude de la taxe sur les énergies fossiles puisque notre instrument fiscal à vocation environnementale est représenté par la taxe sur l'énergie finale.

16. Se référer au chapitre 2 p.24

2.4.1 Le salaire net réel : une variable centrale pour l'impact d'une réforme fiscale

Les effets distorsifs du système fiscal se traduisent essentiellement au travers de l'ajustement de l'offre de travail des ménages. Si une hausse de la fiscalité induit une baisse du salaire net réel d'un individu (via une augmentation des prélèvements sur le salaire ou des prix TTC des biens de consommation), deux effets s'opposent :

Effet revenu : l'individu est incité à travailler plus pour compenser sa perte de pouvoir d'achat.

Effet de substitution : la perte de valeur monétaire (en termes de pouvoir d'achat) associée à une unité de travail, alors que ce travail coûte à l'individu en termes de bien-être, l'incite à moins travailler.

Dans les faits, les pertes sèches liées à l'imposition viennent du fait que l'effet de substitution prend le pas sur l'effet revenu donc l'offre de travail globale diminue, affectant l'économie côté offre. En effet, dans un cadre sans existence de chômage involontaire, la diminution de l'emploi se traduit par une contraction de la production. Cet effet récessif peut être contrebalancé par une substitution importante des autres facteurs de production au travail. Cependant, la diminution des revenus des ménages affecte négativement les comportements de consommation et d'épargne (donc le stock de capital productif). C'est donc une contraction de l'activité qui devrait suivre une hausse de la fiscalité.

La variation du salaire net réel fournit donc une bonne intuition de l'effet que les modifications des taxes auront sur l'économie. Le taux de variation du salaire réel net (noté RDN) s'écrit :

$$\Delta(RDN) = \Delta(w) - \Delta(t^w)\frac{t^{\bar{w}}}{1-t^{\bar{w}}} - \Delta(p^c) \tag{2.72}$$

où w dénote le salaire horaire brut (versé par l'entreprise), t^w les cotisations sociales salariales et p^c le prix à la consommation. Le taux de variation (en logarithme) de la variable X entre deux états stationnaires (statique comparative) est dénommée par $\Delta(X)$, alors que les variables surmontées d'une barre ($\bar{X}$) font référence à leurs valeurs stationnaires initiales.

Comme précisé dans la résolution du modèle (section 3.3.1), le salaire horaire brut est entièrement déterminé par les prix TTC des inputs des facteurs de production (énergie et capital). En termes d'impact fiscal, seule une variation de la taxe sur l'énergie finale (côté entreprises) $t^{e,e}$ impactera ce salaire brut :

$$\frac{\Delta(w)}{w} = \frac{\gamma_E}{-\gamma_L - \gamma_E \varepsilon_L} \times \frac{t^{\bar{e},e}}{1+t^{\bar{e},e}} \times \frac{\Delta(t^{e,e})}{t^{e,e}} \tag{2.73}$$

où γ_L et γ_E représentent les élasticités de substitution de la fonction de production du bien non-énergétique vis-à-vis respectivement du travail et de l'énergie finale, alors que ε_L fait référence à l'élasticité de la fonction de production du secteur énergétique vis-à-vis du travail.

Le prix à la consommation p^c sera quant à lui affecté par la variation des taxes sur les deux biens de consommation t^g et $t^{e,m}$, à laquelle se combine la variation du prix de l'énergie finale p^e (frontière des prix de production) donc par $t^{e,e}$:

$$\frac{\Delta(p^c)}{p^c} = \frac{\left[fct_+(\overline{t^{e,e}}, \overline{t^g}, \overline{t^{e,m}})\frac{\Delta t^{e,e}}{t^{e,e}} + fct_-(\overline{t^{e,e}}, \overline{t^g}, \overline{t^{e,m}})\frac{\Delta t^{e,m}}{t^{e,m}} + fct_-(\overline{t^{e,e}}, \overline{t^g}, \overline{t^{e,m}})\frac{\Delta t^g}{t^g}\right]}{fct_-(\overline{t^{e,e}}, \overline{t^g}, \overline{t^{e,m}})} \tag{2.74}$$

où fct_+ [fct_-] désigne une fonction positive [négative] dépendant des paramètres structurels de l'économie et des variables exogènes dénotées entre parenthèses. Ainsi, le prix à la consommation sera impacté positivement par une augmentation des taxes sur les biens de consommation mais négativement par une hausse de la taxe sur l'énergie finale en tant que facteur de production. Cette taxe a en effet un impact négatif sur le prix à la production de l'énergie finale comme nous le verrons plus tard.

2.4.2 Analyse positive des différentes taxes : variantes chiffrées

Nous réalisons des simulations successives de hausses des différentes taxes (TVA, cotisations sociales, taxes carbones) à hauteur d'un point de PIB *ex ante*[17]. Les dépenses publiques restent inchangées, ainsi la variation des recettes fiscales sera seule déterminante pour le nouvel état de long terme de la dette publique. Les résultats des variantes réalisées sont répertoriés dans les tableaux 16 et 2.2.

Hausse de la taxation des revenus du travail t^w : un taux de taxation passant de 40% à 41.7% (cf. tableau 16). Une hausse des cotisations salariales se répercute directement pour les ménages par une perte de leur salaire *net* réel : ni le salaire brut ni le prix à la consommation ne sont affectés mais une plus grande partie des revenus du travail est ponctionnée par l'Etat. En effet, le salaire brut est déterminé par la frontière des prix (cf. eq (2.21))et ne dépend donc que de variables exogènes inchangées (taux d'intérêt, prix TTC de l'énergie fossile, taxe sur l'énergie finale). L'effet de substitution généré par la baisse de pouvoir d'achat prend le pas sur l'effet richesse, l'offre de travail proposée par les ménages se voit réduite (-1.4% par rapport à l'état initial). Sans existence de chômage involontaire, cet effet se traduit par une baisse de l'emploi dans les deux secteurs de production. De plus, les ménages ajustent leurs comportements à cette perte de pouvoir d'achat : la consommation totale diminue (-4.2% par rapport à l'état initial) de façon quasi uniforme entre les deux biens (pas de variation des prix relatifs des biens). Parallèlement, l'épargne domestique se contracte (-4.2%). La baisse de l'offre de travail, de capital productif et de demande de biens se traduit par une récession des deux secteurs de production : le secteur énergétique étant relativement plus affecté (-2.5%) que le secteur du bien domestique non-énergétique (-1.5%). Cette récession se mesure au travers de la diminution du PIB (-1.4%). En revanche, le niveau de recettes fiscales a augmenté *in fine* : l'effet négatif sur les recettes lié à la contraction de l'assiette est inférieur à l'effet positif généré par la hausse du taux de taxe (pas d'effet de Laffer). Enfin, l'absorption domestique du bien non-énergétique ayant diminué (baisse de la demande), les exportations se trouvent stimulées et la balance commerciale se trouve à long terme améliorée par rapport à la situation de référence.

Hausse de la TVA t^g : un taux de taxation passant de 19.6% à 22.4% (cf tableau 16). Une hausse de la TVA affecte le salaire net réel au travers de la hausse du prix à la

17. Cette procédure est réalisée pour chaque taxe, exception faite des taxes énergétiques : leur assiette étant très restreinte comparativement aux autres instruments fiscaux, une telle variante reviendrait à augmenter les taux de taxations de 20 points, soit un triplement du taux initial. Pour cette raison, nous simulerons des hausses de ces taxes à hauteur de 0.1 point de PIB.

Réforme fiscale portant sur	Revenus du travail	TVA	Tous PO
Les taux de taxation			
Taux de taxation des revenus du travail	**41.7%**	40%	**41.2%**
Taux de TVA	19.6	**22.4%**	**20.2%**
Taux de taxe énergétique "ménage"	10%	10%	**10.3%**
Taux de taxe énergétique "entreprise"	10%	10%	**10.3%**
Taux de taxation sur l'énergie fossile	0%	0%	0%
Impact de long terme en % de variation sur les...			
Prix			
Salaire horaire	0	0	-0.02
Prix énergie finale	0	0	-0.01
Prix à la consommation	0	1.69	0.45
Résultats macroéconomiques			
PIB	*-1.43*	*-0.85*	*-1.33*
Heures travaillées	-1.43	-0.85	-1.32
Stock de capital	-1.43	-0.85	-1.35
Epargne domestique	-4.18	-0.85	-3.43
Consommation totale (jeunes et vieux)			
Recettes fiscales	1.06	1.81	1.18
Dette publique	4.64	7.88	5.15
Balance commerciale	1.37	1.12	1.27
Dette extérieure	8.86	4.99	7.72
Résultats individuels			
Consommation totale jeunes	*-4.18*	*-2.49*	*-3.86*
Consommation énergie finale jeunes	-4.18	-1.84	-3.8
Consommation bien numéraire jeunes	-4.18	-2.76	-3.89
Consommation totale vieux	*-4.18*	*-2.49*	*-3.86*
Consommation énergie finale vieux	-4.18	-1.84	-3.8
Consommation bien numéraire vieux	-4.18	-2.76	-3.89
Résultats sectoriels			
Production bien numéraire	*-1.36*	*-0.82*	*-1.27*
Emploi secteur non-énergétique	-1.36	-0.82	-1.25
Capital secteur non-énergétique	-1.36	-0.82	-1.27
Demande énergie finale secteur non-énergétique	-1.36	-0.82	-1.54
Production énergie finale	*-2.54*	*-1.24*	*-2.48*
Emploi secteur énergétique	-2.53	-1.25	-2.47
Capital secteur énergétique	-2.53	-1.24	-2.49
Demande énergie fossile secteur énergétique	-2.53	-1.24	-2.49

TABLE 2.1 – Impact d'une hausse des taxes (en pourcentage de variation par rapport au compte de référence)

consommation (+1.7%). Les effets évoqués précédemment, à savoir la baisse de l'offre de travail (-0.85%) ainsi que la diminution de la consommation totale (-2.5%) se retrouvent à nouveau dans ce cas. En revanche la modification du prix TTC d'un bien distort le panier de consommation : les ménages réduisent leur consommation totale, sans que cette contraction ne se répercute uniformément sur les deux biens. En effet, ils opèrent une substitution de leur consommation de bien non-énergétique (-2.8%) au profit de l'énergie finale (-1.8%), devenue relativement moins chère. Cette substitution explique en particulier que le secteur énergétique soit relativement moins affecté que dans le cas précédent : l'écart se resserre entre la perte d'activité du secteur productif du bien non-énergétique (-0.8%) et le secteur producteur d'énergie finale (-1.2%). L'effet total sur l'activité est relativement inférieur à l'impact mesuré dans le cas d'une hausse des charges sur le travail (-0.9% ici contre -1.4% précédemment). Dans cette réforme, on observe également une augmentation des recettes fiscales (pas d'effet de Laffer).

Hausse la taxe sur l'énergie fossile t^z : un taux de taxation initialement nul qui s'élève alors à 6.5% (cf tableau 2.2). Une augmentation, ou plus précisément dans notre cas, l'instauration d'une taxe sur l'énergie fossile est l'instrument qui se rapproche le plus de la taxe "carbone" évoquée dans les discussions pratiques de politiques climatiques [18]. Nous retrouvons alors dans cette variante les effets classiques associés à la fiscalité carbone et pour le cas français dans le cadre des commissions Rocard et Quinet à l'aide de modèles d'Equilibre Général (IMACLIM-R (CIRED) et GEMINI-E3). La hausse des coûts de production pour le secteur énergétique se répercute sur le prix de l'énergie finale (+1.22%), puisque la substitution de l'emploi et du capital n'est pas suffisante pour compenser la baisse de demande en énergie fossile (-6.6%). La hausse du prix de l'énergie finale se traduit alors comme une augmentation du prix d'un input de production pour le second secteur de production : celui-ci réduit sa demande en énergie finale (-1.5%) mais la substitution d'autres facteurs de production n'est pas suffisante pour empêcher la contraction de la production de ce secteur (-0.35%). La baisse de demande de travail pousse le salaire brut à la baisse (-0.11), qui, associé à l'augmentation du prix à la consommation générée par la hausse du prix de l'énergie induit une perte de pouvoir d'achat. L'offre de travail diminue (-0.23%) ainsi que la consommation totale (-0.69%), bien que la consommation de bien non-énergétique (-0.55%) soit en partie substituée à l'énergie (-1.04%), devenue relativement plus chère. En revanche, il est utile de noter que cette réforme fiscale illustre l'effet dit de "Laffer" [19] : la contraction de l'assiette de la taxe énergétique prend le pas sur la hausse du taux de taxation ce qui mène *in fine* à des recettes fiscales inférieures à la situation initiale (qui correspondait pourtant à un niveau de taxe moins important). Ceci explique que le niveau de dette publique soutenable à long terme soit inférieur au niveau de référence.

Hausse de la taxe sur l'énergie finale consommée par les ménages $t^{e,m}$: un taux de taxation passant de 10% à 14.3% (cf tableau 2.2). De façon analogue à la hausse de la TVA, la hausse de cette taxe énergétique impacte le pouvoir d'achat des ménages au travers de la hausse du prix TTC de l'énergie finale qui se répercute sur le prix à la consommation (+1.1%). Par un effet de substitution qui prédomine, l'offre de travail est impactée à la baisse (-0.6%). Parallèlement, la consommation totale des ménages diminue

18. Bien que le projet ait finalement été abandonné, il fut par exemple question en France d'instaurer une taxe carbone appelée "Contribution Climat Énergie", assise sur le contenu CO2 de chaque énergie fossile.

19. cf. chapitre 1.

Réforme fiscale portant sur	t^z	$t^{e,m}$	$t^{e,e}$
Les taux de taxation			
Taux de taxation des revenus du travail	40%	40%	40%
Taux de TVA	19.6	19.6	19.6
Taux de taxe énergétique "ménage"	10%	**14.3%**	10%
Taux de taxe énergétique "entreprise"	10%	10%	**12.2%**
Taux de taxation sur l'énergie fossile	**6.5%**	0%	0%
Impact de long terme en % de variation sur les...			
Prix			
Salaire horaire	-0.11	0	-0.17
Prix énergie finale	1.22	0	-0.08
Prix à la consommation	0.35	1.14	-0.02
Résultats macroéconomiques (*per capita*)			
PIB	*-0.25*	*-0.57*	*-0.15*
Heures travaillées	-0.23	-0.57	-0.07
Stock de capital	-0.34	-0.57	-0.24
Epargne domestique	-0.34	-0.57	-0.24
Dette publique	-0.37	-1.39	0.18
Recettes fiscales	-0.38	-0.32	0.04
Balance commerciale	-0.07	0.08	-0.14
Avoirs extérieurs	-0.36	-1.12	0.04
Résultats individuels			
Consommation totale jeunes	*-0.69*	*-1.69*	*-0.22*
Consommation énergie finale jeunes	-1.04	-2.76	-0.2
Consommation bien numéraire jeunes	-0.55	-1.25	-0.23
Consommation totale vieux	*-0.69*	*-1.69*	*-0.22*
Consommation énergie finale vieux	-1.04	-2.76	-0.2
Consommation bien numéraire vieux	-0.55	-1.25	-0.23
Résultats sectoriels			
Production bien numéraire	*-0.35*	*-0.52*	-0.17
Emploi secteur non-énergétique	-0.25	-0.52	-1.22
Capital secteur non-énergétique	-0.35	-0.52	-0.17
Demande énergie finale secteur non-énergétique	-1.56	-0.52	-2.08
Production énergie finale	*-1.34*	*-1.45*	*-1.3*
Emploi secteur énergétique	-0.04	-1.46	-1.22
Capital secteur énergétique	-0.13	-1.45	-1.38
Demande énergie fossile secteur énergétique	-6.27	-1.45	-1.38

TABLE 2.2 – Impact d'une hausse des taxes "énergétiques" (en pourcentage de variation par rapport au compte de référence)

(-1.7%), avec une baisse nettement plus prononcée de la consommation d'énergie (-2.8%) relativement au bien non-énergétique (-1.3%). Cette disparité de la demande de biens se retrouve dans les variations observées dans les secteurs productifs : la production du bien non-énergétique (-0.5%) se contracte relativement moins que dans le secteur énergétique (-1.5%). En revanche, il est utile de noter que les ordres de grandeur, quant aux variations des variables économiques, sont assez comparables aux résultats précédemment obtenus avec une hausse de la TVA, alors que l'ampleur des réformes n'est pas la même (variation de la taxe carbone à hauteur de 0.1 point de PIB seulement). Typiquement, la récession en termes d'activité se traduit par une diminution de près de 0.6% du PIB soit presque 6 fois l'amplitude de la variation des recettes fiscales. Une augmentation de l'imposition sur l'énergie finale en tant que bien de consommation a donc un impact respectivement plus important qu'une hausse de la TVA. Ceci est en partie dû au fait que le prix hors taxe de l'énergie, qui ne varie pas d'un état stationnaire à l'autre puisqu'il est fixé par le prix de inputs de production, est par défaut supérieur de presque 50% au prix du bien non-énergétique (numéraire). Une augmentation du taux d'imposition représente donc une variation relativement plus importante du prix TTC de l'énergie, qui se répercute sur le salaire net réel des ménages. De même que dans le cas précédent, la hausse du taux de taxation sur l'énergie finale mène pourtant à des recettes fiscales inférieures au niveau initial, à cause de la contraction de l'activité.

Hausse de la taxe sur l'énergie finale consommée par les entreprises $t^{e,e}$: un taux de taxation passant de 10% à 12.2% (cf. tableau 2.2) L'augmentation du prix d'input de production (ici l'énergie finale) entraîne par un effet revenu une contraction de la production du bien non-énergétique (-0.2%). On observe en particulier dans ce secteur une demande en énergie finale qui diminue nettement (-2%) alors que les demandes de travail et de capital sont relativement moins affectées (respectivement 0% et -0.2%) car en partie substituées à l'énergie. En revanche, la baisse d'activité du secteur énergétique (-1.3%), provoquée par la baisse de la demande en énergie finale, impacte à la baisse la demande de travail ce qui se traduit par une diminution du salaire brut (-0.2 %). Le prix de l'énergie finale à la production découlant de la frontière des prix de production diminue également (-0.08%). Plusieurs effets s'opposent alors : une diminution du salaire brut qui pousse à la baisse le salaire net alors que la baisse du prix de l'énergie finale pousse également le prix à la consommation à la baisse (-0.02%). L'impact de la taxe dépend alors de la prédominance d'un de ces deux effets (salaire ou prix à la consommation) sur l'autre. Par le calibrage choisi, c'est la baisse du salaire qui prédomine dans nos résultats, ce qui se traduit par une diminution du salaire net réel. Nous retrouvons alors les effets standards générés par la baisse de l'offre de travail, à savoir une diminution de la consommation (-0.2%), et une contraction du PIB (-0.15%). Il est intéressant de noter que dans le cas d'une hausse de la taxe carbone "entreprise", l'impact en termes d'activité économique est inégalement réparti entre les secteurs de production : le secteur énergétique est fortement pénalisé par une telle réforme.

L'étude précédente de chacun des instruments fiscaux nous a permis d'identifier les canaux de transmission à l' ?uvre et les impacts de tel ou tel instrument sur les grands agrégats économiques. Nous nous intéressons maintenant à différents scénarios de réforme fiscale environnementale que nous pourrons hiérarchiser selon différents critères relatifs soit aux effets d'efficacité ou d'équité générés. Ceci nous permettra également d'identifier sous quelles conditions (paramètres structurels mais aussi choix des instruments fiscaux utilisés) un dividende en PIB pourrait se dégager.

2.5 Un dividende en PIB : une occurrence éventuelle au détriment du secteur énergétique

Chaque type de taxe affecte l'économie au travers de la variation induite du salaire net réel bien évidemment, mais qui se décline selon des canaux de transmission bien spécifiques à chaque instrument, décrits précédemment. Nous nous intéressons dorénavant à l'étude de réformes fiscales plus élaborées : deux taux d'imposition seront modifiés conjointement de façon à respecter l'équilibre budgétaire *ex ante*. A titre d'exemple, une première réforme dite de TVA sociale a été réalisée : les cotisations sociales sont réduites à hauteur d'un point de PIB, alors qu'en contrepartie la TVA est augmentée de façon à assurer l'équilibre budgétaire *ex ante*. Ce type de réforme illustre une idée défendue par de nombreux économistes[20], à savoir qu'il serait préférable en termes d'efficacité économique de financer le budget de l'État à l'aide d'une fiscalité indirecte plutôt que directe. Dans notre cas, les prédictions du modèle confortent cet argument puisqu'une telle réforme pourrait améliorer le PIB à hauteur de 0.55% par rapport au compte de référence.

2.5.1 Scénarios de réformes fiscales environnementales et l'apparition d'un dividende en PIB

Dans le cadre de notre problématique, nous nous attachons particulièrement à l'évaluation d'une réforme fiscale environnementale spécifique ; à savoir une baisse des cotisations sociales financée par une augmentation d'une taxe énergétique. Si la version traditionnelle d'une taxe "carbone" repose sur la taxation de l'énergie fossile (t^z pour nous), dans le modèle retenu ici, ce sont les deux taxes assises sur l'énergie finale qui sont assimilables à des taxes environnementales *stricto sensu* car pesant sur les activités émettrices (donc générant une externalité négative). Nous considérons tout de même le cas d'une réforme reposant sur la taxation de l'énergie fossile, dénommée abusivement réforme fiscale environnementale (ETR), ce qui nous permet d'établir une comparaison avec les études traditionnelles de politiques climatiques. Le tableau suivant reprend les principaux impacts de long terme des trois réformes évoquées précédemment, à savoir une diminution des prélèvements sur les revenus du travail à hauteur de point de PIB compensée *ex ante* par une augmentation soit de la taxe sur l'énergie fossile (ETR1), soit de la taxe sur l'énergie finale pour les ménages (ETR2) soit de la taxe sur l'énergie finale demandée par les entreprises (ETR3).

Les analyses positives de chaque taxe effectuées précédemment laisse toutefois présager un résultat : il semble *a priori* très difficile de générer un dividende au sens de l'efficacité économique (amélioration du PIB) si ce sont les prélèvements sur l'énergie fossile ou l'énergie finale consommée par les ménages qui sont augmentés. En effet, compte tenu de la sensibilité des résultats précédents aux taux de ces taxes, l'apparition d'un dividende économique supposerait une diminution substantielle des cotisations sociales pour contrebalancer la baisse du salaire net réel provoquée par la hausse du prix à la consommation.

Un impact différencié sur le salaire réel. Les trois réformes étudiées ont un impact différencié sur le salaire net réel bien que les canaux de transmission de chaque instrument sur la formation des prix soient différents : la taxe énergétique "ménages" agit directement et substantiellement sur le prix à la consommation (+8.02%) qui se répercute en une perte de pouvoir d'achat des ménages. En revanche, comme expliqué dans la section précédente, une augmentation de la taxe sur l'énergie fossile et sur l'énergie finale "entreprise" induisent des distorsions des prix au travers des réallocations des facteurs de production entre les

20. Gauthier (2009, [16]), FMI

Réduction des cotisations sociales à hauteur de 1 point de PIB compensée *ex ante* par une augmentation de ...				
	t^g (TVA sociale)	t^z (ETR1)	$t^{e,m}$ (ETR 2)	$t^{e,e}$ (ETR 3)
Les taux de taxation				
Taux de taxation des revenus du travail	**38.3%**	**38.3%**	**38.3%**	**38.3%**
Taux de TVA	**22.4%**	19.6%	19.6%	19.6%
Taux de taxe énergétique "ménage"	10%	10%	**41.6%**	10%
Taux de taxe énergétique "entreprise"	10%	10%	10%	**32.4%**
Taux de taxation sur l'énergie fossile	0%	**65.4%**	0%	0%
Impact de long terme en % de variation sur les...				
Prix				
Salaire horaire	0	-0.84	0	-1.55
Prix énergie finale	0	10.15	0	-0.75
Prix à la consommation	1.69	2.90	8.02	-0.22
Résultats macroéconomiques (*per capita*)				
PIB	*0.55*	*-0.71*	*-2.5*	*-0.08*
Heures travaillées	0.55	-0.49	-2.5	0.72
Stock de capital	0.55	-1.33	-2.5	-0.84
Epargne domestique	3.36	1.43	0.22	1.93
Recettes fiscales	0.77	-2.23	-3.89	-0.93
Dette publique	3.38	-9.68	-1.39	-4.03
Balance commerciale	-0.28	-2.49	-0.99	-2.99
Dette extérieure	-3.92	-13.15	-16.77	-9.25
Résultats individuels				
Consommation totale jeunes	*1.64*	*-1.43*	*-7.23*	*2.15*
Consommation énergie finale jeunes	2.33	-4.08	-13.5	2.37
Consommation bien numéraire jeunes	1.37	-0.30	-4.32	2.06
Consommation totale vieux	*1.64*	*-1.43*	*-7.23*	*2.15*
Consommation énergie finale vieux	2.33	-4.08	-13.5	2.37
Consommation bien numéraire vieux	1.37	-0.30	-4.32	2.06
Résultats sectoriels				
Production bien numéraire	*0.51*	*-1.51*	*-2.21*	*-0.28*
Emploi secteur non-énergétique	0.51	-0.67	-2.21	1.29
Capital secteur non-énergétique	0.51	-1.51	-2.21	-0.28
Demande énergie finale secteur non-énergétique	0.51	-10.58	-2.21	-16.51
Production énergie finale	*1.26*	*-7.89*	*-6.89*	*-8.68*
Emploi secteur énergétique	1.25	2.32	-7.94	-7.94
Capital secteur énergétique	1.26	1.46	-6.89	-9.36
Demande énergie fossile secteur énergétique	1.26	-38.68	-6.9	-9.36

TABLE 2.3 – Impact d'une réforme fiscale environnementale (en pourcentage de variation par rapport au compte de référence)

deux secteurs, qui se répercutent ensuite dans le prix à la consommation. Dans les deux cas, la baisse de la demande de travail agrégée induit une diminution du salaire brut (respectivement -0.84% et -1.55%). Cependant dans le cas de la réforme ETR1, la hausse du prix d'un input de production (énergie fossile) se répercute en une hausse du prix de vente de l'énergie finale (+10.15%) ; alors que la mise en place de la réforme ETR3 influe sur la compétition entre les deux secteurs de production et pousse à la baisse le prix de vente du secteur énergétique (-0.75%). Ainsi, dans le cas ETR1, trois effets s'opposent dans la variation du salaire net réel : la baisse du salaire horaire brut, la hausse du prix à la consommation (qui pousse le pouvoir d'achat à la baisse) et la diminution des prélèvements sur les revenus du travail (poussant le pouvoir d'achat à la hausse). En revanche dans le cas ETR3, la diminution du prix de l'énergie finale se répercute dans le prix à la consommation revu à la baisse (-0.2%), qui se combine à la baisse des cotisations sociales pour pousser à la hausse le salaire net réel affecté par la baisse du salaire brut. *In fine*, seule la troisième réforme étudiée se traduit par une augmentation du salaire net réel et donc du pouvoir d'achat des ménages. Dans les autres cas, il semble tout de même préférable au regard de ce critère de retenir la réforme environnementale traditionnelle plutôt que de privilégier une augmentation de la taxe sur l'énergie directement consommée par les ménages. En effet, la répercussion d'une augmentation de près de 60% du prix de l'énergie fossile se traduit par une hausse d'environ 10% du prix TTC de l'énergie finale, comparée à une hausse de près de 30% si la taxation s'opérait directement sur l'énergie finale dans le panier de biens. Ceci signifie que dans le cas d'une taxation traditionnelle des énergies fossiles, une partie des coûts économiques associés à la fiscalité environnementale sont supportés par le secteur énergétique plutôt que par les ménages.

Un bon candidat pour un dividende en emploi et éventuellement en PIB. Les résultats précédents permettent d'identifier *a priori* la réforme permettant de dégager un dividende en activité économique. En effet, dans les deux premiers cas de réformes simulés, la perte de salaire net réel des ménages se traduit par un effet récessif de l'emploi, qui diminue au travers de la baisse de l'offre de travail (-0.49% [resp. -2.5%] pour ETR1 [ETR2]). De plus, les biens de consommation étant devenus plus coûteux relativement à leurs revenus, les agents diminuent leurs niveaux de consommation (-1.43% [7.23%]) et leur substituent en partie de l'épargne (+1.23% [0.22%]). L'impact récessif sur la demande se retrouve sur la mesure agrégée de l'activité économique : la réforme ETR1 génère une perte de PIB (-0.71%), mais au regard de ce critère cette réforme restera préférable au cas ETR2 qui impacte beaucoup plus négativement l'activité économique (-2.5%). En revanche, l'amélioration du salaire net réel provoquée par la réforme ETR3 laisse présager des résultats plus encourageants en termes de dividendes en emploi et en PIB. L'amélioration de l'offre de travail dans ce cas mène automatiquement à un taux d'emploi plus élevé (+0.7%) que dans la situation de référence. De plus l'effet richesse ressenti par les ménages se traduit par une augmentation de leur consommation (+2.15%) et de leur épargne (+1.93%). *In fine*, l'impact de cette réforme sur l'activité économique, pourtant stimulée par cette hausse de la demande, reste négatif (-0.08%). Cependant, la faible amplitude de ce coût en efficacité conforte le caractère préférable attribué à ce type de réforme, et laisse présager des cas où le dividende en PIB pourrait apparaître (relâchement de certaines contraintes, ou sensibilité à certains paramètres structurels), contrairement aux réformes précédemment évoquées.

Le secteur énergétique : le grand perdant d'une réforme fiscale environnementale. L'impact des différentes réformes fiscales en termes d'emploi et d'activité économique laissait présager une catégorisation des réformes par ordre de préférence croissant :

utiliser la taxation de l'énergie fossile est préférable à une taxation directe de l'énergie finale consommée par les ménages, bien qu'il soit de toute façon plus avantageux de réformer la fiscalité en accentuant la fiscalité pesant sur l'énergie finale en tant que facteur de production. Pourtant, les résultats évoqués précédemment recouvrent en réalité une répartition déséquilibrée des coûts liés aux réformes. Le principe d'équité visé par la fiscalité s'applique bien évidemment aux ménages (régressivité de la taxe, redistribution intergénérationnelle des richesses), mais dans notre cas elle vise également la répartition des coûts entre les deux secteurs de production. Sous cet angle, le classement évoqué précédemment s'en trouve modifié. Dans les trois cas étudiés, le secteur énergétique voit son activité affectée négativement par une baisse de la demande qui lui est affectée. En revanche, les variations induites par les réformes sur le second secteur ne sont pas comparables. En particulier, dans la réforme ETR2, l'activité de ce secteur est affectée négativement (-2.21%) au travers de la baisse de la consommation des ménages du bien qu'il produit (effet revenu sur la demande en inputs de production), mais celle-ci reste modérée comparée à la baisse de demande en énergie finale provenant des ménages, ce qui se traduit par une contraction relativement plus forte du secteur énergétique(-6.89%). Dans les autres cas étudiés, c'est la réallocation des facteurs entre les deux secteurs (via la modification relative des prix des facteurs) qui est à l'œuvre. Dans le cas ETR1, le secteur énergétique fait face à une augmentation du coût d'un input de production (énergie fossile) qui est répercutée sur le prix de l'énergie finale. La demande en ce bien est alors affectée substantiellement à la baisse d'une part par les ménages (-4.08%) mais aussi par le second secteur de production (-10.58%) qui lui substitue en partie du travail (-0.61%) et du capital (-1.51%). Le secteur non-énergétique subit grâce à cet effet de substitution un impact nettement moins élevé (-1.51%) que le secteur énergétique (-7.89%). La réforme ETR1 est donc relativement plus pénalisante pour le secteur énergétique que la réforme ETR2 qui lui devient préférable en termes d'équité sectorielle. En réalité, ce résultat a déjà été intuitivement évoqué précédemment lors de la discussion sur les impacts des différentes réformes sur le salaire net réel. Il apparaissait alors que taxer directement les ménages n'était pas équivalent à taxer l'énergie fossile, ce qui se justifie par le fait que dans ce cas (ETR1) c'est le secteur énergétique qui absorbe une partie des coûts subis par les ménages dans la réforme ETR2. Enfin, si la troisième réforme a été identifiée comme la meilleure mesure en termes d'efficacité économique, elle est en réalité celle qui recouvre la plus grande disparité de coûts entre les deux secteurs. Côté production, le secteur énergétique est le grand perdant de cette réforme puisque la contraction de la production du bien non-énergétique (-0.28%) reste relativement faible. En effet, on observe une substitution des autres facteurs de production, tels que le capital (-0.28%) mais surtout le travail (+1.29%), qui compense la baisse drastique de la demande en énergie finale (-16.5%). L'activité du secteur énergétique se contracte donc fortement (-8.7%). Au regard de l'équité entre secteurs, l'ordre de préférence des réformes évoqué précédemment devrait être renversé.

Une réduction de long terme des recettes fiscales mais une amélioration de la dette extérieure. Intuitivement, il est possible de s'attendre à une amélioration de long terme de la balance primaire, si la réforme fiscale environnementale mise en place stimule l'activité économique. En effet, les recettes fiscales étant assises sur l'activité, l'élargissement des assiettes (en particulier la masse salariale) pourrait conduire à des recettes plus élevées alors que le taux de taxation a été réduit au cours de la réforme. Les résultats obtenus compromettent cette intuition, puisque non seulement les recettes fiscales diminuent dans les trois cas simulés, mais le cas ETR3 le plus favorable mène à une réduction des recettes (-4.03%) plus importante que la réforme ETR2 (-1.03%), alors que les assiettes

fiscales (hors énergie) s'élargissent, contrairement aux autres cas. Ce résultat confirme la théorie de Bovenberg (1999, [7]) et souligne l'effet d'interaction des taxes générée par l'étroitesse de l'assiette de la taxe environnementale. La réforme ETR1 reflète le mieux un des effets déterminants dans l'occurrence d'un dividende en PIB, à savoir la variation de l'assiette des émissions : cette assiette, très étroite initialement se contracte très fortement (-38.68%) ce qui se reflète sur une forte réduction des recettes fiscales (-9.68%). Ainsi, quelle que soit la réforme simulée, la diminution du niveau de long terme de dette publique reflète la baisse des recettes fiscales à ce nouvel équilibre. La transition vers le nouvel équilibre se fera au travers d'une plus grande ponction (taxe forfaitaire) des ménages afin de réduire l'endettement initial. Cette réduction transitoire de la dette se traduira ainsi par une perte de bien-être des ménages, ce qui sera évoqué plus précisément dans le prochain paragraphe. En revanche, dans tous les cas envisagés, la hausse de l'épargne domestique combinée avec la baisse de la dette et du stock de capital domestique conduisent à une diminution de la dette extérieure de l'économie.

Les résultats précédents permettent d'affirmer que dans notre cas, aucune réforme fiscale environnementale ne permet d'atteindre un dividende en PIB. En revanche, il apparaît qu'une taxation de l'énergie finale en tant que bien intermédiaire soit préférable aux autres instruments fiscaux dans le cadre d'une réforme fiscale environnementale (y compris une taxe sur l'énergie fossile) ; c'est la réforme qui génère un dividende en emploi, s'effectuant au moindre coût en termes de PIB et en bien-être, bien que cette réforme provoque le plus de disparité de coûts entre les secteurs de production.

2.5.2 Probabilité d'occurrence d'un dividende en activité : une situation d'endettement élevée favorable à une amélioration du PIB à long terme

L'analyse des variantes précédentes a permis de mettre en valeur l'importance de la variation de l'offre de travail dans l'impact d'une réforme fiscale environnementale. Au travers des différents cas évoqués précédemment, ainsi que l'expression analytique de la variation du salaire net réel, nous retrouvons donc les conditions influant sur l'occurrence d'un dividende économique évoquées par Bovenberg [21] (1999, [7]). Nous nous concentrons alors sur la réforme identifiée comme la plus susceptible de générer un dividende en PIB, à savoir la baisse des cotisations salariées compensée par une hausse de la taxe sur l'énergie finale "entreprise", et étudions différentes configurations pour lesquelles un dividende en efficacité pourrait apparaître. La hausse du salaire net réel, et donc l'occurrence d'un double dividende via une augmentation de l'offre de travail, sera sujette aux conditions suivantes :

L'élasticité de l'assiette des émissions : via la présence des élasticités des fonctions de production et en particulier le terme $\frac{\gamma_E}{\gamma_L + \gamma_E \varepsilon_L}$ qui fait directement référence à l'élasticité du salaire aux taxes énergétiques. Ainsi, la sensibilité du secteur non-énergétique au prix TTC de l'énergie finale a un impact déterminant sur la demande de travail et donc sur le salaire brut proposé aux ménages. Plus ce secteur sera sensible à une augmentation du prix HT de l'énergie finale ou de la taxe qui lui est apposée, et plus le salaire net réel se contractera. Une réduction de ce terme (simulée via une baisse de γ_E compensée par une augmentation de γ_K) améliore la probabilité d'occurrence de ce dividende .

Les caractéristiques de l'offre de travail : qui se traduiront par la transmission de la variation du salaire net réel à l'offre de travail, qui dépend en particulier du paramètre σ_L

21. cf. chapitre 1 p.24

(élasticité de Frisch). Les élasticités des fonctions de production évoquées précédemment se répercutent sur la variation du salaire brut mais si les ménages sont très peu sensibles à cette variation de leur pouvoir d'achat l'offre de travail n'en sera que peu impactée. Puisque dans notre réforme, le salaire net réel est poussé à la hausse, une élasticité importante de l'offre de travail à ce revenu rendra l'occurrence d'une dividende plus probable car les ménages travailleront plus. Cet effet est illustré en annexe dans le tableau : une augmentation de σ_L rapproche le coût de la réforme vers zéro et pour une valeur plus importante, dégage effectivement un dividende positif en PIB.

La politique budgétaire, et fiscale en particulier, préexistante : les niveaux de taxes initiaux interviennent explicitement dans l'amplitude de la variation du salaire brut réel. C'est le fameux "Tax-Interaction effect" auxquels font référence Goulder (1995, [18]), Murray *et. al.* (2005, [28])et Parry (1995, [29]). Ainsi, l'impact d'une réforme fiscale dépendra du niveau d'endettement initial de l'Etat, via les taux de taxation fixés pour respecter la contrainte d'équilibre budgétaire (puisque nous supposons que le niveau des dépenses publiques n'est pas modulable dans notre étude). Pour des niveaux de taxation initiaux très élevés, en particulier sur le travail, l'occurrence d'un dividende en PIB sera plus probable. Cet effet est représenté dans le tableau suivant : pour différents niveaux d'endettement initiaux (et donc pour les niveaux de taxation correspondants[22]), la même réforme fiscale est implémentée par le gouvernement. Nous remarquons qu'en particulier une situation initiale d'endettement extrême s'avère être favorable à l'apparition d'un dividende économique : impact positif de la réforme sur le PIB (+0.05%), mais il s'agit également de la situation où la disparité des coûts entre les secteurs est la plus marquée. Ainsi, il apparait clairement que si la mise en place d'une réforme fiscale environnementale fait apparaître un dividende économique, le gain total d'efficacité économique se fera au prix du sacrifice d'un des deux secteurs de production.

2.6 Répartition intergénérationnelle des coûts et bénéfices associés aux réformes fiscales environnementales et double-dividende.

La définition stricte du double-dividende au sens de Goulder (1995, [18]) suppose une amélioration simultanée des deux composantes du bien-être des ménages : d'une part la composante dite "privée" (ou économique) qui dépend de la consommation et des loisirs des agents, et d'autre part la composante "environnementale" qui dépend du niveau de pollution. Au travers des variations de la consommation et du nombre d'heures travaillées évoquées dans la section précédentes, nous pouvons aisément anticiper le sens d'évolution du bien-être privé des agents à long terme. De même, les réformes induisant une réduction des usages énergétiques devrait permettre d'augmenter le bien-être environnemental des ménages à long terme, dans la mesure où le niveau de pollution devrait s'en trouver réduit.

Les estimations du coefficient de préférence ν pour le bien-être environnemental sont peu nombreuses, car ce paramètre est difficile à mesurer. Nous nous appuyons sur une valeur de $\gamma_E = 0.11$ conformément à Gerlagh and van der Zwaan (2001, [17]) et nous testerons des valeurs plus élevées. Ce paramètre est pertinent si l'on cherche à évaluer l'impact d'une réforme fiscale sur le bien-être total, en s'éloignant de la définition stricte du double-dividende. Les résultats de long-terme concernant les variations de l'utilité en niveau sont

22. Ces niveaux de taxation sont ajustés au pro-rata de leur poids dans les recettes fiscales dans la situation de référence

Situation initiale : taux de taxation et endettement			
Taux de taxation des revenus du travail	34.9%	40%	45.1%
Taux de TVA	17.1%	19.6%	22.1%
Taux de taxe énergétique "ménage"	8.7%	10%	11.3%
Taux de taxe énergétique "entreprise"	8.7%	10%	11.3%
Taux de taxation sur l'énergie fossile	0%	0%	0%
Ratio dette/PIB annuel	67%	94%	117%
Réduction des cotisations sociales à hauteur de 1 point de PIB compensée *ex ante* par une augmentation de la taxe énergie "entreprise"			
Les taux de taxation			
Taux de taxation des revenus du travail	**33.3%**	**38.3%**	**43.4%**
Taux de TVA	17.1%	19.6%	22.1%
Taux de taxe énergétique "ménage"	8.7%	10%	11.3%
Taux de taxe énergétique "entreprise"	**30.9%**	**32.4%**	**33.8%**
Taux de taxation sur l'énergie fossile	0% 0%	0%	
Impact de long terme en % de variation sur les...			
Prix			
Salaire horaire	-1.55	-1.55	-1.54
Prix énergie finale	-0.75	-0.75	-0.74
Prix à la consommation	-0.22	-0.22	-0.22
Résultats macroéconomiques (*per capita*)			
PIB	*-0.18*	*-0.08*	*0.05*
Heures travaillées	0.61	0.72	0.85
Stock de capital	-0.95	-0.84	-0.7
Epargne domestique	1.6	1.93	2.32
Dette publique	-6.03	-4.03	-2.88
Balance commerciale	-3.52	-2.99	-2.53
Dette extérieure	15.06	-9.25	-6.67
Résultats individuels			
Consommation totale par agent	*1.82*	*2.15*	*2.55*
Résultats sectoriels			
Production bien numéraire	*-0.38*	*-0.28*	*-0.15*
Production énergie finale	*-8.49*	*-8.68*	*-8.87*

TABLE 2.4 – Impact d'une réforme fiscale environnementale (en pourcentage de variation par rapport au compte de référence)

répertoriés dans le tableau 2.5. Nous remarquons tout d'abord que les ordres de grandeur indiqués sont relativement faibles (de l'ordre de 10^{-3}), ce qui n'est pas étonnant dans la mesure où les variations des variables économiques évoquées dans la section précédentes étaient de l'ordre de quelques %. En revanche, les variations de la pollution sont bien comparables aux variations de la consommation totale : le facteur 10 que l'on peut observer entre les variations des deux composantes de l'utilité sont dues au coefficient ν. Nous pouvons alors anticiper que les effets sur le bien-être total seront essentiellement déterminés par les variations du bien-être privé.

Variation du bien-être des ménages suite à la réforme fiscale... (en niveau de variation)				
	(TVA sociale)	(ETR 1)	(ETR 2)	(ETR 3)
Désutilité lié à la pollution	+0.005	-0.006	-0.006	-0.021
Utilité privée	+0.013	-0.011	-0.057	+0.016
Utilité totale	+0.012	-0.005	-0.05	+0.037

TABLE 2.5 – Impact d'une réforme fiscale environnementale sur le bien-être (en niveau de variation par rapport au compte de référence)

Les résultats indiqués dans le tableau 2.5 pouvaient être anticipés dans une large mesure à partir des résultats macroéconomiques évoqués précédemment. A titre d'exemple, la TVA sociale impacte positivement l'utilité privée des générations futures, comme nous pouvions le présumer à partir des résultats précédents sur la variation de la consommation : la hausse de la TVA est compensée par la baisse des cotisations sociales en termes de pouvoir d'achat des ménages. Les effets positifs de cette réforme sur la consommation et l'offre de travail induisent une hausse des recettes fiscales, que le gouvernement redistribue sous forme de transfert forfaitaire aux ménages. Ainsi, un cercle vertueux économique est enclenché, qui se traduit par une amélioration graduelle du bien-être privé. En revanche, les effets richesse générés par la réforme se traduisent également en un niveau de consommation énergétique plus élevé, ce qui se répercute en un niveau de pollution plus élevé et donc une désutilité environnementale plus forte. L'amélioration du bien-être privé s'effectue au prix d'une dégradation de la qualité environnementale. La TVA sociale se traduit effectivement en une amélioration du bien-être global des générations futures car l'importance accordée au bien-être environnemental reste relativement faible comparée à la valorisation de la consommation. Cette différenciation de valorisation jouera également un rôle prépondérant dans le cas des réformes fiscales environnementales sur lesquelles nous focalisons le reste de notre étude.

Un double-dividende généré dans le cas d'une réforme fiscale reposant sur la taxation de l'énergie finale en tant que facteur de production.

La réforme consistant à taxer l'énergie finale consommée par les ménages et à diminuer en contrepartie les cotisations sociales (ETR2) s'avérait être la réforme la plus néfaste en termes d'activité économique et d'emploi. Cet effet se retrouve sur le bien-être privé des générations futures. La mise en oeuvre de la réforme affecte instantanément le système de prix, et se traduit en une perte du pouvoir d'achat des ménages. Les premiers affectés sont les agents à la retraite au moment de la réforme : leur épargne a déjà été constituée sans anticiper cette réforme et ils ne bénéficient pas des baisses de prélèvements puisqu'ils ne

travaillent plus. Ces agents supportent donc le coût lié à l'augmentation de la TVA, auquel il faut ajouter la hausse des prélèvements forfaitaires. En effet, ceux-ci sont assis sur le nouvel état stationnaire de la dette publique. La contraction des recettes fiscales anticipées par le gouvernement à long terme nécessite de commencer à ponctionner les agents pour réduire le niveau d'endettement souverain. Les générations suivantes supporteront également cet impôt forfaitaire, qui décroîtra jusqu'à ce que le système économique converge (environ quatre à cinq générations). La dégradation du pouvoir d'achat ayant peu à peu entraîné une baisse de l'activité productive via une baisse de l'offre de travail et de la consommation, le bien-être privé reste donc durablement affecté. C'est ainsi que l'on observe une baisse du bien-être privé à long terme. D'autre part, la réforme s'est traduite par une réduction de la consommation totale des ménages, se traduisant à la fois par une diminution de leur consommation d'énergie et par une baisse de leur consommation de bien final (impactant l'activité de ce secteur et *a fortiori* sa demande en énergie finale). La baisse des usages énergétiques se répercute donc dans le temps en une réduction de la pollution par rapport au niveau de référence, et l'utilité environnementale des ménages (liée à la pollution de l'atmosphère) s'en trouve améliorée. Finalement, cette réforme ne génère pas de double-dividende au sens de Goulder (1995, [18]), dans la mesure où le bien-être économique est affecté négativement par la modification du système fiscal, avec un effet particulièrement négatif pour les générations à la retraite au moment de sa mise en ?uvre (surajustement). D'un point de vue du bien-être global, les résultats ne penchent pas non plus en faveur d'un double-dividende faible (baisse de l'utilité privée compensée par une amélioration de l'utilité environnementale). Pour que cela soit le cas, il faudrait que les agents valorisent la qualité de l'air au moins autant que leur consommation ($\nu \geq 1$).

En revanche, la réforme consistant à taxer l'énergie finale utilisée par les entreprises et à diminuer en contrepartie les cotisations sociales (ETR3) laisse apparaître des résultats beaucoup plus encourageants. Le système de prix est intégralement modifié par le changement du système fiscal, comme expliqué dans la section (baisse du salaire brut mais aussi des prix des biens) et se répercute instantanément en une hausse du pouvoir d'achat des ménages. Bien que les prélèvements forfaitaires soient augmentés par l'État afin de réduire le niveau d'endettement, les agents à la retraite au moment de la réforme voient leur utilité privée s'améliorer grâce à l'effet richesse généré par la baisse du prix de consommation. La hausse de l'offre de travail générée par l'augmentation du revenu net réel joue négativement sur l'utilité privée des générations suivantes mais est plus que compensée par la hausse de la consommation associée (dans la mesure où une unité de travail permet de consommer une quantité plus importante de biens). *In fine*, l'utilité économique est durablement améliorée par rapport au compte de référence. L'effet sur la qualité environnementale (via l'accumulation de pollution) pourrait *a priori* être plus mitigé. En effet, si le secteur producteur de bien final réduit drastiquement sa demande en énergie finale et y substitue travail et capital, la consommation énergétique des ménages augmente quant à elle. Ces variations contraires se contrebalancent finalement en faveur de la réduction de la pollution, ce qui permet une amélioration graduelle de l'environnement. Dans le cas d'une réforme pesant sur l'énergie en tant que facteur de production, le double-dividende au sens de Goulder (1995, [18]) est finalement atteint, même si l'effet de la réforme sur le PIB reste légèrement négatif (cf. section précédente).

L'étude de différentes modalités de réformes fiscales environnementales, reposant sur la taxation de l'énergie finale contrebalancée par un allégement des charges sur le travail, nous a permis de mettre en évidence l'existence d'un double-dividende en termes de bien-être pour une modalité précise : le coût de la politique climatique doit être supportée par le

secteur productif plutôt que par les ménages. Dans ce cas, la réforme permet également de dégager un dividende en emploi et d'amortir significativement les coûts en termes de PIB. Ces résultats dépendent en grande partie des hypothèses retenues dans cette étude, tant sur la spécification de l'économie (absence de chômage involontaire, choix de la fonction d'utilité ou encore l'égalité des salaires et coûts du capital entre les deux secteurs de production) que dans le choix de paramètres cruciaux tels que les élasticités de substitution des fonctions de production, ou l'élasticité de l'offre de travail. La prise en compte de chômage involontaire devrait en particulier impacter significativement les résultats précédents, dans la mesure où la réussite de la réforme repose sur le sacrifice du secteur énergétique. La contraction drastique de l'activité de ce secteur passe en partie par une réduction de l'emploi, qui se reporte sur le second secteur de production. Tenir compte de contraintes d'appariement sur le marché du travail remettrait alors en cause le dividende en emploi évoqué précédemment et le bien-être d'une population de chômeurs, supportant une partie du coût de la politique climatique sans bénéficier de la contrepartie économique (baisse des charges sur les revenus du travail).

2.7 Conclusion

Nous avons adopté dans ce chapitre une approche de modélisation originale : traiter de l'efficacité d'une réforme fiscale environnementale dans un cadre unifié permettant une approche à la fois intergénérationnelle, dynamique et sectorielle du double-dividende dans un contexte d'endettement (et donc de pression fiscale) élevé. Nous avons alors montré que la probabilité d'occurrence d'un dividende en efficacité (amélioration de l'activité économique) dépend en particulier de conditions bien spécifiques reprenant l'élasticité de l'offre de travail, les élasticités croisées des deux secteurs de production, ainsi que le niveau initial de taxation intrinsèquement liés au niveau d'endettement des États. Dans ce cas, la meilleure réforme à envisager serait une réduction des charges sur le revenu, compensée par une hausse de la taxe s'appliquant à l'énergie finale en tant qu'input de production. Cette modification du système fiscal permet de dégager un dividende en emploi, un double-dividende fort au sens de Goulder (bien-être des générations futures amélioré (1995, [18])) et de minimiser les pertes de PIB générées par la réforme. En revanche, l'obtention de ce gain économique se réalise au détriment du secteur énergétique, qui porte la totalité des coûts liés à la politique climatique. L'arbitrage traditionnel entre efficacité et en équité est illustré au travers de la répartition sectorielle des coûts, qui montre que plus le dividende en efficacité est probable, moins l'est le dividende en équité. Enfin, il apparaît que la probabilité d'obtention d'un dividende en PIB dépende de la situation fiscale initiale de l'économie : la tension actuelle sur les prélèvements obligatoires (déjà élevés) présente une bonne opportunité pour mettre en place une réforme fiscale environnementale.

Ces résultats sont bien évidemment dépendants des choix méthodologiques adoptés dans nos travaux, qui pourraient être améliorés. Le modèle réalisé précédemment pourrait être étendu dans plusieurs directions : l'introduction de chômage involontaire (qui devrait influer significativement sur les résultats), l'endogénéisation du taux d'intérêt (prise en compte de l'effet d'éviction), la prise en compte d'activités de dépollution financées par la taxation sur l'énergie, une représentation des secteurs productifs plus proches des structures en fonctions CES imbriquées retenues dans les modèles d'Equilibre Général Calculable ou encore la possibilité de tenir compte d'une technologie alternative permettant de produire une énergie finale moins carbonée. Le modèle développé est, comme outil de modélisation, certes perfectible mais possède l'avantage de nous permettre d'étudier dans un cadre simplifié et unifié les impacts des réformes fiscales, sous différents angles d'analyse. Les

résultats obtenus sont crédibles dans la mesure où nous avons tenu compte des effets de premier ordre quant aux effets d'une réforme fiscale environnementale (identifiés dans le premier chapitre) : l'élasticité de l'assiette des émissions incarnée par le choix des élasticité des fonctions de production, l'hypothèse d'une offre de travail endogène qui permet de représenter l'effet de la fiscalité sur l'emploi via la variation de l'offre de travail, et enfin la caractérisation complète de la politique budgétaire qui permet d'évaluer les interactions entre endettement public et politique fiscale.

Ainsi, ce second chapitre nous a permis de dresser une image globale des effets économiques et sectoriels associés à différents types de réformes fiscales environnementales. Nos résultats ont en particulier mis en évidence l'antinomie entre la réussite économique totale d'une réforme fiscale environnementale et la préservation du secteur énergétique, ce qui nous incite à nous intéresser plus spécifiquement à ce secteur dans un troisième chapitre. Sans activité de dépollution ou de technologie décarbonée prises en compte dans notre modèle, l'atteinte des objectifs environnementaux passe forcément par une réduction de la consommation d'énergie. En réalité, l'utilisation de technologies de production moins émettrices peut réduire le contenu CO2 présent dans l'énergie finale et ainsi alléger la politique climatique. Malheureusement, ce type d'installations nécessite en général des montants d'investissement conséquents parfois parce que celles-ci n'ont pas encore atteint leur maturité technologique. Dans un contexte européen où les taux d'endettement des Etats poussent à la hausse le coût du capital, il est maintenant intéressant de regarder quels seraient les impacts de différents scénarios de prix du CO2 et de coût du capital (lié à l'endettement) sur les décisions d'investissement d'un acteur majeur de la transition énergétique : le secteur électrique.

Bibliographie

[1] P. Askenazy. Vers une théorie du partage de la valeur ajoutée. In *Actes du Colloque de l'Association de Comptabilité Nationale*, 2006.

[2] M.H. Babiker, G.E. Metcalf, and J. Reilly. Tax distortions and global climate policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(2) :269–287, 2003.

[3] D. Backus, E. Henriksen, and K. Storesletten. Taxes and the global allocation of capital. *Journal of Monetary Economics*, 55(1) :48–61, 2008.

[4] H. Bohn. The behavior of us public debt and deficits. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(3) :949–963, 1998.

[5] A. Bovenberg and B.J. Heijdra. Environmental tax policy and intergenerational distribution. *Journal of Public Economics*, 67(1) :1–24, 1998.

[6] A. Bovenberg and F. Van Der Ploeg. Optimal taxation, public goods and environmental policy with involuntary unemployment. *Journal of public economics*, 62(1) :59–83, 1996.

[7] A.L. Bovenberg. Green tax reforms and the double dividend : an updated reader's guide. *International Tax and Public Finance*, 6(3) :421–443, 1999.

[8] A.L. Bovenberg and R.A. de Mooij. Environmental levies and distortionary taxation. *The American Economic Review*, 84(4) :1085–1089, 1994.

[9] T. Bréchet, P.A. Jouvet, and G. Rotillon. Tradable pollution permits in dynamic general equilibrium : can optimality and acceptability be reconciled. Technical report, 2010.

[10] E. Challe and X. Ragot. Fiscal policy in a tractable liquidity-constrained economy. *The Economic Journal*, 121(551) :273–317, 2011.

[11] R. Chetty, A. Guren, D. Manoli, and A. Weber. Are micro and macro labor supply elasticities consistent ? a review of evidence on the intensive and extensive margins. *American Economic Review*, 101(3) :471–75, 2011.

[12] P.A. Diamond. National debt in a neoclassical growth model. *The American Economic Review*, 55(5) :1126–1150, 1965.

[13] M. Fodha. Maintenance environnementale et politique fiscale optimale dans un modèle à générations imbriquées. *Recherches économiques de Louvain*, 71(4) :413–425, 2005.

[14] M. Fodha and T. Seegmuller. Environmental quality, public debt and economic development. Technical report, HAL, 2011.

[15] J. Galí and R. Perotti. Fiscal policy and monetary integration in europe. *Economic Policy*, 18(37) :533–572, 2003.

[16] S. Gauthier. Un exercice de tva sociale. *Economie & prévision*, (1) :65–81, 2009.

[17] R. Gerlagh and B.C.C. van der Zwaan. The effects of ageing and an environmental trust fund in an overlapping generations model on carbon emission reductions. *Ecological Economics*, 36(2) :311–326, 2001.

[18] L.H. Goulder. Environmental taxation and the double dividend : a reader's guide. *International Tax and Public Finance*, 2(2) :157–183, 1995.

[19] J. Greenwood, Z. Hercowitz, and G.W. Huffman. Investment, capacity utilization, and the real business cycle. *The American Economic Review*, pages 402–417, 1988.

[20] B.J. Heijdra, J.P. Kooiman, and J.E. Ligthart. Environmental quality, the macroeconomy, and intergenerational distribution. *Resource and energy economics*, 28(1) :74–104, 2006.

[21] B.J. Heijdra and A. Van der Horst. Taxing energy to improve the environment : Efficiency and distributional effects. Technical report, Tinbergen Institute, 1998.

[22] R.B. Howarth. An overlapping generations model of climate-economy interactions. *The Scandinavian Journal of Economics*, 100(3) :575–591, 1998.

[23] R.B. Howarth and R.B. Norgaard. Environmental valuation under sustainable development. *The American economic review*, pages 473–477, 1992.

[24] A. John and R. Pecchenino. An overlapping generations model of growth and the environment. *The Economic Journal*, pages 1393–1410, 1994.

[25] A. John, R. Pecchenino, D. Schimmelpfennig, and S. Schreft. Short-lived agents and the long-lived environment. *Journal of Public Economics*, 58(1) :127–141, 1995.

[26] C. Klein and O. Simon. Le modèle mésange nouvelle version réestimée en base 2000. *Document de travail de la DGTPE*, (2010/02), 2010.

[27] M.A. Lopez-Garcia. On the role of public debt in an olg model with endogenous labor supply. *Journal of Macroeconomics*, 30(3) :1323–1328, 2008.

[28] B.C. Murray, A. Keeler, and W.N. Thurman. Tax interaction effects, environmental regulation, and "rule of thumb" adjustments to social cost. *Environmental and Resource Economics*, 30(1) :73–92, 2005.

[29] I.W.H. Parry. Pollution taxes and revenue recycling. *Journal of Environmental Economics and management*, 29(3) :64–77, 1995.

[30] Fabien Prieur. *Croissance et environnement dans le modèle à générations imbriquées : analyse dynamique et évaluation de politiques publiques.* PhD thesis, 2006.

[31] T.N. Rasmussen. Modeling the economics of greenhouse gas abatement : An overlapping generations perspective. *Review of Economic Dynamics*, 6(1) :99–119, 2003.

[32] V. Touzé. Incidence fiscale des retraites par répartition. *Revue de l'OFCE*, (4) :103–124, 2009.

Chapitre 3

Coût du CO2, coût de la dette et coût de production dans le secteur électrique

3.1 Prioriser le remboursement de la dette publique ou rechercher un double-dividende ?

Dans les précédents chapitres, nous avons montré qu'une réforme fiscale environnementale appropriée (taxation de l'énergie finale en contrepartie d'une réduction des cotisations sociales) pouvait, dans certaines conditions, répondre aux objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre tout en minimisant les pertes d'efficacité économique (double-dividende). Nous montrerons qu'un tel type de réforme, réinjectant les recettes fiscales liées à la taxation du CO2 n'est pas automatiquement la réforme la plus appropriée pour inciter le secteur électrique à investir dans des technologies décarbonées, en particulier dans un contexte d'endettement public élevé qui pousse à la hausse le coût de financement des entreprises.

Coût du financement et coût du CO2 : deux déterminants majeurs des investissements futurs. L'étude conjointe de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) et de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) sur les coûts prévisionnels de la production de l'électricité publiée en 2010 [1] concluait que le coût de l'électricité dans les prochaines années dépendrait principalement des coûts d'accès au financement et du prix du carbone. En particulier, dans un contexte où les pays (ou les énergéticiens de ces pays) cherchent à investir dans de nouvelles capacités productives tout en respectant les objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre, la restructuration des mix électriques vers des technologies faiblement émettrices telles que le nucléaire, les énergies renouvelables ou la capture de CO2 dépendra principalement des contraintes pesant sur le coût de l'investissement et la force du signal-prix du CO2.

Les technologies ENR : des équipements particulièrement vulnérables au coût du capital. Le secteur électrique européen représente près de 30% des émissions de Gaz à Effet de Serre. Le système européen d'échanges de quotas (EU-ETS) entrant début 2013 dans une troisième phase pour laquelle les émissions sont effectivement payantes pour ce secteur, la transition énergétique passera par un investissement massif en technologies décarbonées pour respecter les contraintes d'émissions. Cependant, les technologies à faible teneur en carbone, qu'il s'agisse du nucléaire, des énergies renouvelables et également de la Capture et Stockage du Carbone ont pour particularité d'être particulièrement capitalistiques. La crise de la dette souveraine en Zone Euro a mené depuis 2010 à une augmentation des primes de risques associées à la plupart de ces pays, ce qui devrait renchérir les coûts de financements et influencer les choix d'investissement dans ce secteur. Puisque les technologies faiblement carbonées sont particulièrement vulnérables à la hausse des coûts de financement, la crise de la dette pourrait mettre à mal les objectifs climatiques en influant sur la rentabilité économique des différents moyens de production et en distordant les choix d'investissement dans ce secteur.

La rentabilité de chaque technologie (cf. Percebois et Hanssen (2011),[9]) relativement à son utilisation pour la production d'électricité dépend de conditions qui lui sont propres. Aucune technologie ne dispose d'un avantage économique absolu. La compétitivité d'une technologie de production dépendra de conditions locales et de certains facteurs, parmi lesquels le coût de financement qui détermine l'amortissement de l'investissement initial dans l'installation, le prix du CO2 qui impactera les coûts variables associés à des technologies

utilisant des combustibles fossiles, mais également la durée d'utilisation de la machine qui permettra de répartir les coûts fixes sur une plus grande quantité produite. Les impacts de ces trois facteurs sur les coûts de production de l'électricité sont classiquement calculés de façon indépendante, en examinant l'effet d'une variation d'un de ces facteurs toutes choses égales par ailleurs.

La nécessité de prendre en compte les interactions entre dette, prix du CO2 et PIB, ainsi que leur impact sur les coûts de production. Pourtant, les chapitres précédents ont mis en évidence les interactions liant les politiques budgétaire et climatique des Etats, ainsi que leur impact sur l'activité économique. Du fait que la littérature considère généralement que la consommation d'électricité est fortement liée au PIB, ainsi il est logique de considérer de façon conjointe les interactions entre taux d'intérêt, prix du CO2 et PIB afin d'intégrer leurs répercussions sur les coûts de production de l'électricité selon différentes technologies. En particulier, il apparaît de la décomposition précédente que la hausse de l'endettement public pourra influer sur le coût du capital installé via une hausse du taux d'intérêt (augmentation de la prime de risque pays), alors qu'une trajectoire de prix CO2 impactera les prix des combustibles fossiles donc les coûts proportionnels. L'effet sur la demande d'électricité générée par le duo taux d'intérêt et prix du CO2, via leurs effets sur le PIB, devrait également affecter le coût complet associé à la production d'un MWh, en modifiant la rentabilité d'un investissement initial sur la quantité totale produite au cours des différentes années de la vie de la centrale.

En nous appuyant sur le cas français, nous montrerons que même avec un signal-prix du CO2 suffisamment élevé, les investissements en technologies décarbonées pourraient ne pas se réaliser dans les proportions attendues, en particulier si les tensions sur les taux d'intérêt liées à l'endettement public ne se résorbent pas. Nous montrerons également que dans cette perspective les gouvernements pourraient avoir à arbitrer entre un objectif d'efficacité économique (par le recyclage des recettes) et un objectif d'assainissement des finances publiques (par le remboursement de la dette).

Dans ce chapitre, nous rappellerons dans un premier temps la méthodologie traditionnelle de calcul des coûts complets de production, que nous mettrons ensuite en oeuvre pour dégager les coûts de référence actuels dans le secteur électrique. Cette première partie a été réalisée en prenant en compte la pratique des énergéticiens en la matière, telle que communiquée par la Direction Financière et la Direction de la Production et de l'Ingénierie d'EDF. Le reste de notre étude s'appuiera sur une projection de l'évolution de ces coûts à l'horizon 2030, dans une approche novatrice consistant à intégrer cette méthode traditionnelle dans un cadre macroéconomique plus large. L'étude de différents scénarios de réformes fiscales climatiques nous permettra enfin de fournir des indications quant à l'effet des politiques publiques sur les coûts d'investissement du secteur.

3.2 Coûts complets de production et Coût Moyen Pondéré du Capital

L'électricité est un bien qui partage avec les autres services énergétiques certaines spécificités : ce bien est continuellement demandé mais dans des volumes qui fluctuent au cours du temps (cf. Figure 3.1).

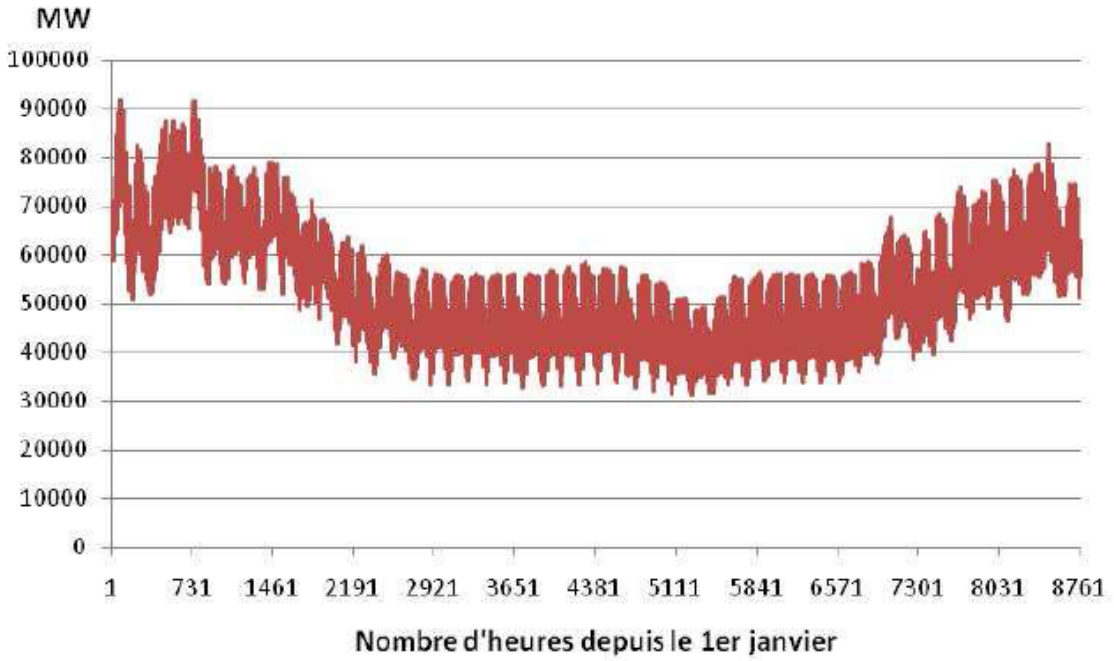

FIGURE 3.1 – Fluctuation de la consommation électrique en France en 2011 - *source RTE*

La courbe de charge $Q(t)[MW]$ représente les différentes puissances successivement appelées par le réseau au cours d'une année. *insérer graphique*. Du fait de la mobilisation des centrales selon le "merit-order", la courbe de puissance $P(t)$ d'une centrale n'est pas constante, la puissance commandée par le responsable de programmation de la centrale peut être inférieure à la puissance nominale sans pour autant pouvoir descendre en dessous du minimum technique (sauf révision ou pannes imprévues qui réduisent à zéro la puissance disponible) [1]. L'énergie produite par une centrale au cours de l'année s'écrit : $E(t) = \int_0^{8760} P(t)dt[MW \times h]$. On caractérise généralement une machine par sa durée d'utilisation $U(h/an)$ définie par

$$U = \frac{E}{P_{nom}}$$

qui indique en quelque sorte l'intensité d'utilisation de la puissance nominale par an.

L'énergie totale consommée au cours de l'année se calcule par : $\int_0^{8760} Q(t)dt[MW \times h]$. La gestion optimale du parc de production chez les électriciens repose sur la problématique fondamentale suivante : quel mix de technologies faut-il utiliser et dans quelles quantités pour répondre à la demande d'énergie en toute sécurité et au moindre coût ?

3.2.1 Coût complet de production : une approche par le Coût Marginal de Long Terme

Nous adopterons une méthode de calcul du coût de production par technologie dit "complet" (ou Coût Moyen Actualisé, ou Levelized Cost Of Electricity ou encore coût marginal de long terme). C'est la méthode de calcul classiquement retenue et utilisée par les instituts internationaux tels que l'AIE ou l'OCDE mais également par les industries

1. Plus l'écart entre la puissance nominale et la puissance minimale sera élevé et plus la centrale sera modulable, contribuant à la flexibilité du parc de production.

électriques elles-mêmes. Ce coût correspond à "la valeur présente de la somme des coûts actualisés divisé par la production totale ajustée à sa valeur temps économique" (AIE). Il intègre donc les dépenses opérationnelles et le coût d'investissement.

Le coût complet de production d'une unité est approché par la formule suivante (Hansen et Percebois (2011,[9])) :

$$CC = \frac{P_{comb}}{\eta} + [P_{CO2} \times FECO2] + CVOM + \frac{CFOM}{U} + \frac{a \times I}{U} \tag{3.1}$$

où on retrouve

- P_{comb} le prix du combustible utilisé, exprimé en €/MWh thermique (avant conversion) ;
- η le rendement total de l'unité (%) ;
- P_{CO2} le prix de la tonne de CO2 émise (€/t) ;
- $FECO2$ le facteur d'émission du combustible considéré (t/MWh électrique) ;
- $CVOM$ (€/MWh) et $CFOM$ (€/MW) les parties variable et fixe des frais d'opération et de maintenance ;
- a le coefficient d'annuité correspondant au taux d'actualisation i et I le coût unitaire d'investissement initial (€/MW). Pour une durée de vie n de l'équipement construit, ce coefficient d'annuité a se calcule via la formule suivante : $a = i \times \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$. Le taux d'actualisation i correspond en réalité au Coût Moyen Pondéré du Capital (CMPC), sur lequel nous reviendrons dans la section suivante.
- U la durée d'utilisation de la machine (h/an).

Certains équipements sont plus lourds en capitaux investis (donc en coûts fixes) mais plus légers en frais de combustibles (centrale nucléaire par exemple), et seront alors appelés pour des durées d'utilisation plus élevées car possédant les coûts proportionnels les plus faibles, tandis que d'autres équipements sont essentiellement coûteux en terme de combustibles (centrale à gaz ou à fioul par exemple). Ainsi, le coût de production associé à un équipement lourd en investissement sera plus sensible au nombre d'heures pendant lequel il fonctionne (à savoir le nombre d'heures sur lesquelles il est possible de répartir les frais fixes annuels).

Les centrales nucléaires et éoliennes, lourdes en coûts d'investissements sont principalement sensibles aux variables reliées directement à ce coût en investissement, à savoir le taux d'intérêt et le nombre d'heures de fonctionnement. Au contraire, pour des centrales à gaz, à charbon ou à fioul, le coût de production sera plus sensible au prix du combustible et au prix du CO2.

Dans un premier temps, nous étudierons dans quelle mesure un niveau élevé d'endettement induit une pression à la hausse sur le coût moyen pondéré du capital, au travers de l'augmentation des primes de risque pays et secteurs. Nous ajouterons dans un second temps la dimension climatique en considérant l'impact d'une taxe carbone sur les coûts variables de production. Il sera alors possible d'étudier la transmission de ces différents scénarios de dette/prix du CO2 sur l'activité d'un parc de production installé faisant face à une demande prédéterminée.

3.2.2 Coût Moyen pondéré du Capital : un coût de financement spécifique au secteur

Les projets de financement d'équipements sont financés soit par endettement (dette bancaire, obligations ou crédit-bail), soit par fonds propres (apport des propriétaires de l'entreprise, sociétés de capital-risque investissement, actions, options sur actions et bons de certificat de valeur garantie). De cette structure de financement découle le coût moyen pondéré du capital (CMPC), qui détermine le taux de rentabilité minimum que doivent dégager les investissements de l'entreprise sur le moyen terme. Ce CMPC correspond alors exactement au taux d'actualisation retenu pour calculer les annuités liées aux investissements dans le calcul du coût complet de production.

Le CMPC dépend de la structure financière de l'investissement initial (dette D et capitaux propres CP), et des taux de rentabilité associés à chaque structure de financement :

$$CMPC = R_D \frac{D}{D+CP} + R_{CP} \frac{CP}{D+CP}$$

où le coût de l'endettement(R_D) et le coût des capitaux propres(R_{CP}) dépendent d'éléments inhérents aux caractéristiques structurelles du pays (prime de risque, fiscalité sur les entreprises), du projet (spread de financement) et de l'actionnariat concerné. En pratique, les données financières sont très volatiles alors que les investissements évalués sont amortis sur plusieurs années, ce sont des moyennes historiques [2] de ces données qui sont introduites explicitement dans le calcul du CMPC.

En particulier, le coût de la dette se décompose de la façon suivante :

$$R_D = (R_f + S_p + S_e) \times (1 - t_{IS})$$

où

- R_f représente le taux sans risque de référence. Puisque nous nous intéressons au secteur électrique français, nous retenons pour ce taux la valeur à laquelle les banques se prêtent entre elles dans toute la Zone Euro, soit le taux interbancaire homogène à un taux sans risque (proxy d'une moyenne pondérée des taux sans risque des pays européens).
- S_p représente la prime de risque pays. C'est le spread des obligations émises par le pays par rapport au taux sans risque de la même devise. [3]
- S_e fait référence au spread de financement associé au secteur, qui dépend de la notation de l'entreprise.
- t_{IS} représente le taux d'imposition des sociétés (environ 35% en France). La prise en compte de ce taux d'imposition fait référence au fait que les charges financières soient déductibles des impôts, ce qui avantage un financement par endettement plutôt que par capitaux propres [4] (Ponssard, Sévy et Tanguy (2007),[13]).

2. La plage temporelle retenue pour le calcul de cette moyenne doit alors être choisie avec précaution (critères de sélection). A titre d'illustration, certaines moyennes de taux de risque pays étaient auparavant calculées sur 5 ans, mais avec la crise financière et dorénavant obligataire qui touche les pays européens, ces plages doivent être resserrées pour mieux mieux refléter la réalité.

3. Le choix de la plage temporelle retenue pour le calcul de ce spread moyen est très important dans ce cas.

4. tant que la solvabilité de l'entreprise n'est pas remise en cause

D'un autre côté, le coût des capitaux propres peut être décomposé de manière analogue en :

$$R_{CP} = R_f + S_p + PRM \times \beta_u \left(1 + (1 - t_{IS})\frac{D}{CP}\right)$$

où

- PRM fait référence à la prime de risque marché. C'est la différence entre le rendement espéré du portefeuille de marché pour les actionnaires et le rendement d'un investissement sans risque (rendements moyens des obligations d'État à 10 ans).
- β_u représente le bêta sectoriel des actions. Il reflète les risques spécifiques au secteur d'activité. Le bêta sectoriel d'une société endettée β_E est lié au bêta d'une société non endettée (risque systématique des actifs) et à sa structure financière. C'est ce que nous avons noté : $\beta_E = \beta_u \left(1 + (1 - t_{IS})\frac{D}{CP}\right)$.
- $\frac{D}{CP}$ fait référence à la structure financière du financement. En pratique, c'est une méthode de benchmarking qui est adoptée pour évaluer ce ratio (comparaison avec une entreprise de caractéristiques similaires et côtée).

Avec un taux d'obligation de l'État français estimé à 3,70% (comprenant le taux sans risque s'appliquant à la Zone Euro et la prime de risque très faible appliquée à la France), une prime de risque spécifique à l'entreprise d'environ 1%, une prime de risque de marché de 5,0%, un bêta sectoriel leveragé (entreprise endettée) et enfin une part de la dette dans le passif d'environ 50%, nous retrouvons une valeur du CMPC de 7,96% comprenant un taux de marge adopté par l'entreprise. Cette valeur correspond à la valeur du CMPC de 8% couramment retenue dans la littérature.

Un niveau élevé d'endettement public a tendance à pousser à la hausse les taux d'intérêts longs souverains. L'évaluation de ce degré de corrélation entre endettement et taux d'intérêt a fait l'objet de plusieurs travaux économiques, parmi lesquelles nous pouvons citer une étude du FMI réalisée par Baldacci et Kumar (2010, [3]) confirmant l'existence d'un lien entre aggravation des déficits publics et hausse des taux d'intérêt de long terme. Dans certains pays européens, la crise de la dette souveraine a effectivement eu des conséquences sur une hausse des taux d'intérêt (Grèce, Portugal, Irlande, Espagne par exemple), et si la France reste pour le moment épargnée, ce risque ne peut être écarté avec certitude. Ainsi, dans la mesure où la situation des finances publiques françaises ne s'améliorerait pas de façon notable et durable, les taux d'intérêts souverains pourraient eux aussi augmenter ce qui se répercuterait sur le coût de financement des entreprises au travers de la décomposition du CMPC décrite précédemment. Cette transmission quasi-unitaire de la hausse du taux d'intérêt sur le coût du capital aurait alors des conséquences non seulement sur les coûts de production actuels mais également sur les décisions d'investissement dans le secteur électrique, qui doit pourtant au regard des objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre développer une part plus grande de technologies renouvelables dans le parc de production.

3.3 Les coûts de production actuels des différentes technologies.

La méthodologie expliquée précédemment est appliquée aux données du secteur électrique français de façon à étudier les impacts de différents scénarios macro-économiques

sur les coûts de production. Ces coûts de référence sont basés sur des hypothèses normatives issues des principaux instituts français et internationaux de l'énergie et l'électricité, qui concernent les prix des combustibles, le taux d'actualisation, et les caractéristiques des différentes installations. Nous nous appuyons sur un panel de données concernant l'activité du secteur électrique en 2011 (données RTE [15]). Ces données se déclinent par technologie (moyens de production) : centrales nucléaires, centrales aux combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz), ENR (hydraulique, éolien, biomasse, photovoltaïque, autres). Pour chaque technologie, nous disposons des données concernant la puissance installée et la durée d'utilisation de l'équipement satisfaisant à une demande d'électricité domestique totale, ainsi que les facteurs d'émissions de CO2. Ces données sont ensuite raccordées aux hypothèses de l'AIE (voir [1]) concernant les prix des combustibles, le prix du CO2 ainsi que le taux de change. En y adjoignant enfin des données techniques concernant le rendement ainsi que les montants d'investissement initiaux associés à la durée d'amortissement [5], nous pouvons reconstruire les coûts complets de production pour chaque type d'équipement, et examiner la sensibilité des ces coûts aux différentes hypothèses. En pratique, les conditions spécifiques du site et les particularités de chaque centrale peuvent conduire à des écarts significatifs par rapport au coût de référence qui sera calculé.

3.3.1 Données et hypothèses

Les données RTE stipulent qu'au 31 Décembre 2011, la production nette de 542 TWh était assurée par le fonctionnement des différentes technologies de production. Les capacités installées étant connues pour chaque technologie, les données en énergie effectivement produite correspondent au nombre d'heures d'utilisation de chaque type d'équipement sur l'année 2011. Ces données sont recensées dans la table 3.1.

5. En intégrant les différents calculs du CMPC effectués précédemment, nous pouvons alors calculer le montant d'annuité correspondant à l'équipement.

	Fissile	**Thermique à combustion fossile**			**Énergies Renouvelables**				**Total**
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	PV	
Capacités installées (GW)	63	7,9	9,5	10	25,4	1,3	6,6	2,2	**126**
Énergie produite (TWh)	421	23	20	8	50	6	12	2	**542**
Part dans le mix électrique	78%	4,2%	3,7%	1,5%	9,3%	1%	2,2%	0%	**100%**
Durée d'utilisation (h/an)	6674	2911	2105	810	1980	4308	1803	807	

TABLE 3.1 – Données sur le mix électrique de 2011

La technologie dénommée "autres ENR" (appelée "thermique décentralisé ENR" dans les bilans RTE) comprend la gestion des déchets, le biogaz et la biomasse. Le sigle PV fait référence à la filière du Photovoltaïque. D'autre part, les durées d'utilisation associées aux technologies éoliennes et photovoltaïques peuvent paraître faibles au regard des autres moyens de production. En réalité, ces chiffres correspondent à une situation dynamique : les parcs se développent en cours d'année, mais l'énergie produite est rapportée à la capacité atteinte en fin d'année. En situation statique, la durée d'utilisation de l'éolien terrestre est de l'ordre de 2000h, et du photovoltaïque de 1000h en France.

D'après le tableau 3.1, le mix électrique actuel est essentiellement marqué par la prépondérance du nucléaire (78% de l'électricité produite). Les centrales thermiques à combustibles fossiles représentent environ 10% de ce mix, à égalité avec l'hydraulique, qui représente l'essentiel de l'utilisation de technologies renouvelables.

Les durées d'appel des technologies observées dans le tableau 3.1 dépendent des coûts proportionnels, selon la logique de «merit order», mais aussi de la flexibilité de chaque technologie. En effet, puisque l'électricité ne peut être stockée à grande échelle, un parc électrique donné (capacités installées) est plus ou moins sollicité en fonction de la demande. La logique dite de «merit order» (préséance économique) consiste à faire appel aux différentes unités de production électriques, au fur et à mesure, en fonction de leurs coûts variables croissants.

Selon cette logique, les premières unités de production appelées sont celles produisant l'électricité dite « fatale », c'est à dire l'électricité « perdue » si elle n'est pas utilisée à un instant donné (hydraulique au fil de l'eau, éolien et solaire). En effet, la production d'électricité associée à ces technologies dépend de conditions exogènes aux responsables de l'exploitation des parcs correspondants, telles que les aléas climatiques (vent et taux d'ensoleillement) et environnementaux (débit des cours d'eau).

Les centrales nucléaires, dont les coûts variables sont relativement faibles, sont ensuite appelées pour assurer le complément nécessaire pour la production d'électricité de base. Ainsi, en 2011, ces unités ont fonctionné 78% du temps.

Ce sont ensuite les centrales thermiques à combustibles fossiles (charbon, gaz, voire au fioul) qui produisent de l'électricité aux pics de consommation (périodes de pointe et d'extrême pointe). Le «merit order» interne à cette catégorie dépend essentiellement des prix relatifs (prix du CO2 inclus) des combustibles. Le prix du fioul issu du pétrole, que l'on y adjoigne le prix du CO2 ou non, reste bien supérieur aux prix du gaz et charbon, et devrait le rester durablement. Les centrales à fioul (Turbine A Combustion) ne sont donc utilisées que pour assurer la production d'électricité d'extrême pointe (taux d'utilisation de 1 à 2%). En revanche la place des centrales à gaz et à charbon dans le «merit order» est nettement moins stable que pour le fioul. Les prix relatifs de ces deux énergies primaires sont en réalité assez proches, et si en 2010, le gaz était préféré au charbon car moins cher, la tendance s'est inversée en 2011. C'est en particulier entre ces deux technologies que le prix du CO2 aura un rôle crucial, puisque le charbon a un contenu en CO2 plus élevé que le gaz ; un signal-prix élevé du CO2 aura tendance à inverser le classement entre centrales à charbon et gaz.

Hypothèses de prix

Les hypothèses de prix des combustibles fossiles retenues pour nos calculs sont celles de l'AIE (WEO 2012). Ces prix (en dollars américains) sont convertis en euros via un

taux de change retenu de 1€ = 1.3 $ (AIE). Sauf mention contraire, tous les prix et coûts qui suivront dans cette étude seront exprimés en euros constants 2011. Enfin, le taux d'actualisation retenu (CMPC) est pris égal à 7.96%, en conformité avec le calcul réalisé dans la section précédente.

Taux de change €/$	Prix CO2	Prix Charbon	Prix Gaz	Prix Pétrole	Uranium	CMPC
1.3	12€/tCO2	71€/t	12€/MBtu	71€/b	52$/lb	7,96%

TABLE 3.2 – Hypothèses des prix et du taux de change retenues (AIE, WEO 2012)

La combinaison des données précédentes avec les caractéristiques techniques spécifiques à chaque technologie nous permet de reconstituer les coûts complets de production recensés dans le tableau 3.3.

	Fissile	**Thermique à combustible fossile**			**Énergies Renouvelables**			
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	PV
Coût en capital investi	29,06	45,77	40,05	65,80	48,50	118,22	67,79	353,31
Coût variable combustible	12,00	44,26	56,28	135,77	0	40		
Coût exploitation	7,19	10,30	8,55	14,81	12,12	23,21	13,31	69,38
Coût complet	48,25	100,33	104,88	216,39	60,62	181,44	81,10	422,69

TABLE 3.3 – Coût complet de production [€/MWh] en 2011

3.3.2 Le nucléaire

Les centrales nucléaires ont pour avantage de fournir des quantités significatives d'électricité en base à faible teneur en carbone, et à un coût en combustible relativement faible. Cependant, cette technologie mobilise un montant élevé de capital auquel il faut ajouter les sommes nécessaires au démantèlement et à la gestion des déchets.

Le coût d'investissement est évalué à 2400€/kW en 2012. Il est supposé croître dans le temps afin d'atteindre une valeur de 3000€/kW en 2030 (valeur retenue par le rapport "Énergies 2050" [?]). Pour le calcul des annuités liées à l'investissement, la durée de vie économique des centrales nucléaires est supposée être de 40 ans (mais qui devrait s'allonger à 60 ans à partir des prochaines années). En ajoutant au coût fixe le coût variable lié au prix de l'uranium et les coûts d'exploitation (supposés représenter environ 2% du capital initial par an), le coût complet de production d'un MegaWattheure est estimé à 48 €environ (cf. figure 3.2).

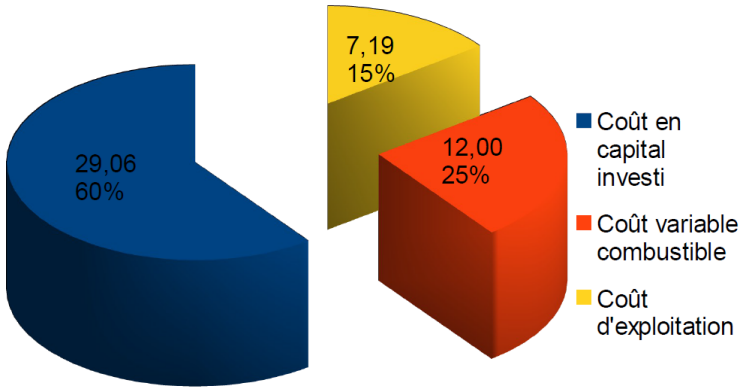

FIGURE 3.2 – Décomposition du coût complet unitaire de production du nucléaire

L'investissement est donc la composante la plus importante de coût de production du nucléaire, à hauteur de 60 % environ. Ce coût est donc tout particulièrement sensible au taux d'actualisation, qui détermine la charge annuelle liée à l'investissement, et à la durée de fonctionnement de l'unité appelée, qui impacte le coût du capital *par unité* d'électricité produite. En effet, une centrale dont la construction a mobilisé des niveaux importants de capital sera mieux rentabilisée en fonctionnant une plus grande partie de l'année, considérant que ses coûts variables sont relativement faibles. Ces deux déterminants importants sont illustrés dans le tableau suivant, recensant la sensibilité du coût de production unitaire à différents facteurs :

	Variation	Impact sur le coût complet de production d'un MWh
Coût du CO2	+1%	0%
Coût d'investissement (CMPC)	+1%	+0.58%

TABLE 3.4 – Sensibilité du coût complet de production des centrales nucléaires en % de variation par rapport au compte de référence

3.3.3 Centrales thermiques à combustible fossile

Centrales thermiques à charbon

Les ressources en charbon sont relativement abondantes au niveau mondial, comparativement au pétrole ou au gaz, ce qui a pour avantage de limiter les risques sur la disponibilité et le prix de cette énergie primaire. Ainsi, le charbon représente la principale source d'énergie primaire pour la production d'électricité au niveau mondial. Néanmoins, en France, la part de cette technologie reste relativement faible dans le mix électrique. D'une part, la production de base est essentiellement assurée par le nucléaire. Concernant la production de semi-base, cette technologie est en compétition avec les centrales au gaz, qui représentent un moindre coût en investissement. D'autre part, la production d'électricité à partir du charbon émet deux fois plus de CO2 que l'utilisation de gaz. Le faible prix du charbon (hors CO2) rend cette technologie économiquement compétitive face au gaz en l'absence d'une tarification suffisamment élevée du carbone. Cet avantage se réduit rapidement, au fur et à mesure que le prix du CO2 augmente.

Le calcul des coûts variables des centrales nécessite de considérer non seulement le prix du combustible en €/t, mais d'y appliquer également un coefficient de conversion correspondant au rendement de la centrale, ainsi que le facteur d'émissions de CO2 lié à la combustion de ce fossile. Avec un rendement moyen de 40%, la production d'un MWh électrique nécessite la combustion de 0,4 tonne de charbon, ce qui coûte $0,4 \times 71 = 27$€. La production de ce MWh d'électricité génère l'émission de 0,9 tonne de CO2, taxée à 12€ la tonne. Ainsi, le coût en combustible total s'établit à $27 + 0,9 \times 12 = 38$€ par MWh.

Les coûts d'investissement sont évalués à 1500 €/kW en 2012 [6]. La durée de vie retenue pour cette technologie est de 30 ans. Avec des coûts d'exploitation annuels représentant environ 2% du capital initial, le coût complet de production d'un MWh à l'aide de cette technologie est estimé à 94 €environ (cf. figure 3.4).

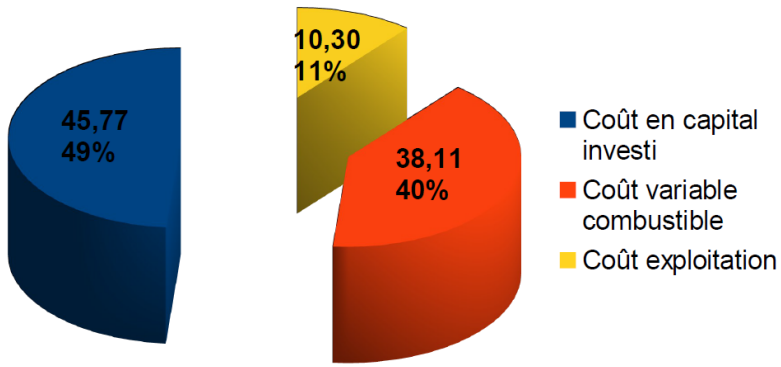

FIGURE 3.3 – Décomposition du coût complet unitaire de production des centrales à charbon

Bien que la part en capital dans le coût complet soit inférieure à celle observée dans le cas du nucléaire, le coût en capital représente tout de même la moitié du coût complet de production. Les tests de sensibilité réalisés dans le tableau 3.5 montrent comment le coût complet des centrales thermiques au charbon dépendent du coût d'investissement et

6. Jancovici estime ces coûts compris entre 1000 et 2000 € par MW installé. Le Rapport "Énergies 2050" [?] retient une hypothèse de 1600 €/kW.

du coût du CO2. Ainsi, le niveau de la taxe CO2 sera déterminant quant au degré de compétitivité de cette technologie par rapport aux centrales à gaz pour la production de semi-base.

	Variation	Impact sur le coût complet de production d'un MWh
Coût du CO2	+1%	0,11%
Coût d'investissement (CMPC)	+1%	+0.37%

TABLE 3.5 – Sensibilité du coût complet de production des centrales à charbon en % de variation par rapport au compte de référence

Centrales thermiques à Gaz

Les centrales thermiques à gaz (essentiellement des centrales à cycle combiné à gaz) présentent plusieurs avantages, tels qu'un coût d'investissement relativement bas comparé à d'autres technologies, des émissions faibles en CO2 au regard des autres énergies fossiles (charbon et fioul) et une flexibilité opérationnelle élevée. Mais les coûts dépendent davantage du prix du combustible.

Tout comme le cas du charbon évoqué précédemment, le calcul des coûts variables des centrales à gaz nécessite de considérer à la fois les prix du combustible et du carbone, mais aussi les caractéristiques techniques de ce moyen de production. Avec un rendement typique de 50%, la production d'un MWh électrique nécessite la combustion de 6,8 MBtu de gaz, ce qui coûte $6,8 \times 12 = 82$ €. La production de ce MWh d'électricité génère l'émission de 0,4 tonne de CO2, taxée à 12€ la tonne. Ainsi, le coût marginal de fonctionnement s'établit à $82 + 0,4 \times 12 = 87$€ par MWh.

Les coûts d'investissement sont évalués à 900 €/kW en 2012 [7]. La durée de vie retenue pour cette technologie est de 25 ans. En considérant des coûts d'exploitation représentant environ 2% du capital initial par an, le coût complet de production d'un MegaWattheure à l'aide de cette technologie est estimé à 135€environ (cf. figure 3.4).

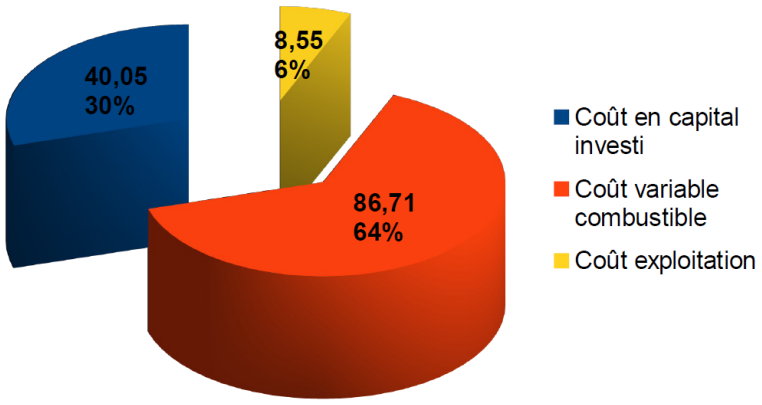

FIGURE 3.4 – Décomposition du coût complet unitaire de production des centrales à gaz

La décomposition des coûts unitaires de production est marquée par la prépondérance du coût du combustible (64% du coût total), alors que la part du coût en capital est l'une

7. Jancovici estime ces coûts compris entre 500 et 1000 € par MW installé. Le rapport Energies 2050 retient une hypothèse de 700 €/kW.

des plus faibles parmi toutes les technologies de production (30% du coût complet). Les tests de sensibilité réalisés dans le tableau 3.6 montrent que la compétitivité des centrales thermiques au gaz sera déterminée essentiellement par les prix du gaz et du CO2.

	Variation	Impact sur le coût complet de production d'un MWh
Coût du CO2	+1%	0,04%
Coût d'investissement (CMPC)	+1%	+0.2%

TABLE 3.6 – Sensibilité du coût complet de production des centrales à gaz en % de variation par rapport au compte de référence

Turbines à combustion au fioul domestique (TAC)

Les turbines à combustion représentent le moyen de production pour lequel le coût proportionnel de production d'un MWh est le plus élevé. Ce moyen de production est présent dans le mix, bien qu'en très faible quantité, pour un usage bien spécifique : les turbines à combustion sont dédiées à la satisfaction des besoins de pointe extrême, essentiellement parce que c'est une technologie très flexible (possibilité de démarrages et de variations de charge très rapides).

Tout comme les cas précédents, le calcul des coûts variables des centrales nécessite de considérer à la fois les prix du combustible et du carbone, mais aussi les caractéristiques techniques de ce moyen de production. Avec un rendement moyen de 40%, la production d'un MWh électrique nécessite la combustion de 1,6 barils de pétrole, ce qui coûte $1,6 \times 71 = 113$ €. La production de ce MWh d'électricité génère l'émission de 0,8 tonne de CO2, taxée à 12€ la tonne. Ainsi, le coût en combustible total s'établit à $113 + 0,8 \times 12 = 122$ € par MWh.

Les coûts d'investissement sont évalués à 600 €/kW en 2012 [8], pour une durée d'amortissement retenue de 30 ans. En considérant des coûts d'exploitation représentant environ 2% du capital initial par an, le coût complet de production d'un MWh à l'aide de cette technologie est estimé à 202 €environ.

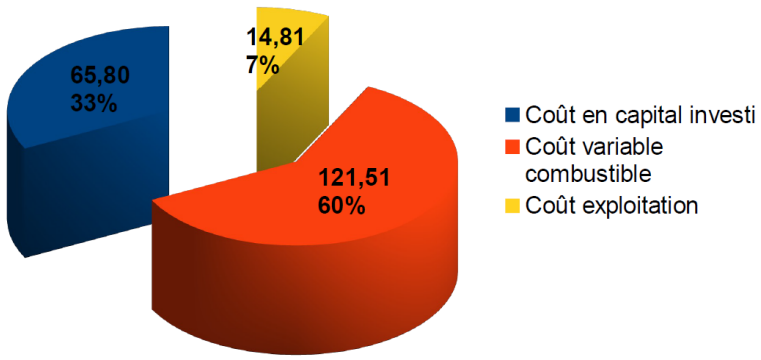

FIGURE 3.5 – Décomposition du coût complet unitaire de production des TAC

8. Les estimations de ces coûts sont plus rares, nous nous appuyons sur des dires d'experts.

Alors que les investissements initiaux sont peu rentabilisés par la faible durée d'utilisation des TAC (quelques centaines d'heures par an), nous pouvons noter que le coût en combustible représente le double du coût du gaz. De plus, la part prépondérante du coût du combustible (64%) dans le coût complet de production de cette technologie (cf. figure 3.5) laisse transparaître une forte sensibilité des coûts de production au prix du CO2 mais aussi au prix du pétrole, sur lequel des tensions liées à la raréfaction de la ressource laissent présager des hausses de prix dans le futur. Dans la perspective d'analyse de rentabilité économique de ce chapitre, nous laisserons dorénavant de côté le cas des TAC, du fait de leur usage très marginal dans le mix français.

3.3.4 Energies Renouvelables

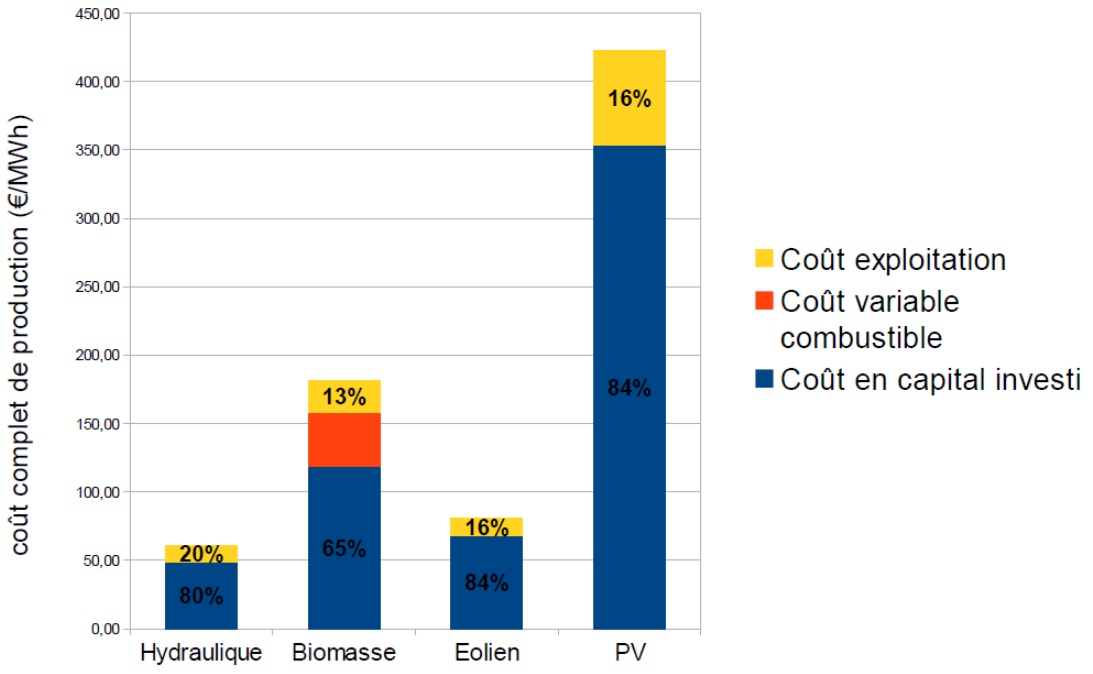

FIGURE 3.6 – Décomposition du coût complet unitaire de production des ENR

La décomposition des coûts complets de production par MWh est représentée dans la figure 3.6. Il en apparaît que les coûts des moyens de production ENR se caractérisent par une part prépondérante relative à l'investissement (entre 65% et 85%), en particulier pour les technologies éoliennes et photovoltaïques. Le coût de référence ainsi retenu sera fortement dépendant du taux d'actualisation retenu, puisque le planificateur peut difficilement influer sur les durées d'utilisation qui dépendent de conditions météorologiques exogènes.

Hydraulique

La filière hydraulique représente la part la plus importante des ENR dans le mix électrique français : 9.3% de la production totale d'électricité, alors que le reste des technologies

ENR totalisent quant à elles 3.5% de la production. N'utilisant pas de "combustible" autre que les courants aquatiques, le coût complet associé à cette technologie dépend presque exclusivement des coûts en investissement. L'estimation de ces coûts est quelque peu délicate puisqu'ils varient de manière très importante en fonction du site d'implantation [9]. Nous avons donc retenu une valeur moyenne de 1200 €/MW installé, comparable au coût de l'éolien terrestre. La durée de vie retenue pour une installation est beaucoup plus élevée que pour les autres technologies, puisque ce type d'installation est conçu pour durer une centaine d'années. Le coût complet associé à la filière hydraulique s'établit donc à 60 €/MWh, ce qui signifie que cette technologie est très largement compétitive avec les centrales à combustibles fossiles mais peut également être compétitive économiquement avec le nucléaire.

Eolien terrestre

La technologie éolienne terrestre est maintenant proche de la maturité et largement diffusée dans le monde. Il convient de préciser que pour cette technologie, la durée de vie et les coûts d'exploitation devraient évoluer favorablement avec le développement à grande échelle de la filière en Europe. Les coûts d'investissement sont évalués à 1200 €/kW en 2012 [10], pour une durée d'amortissement retenue de 20 ans. En considérant des coûts d'exploitation représentant environ 2% du capital initial par an, le coût complet de production d'un MWh à l'aide de cette technologie est estimé à 81 €environ, ce qui place cette technologie avant les centrales à combustibles fossiles en termes de rentabilité économique (sauf que les éoliennes ne sont pas dispatchables.

Biomasse, biogaz et incinération des déchets

Cette catégorie regroupe plusieurs technologies de production décentralisées, dont la biomasse essentiellement, mais également les usines d'incinération des ordures ménagères et le biogaz. C'est donc la seule catégorie d'ENR pour laquelle la production d'électricité provient de la transformation de combustibles. Dans ce cas, la part du capital dans le coût complet est relativement moins importante que pour les autres catégories. C'est donc la technologie ENR qui sera la moins sensible aux variations du taux d'actualisation.

Photovoltaïque

Le photovoltaïque a fait l'objet de nombreuses politiques de soutien dans plusieurs pays, et en particulier en France avec l'instauration de tarifs de rachat afin d'inciter au développement de cette technologie. Alors que les coûts d'investissement sont actuellement très élevés (technologie non mature) et évalués à 2800 €/kW en 2012 [11], il convient de préciser tout comme pour la filière éolienne que les effets d'apprentissage et les gains d'échelle devraient pousser ce coût à la baisse dans les années à venir. La durée d'amortissement retenue est de 20 ans. En considérant des coûts d'exploitation représentant environ 2% du capital initial par an, le coût complet de production d'un MegaWattheure à l'aide de cette technologie est estimé à 422 €environ. Ce coût très élevé, comparativement aux autres technologies de production, place la technologie photovoltaïque à la dernière place du classement des moyens de production en termes de rentabilité. Cela étant, cet écart de coût

9. A titre d'exemple, la plage de valeur proposée par Jancovici couvre un intervalle allant de 600 à 5000 €/MW

10. Jancovici estime ces coûts à environ 1000 € par MW installé. La Commission Energies 2050 retient une hypothèse de 1200 €/kW.

11. Jancovici estime ces coûts compris entre 1500 et 4000 € par MW installé.

devrait se résorber fortement dans les années à venir avec les progrès techniques attendus pour cette technologie.

Le panorama des coûts de production de référence établi sur l'année 2011 a fait apparaître que le coût du financement a un impact significatif sur la rentabilité des technologies ENR, alors que le fonctionnement des centrales à combustible fossile dépend, quant à lui, essentiellement du prix des combustibles et du CO2. Les analyses de sensibilité réalisées ont été effectuées sans considération des caractéristiques de la demande d'électricité, ni de la gestion du parc de production (ajustement des mobilisations des capacités selon une logique de merit-order). Nous nous intéressons maintenant à un scénario prospectif des différents coûts de production à un horizon de moyen-terme tel que 2030 afin d'étudier les impacts de différents scénarios de combinaisons coût du capital/prix du CO2 sur les décisions d'investissement du secteur. Nous montrerons en particulier l'importance de revoir la méthodologie de calcul des coûts en intégrant les modifications de demande et de mobilisation des capacités générées par les impacts macroéconomiques des différentes hypothèses de prix du CO2.

3.4 Une évaluation de la rentabilité des investissements : projection des coûts de production à l'horizon 2030

La méthode traditionnelle d'évaluation de la rentabilité des investissements repose sur un calcul de Valeur Actualisée Nette des projets sur leur durée de vie T :

$$VAN = \sum_{t=0}^{T} \frac{CF_t}{1 + CMPC_t} - I_0$$

où I_0 représente l'investissement initial, et CF_t le flux de revenus à la période t. Dans le cas d'un projet de construction d'une unité de production d'électricité, ces flux seront déterminés par l'écart entre le prix de vente de l'électricité et le coût variable unitaire, plus communément appelé rente infra-marginale, cette rente étant ensuite multipliée par la quantité d'électricité produite pendant cette période. Cependant, il est particulièrement difficile de prévoir la trajectoire du prix de vente de l'électricité, puisque de nombreuses incertitudes pèsent sur la formation de ce prix dans le futur. Celui-ci dépendra en particulier du contexte législatif national (degré de régulation des marchés, existence ou non de tarifs de rachat pour certaines technologies comme c'est le cas actuellement pour la filière photovoltaïque) et du contexte électrique européen (intégration des marchés entre pays et renforcement des interconnexions). C'est pourquoi ce sont les prévisions d'évolution des coûts de production qui sont le plus souvent retenus dans la littérature en tant qu'indicateur de la rentabilité des investissements ou non. Nous retiendrons cette approche dans la mesure où il semble que ces projections des coûts et leur sensibilité à différents risques représentent un indicateur éclairant les décisions d'investissement du secteur.

De façon similaire à la méthode suivie dans la section précédente, nous reconstruisons les coûts complets de production par technologie à l'horizon 2030 (moyen-terme) en nous appuyant sur le scénario médian proposé par RTE (Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande de 2011) en terme de dimensionnement et de mobilisation du parc de production électrique. Ce scénario s'appuie sur une hypothèse de croissance moyenne du PIB de 1.5%

par an d'ici à 2030. La demande totale d'électricité correspondante s'établit alors à 627 TWh, avec une hypothèse d'élasticité de la consommation d'électricité au PIB de 0,5 [12]. Le tableau en annexe 15 recense les hypothèses retenues pour les capacités et les durées d'utilisation des différentes unités de production pour satisfaire la demande. Les hypothèses de prix associées à ce scénario prospectif ne sont pas communiquées par RTE, nous retenons donc à défaut les projections publiées par l'AIE dans son scenario "New Policies" qui sont spécifiées dans le tableau 3.7 suivant. Les prix des combustibles issus de l'AIE étant stipulés en $ 2011, ils sont convertis en € 2011 à l'aide du taux de change 2011 : 1€=1,3 $. Nous retenons également pour ce compte de référence un taux d'actualisation à 7,96% (similaire à 2011).

Prix CO2	Prix Charbon	Prix Gaz	Prix Pétrole	Uranium
31€/tCO2	88€/t	9€/MBtu	95€/b	52$/lb

TABLE 3.7 – Hypothèse de prix des combustibles fossiles et du CO2 en 2030 - AIE (scénario New Policies)

Le calcul des coûts variables associés aux centrales thermiques à combustibles fossiles, selon la méthode expliquée dans la section précédente, conclut à un coût variable de 62€ par MWh électrique pour les centrales à charbon, 75€ par MWh pour les centrales à gaz et 174€ pour les turbines à combustion au fioul. Cependant, le mix électrique supposé par RTE repose sur une utilisation plus importante des centrales à gaz que des centrales à charbon, ce qui est incompatible avec les hypothèses de prix issues des prévisions AIE. Nous reconstruisons donc des durées d'appel des différentes centrales qui soient cohérentes avec ces hypothèses de prix sur les combustibles fossiles, dans la logique du «merit order» que mettraient en œuvre les exploitants des parcs électriques. Les données retenues pour le mix électrique de ce compte de référence sont alors recensées dans le tableau 3.8 suivant.

12. La littérature retient en général une valeur de cette élasticité comprise entre 0,3 et 0,6.

	Fissile	**Thermique à combustion fossile**			**Énergies Renouvelables**					**Total**
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	Eolien offshore	PV	
Capacités installées (GW)	65	2,9	10,9	8,8	25,2	2,6	22	10	18	**165**
Énergie produite (TWh)	426	13	18	1	69	15	44	23	18	**627**
Part dans le mix électrique	68%	2%	3%	0%	11%	2%	7%	4%	3%	**100%**
Durée d'utilisation (h/an)	6554	4483	1651	114	2738	5769	2000	2300	1000	

TABLE 3.8 – Données sur le mix électrique en 2030 - RTE scenario median

3.4.1 Mix électrique et coûts complets de production en 2030

La figure 3.7 représente l'évolution du mix électrique entre 2012 et 2030 supposée par RTE. Si la filière du nucléaire assure une production stable en termes de TWh (421 TWh en 2011 pour 426 TWh en 2030), sa part dans le mix électrique diminue de 10%. L'utilisation des centrales thermiques à combustibles fossiles est supposée se contracter d'ici à 2030, avec une quantité d'électricité produite diminuée de 30% en 2030 par rapport au niveau de 2011. La croissance de la demande d'électricité entre 2011 et 2030 sera donc assurée par la mobilisation de technologies ENR. Cette augmentation de capacité et de mobilisation des ENR est essentiellement portée par le développement de l'éolien terrestre (dont la part dans le mix passe de 2% en 2011 à 7% en 2030), du photovoltaïque (part inférieure à 1% en 2011 devenue 3% en 2030), mais aussi par l'apparition de l'éolien offshore (à hauteur de 3% de la production totale en 2030), alors que la part de l'hydraulique reste quasiment stable.

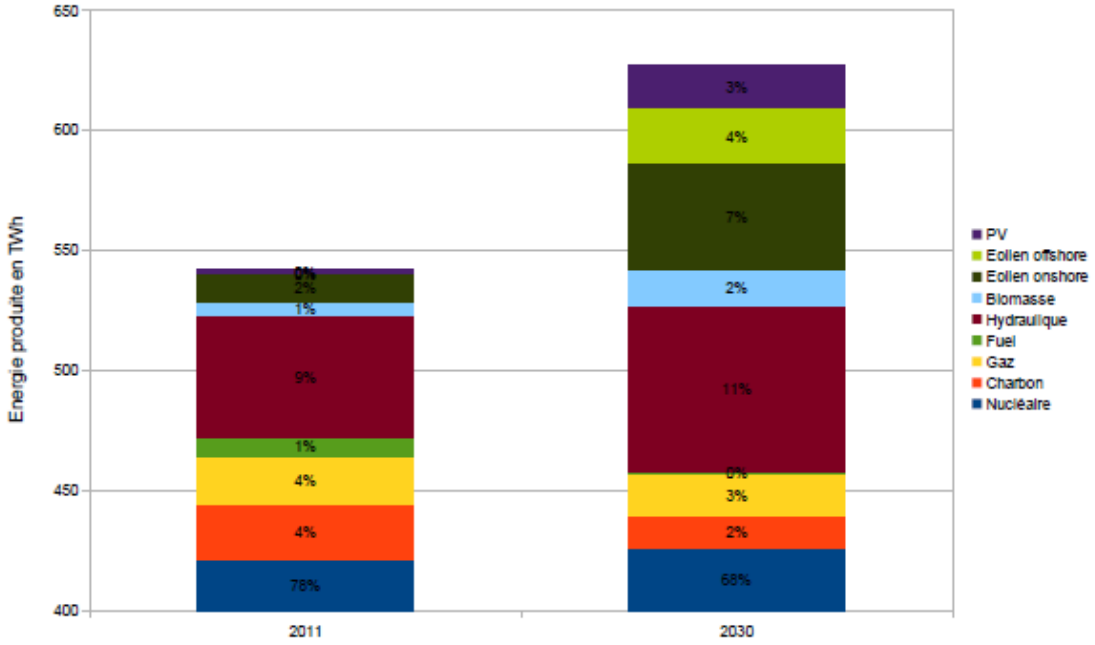

FIGURE 3.7 – Evolution du mix en production électrique entre 2011 et 2030

La reconstruction des coûts complets de production par MWh en 2030 est détaillée dans le graphe 3.8 et aboutit à un coût moyen de l'électricité de 72 € /MWh ce qui équivaut à une augmentation de près de 20% de ce coût moyen entre 2011 et 2030.

Nous retrouvons dans ce graphe, les principales caractéristiques des coûts évoquées dans la section précédente, à savoir une forte part du coût en capital dans le coût complet unitaire des technologies ENR, à l'inverse des technologies à combustibles fossiles dépendant plutôt du prix taxé des combustibles. Il est alors intéressant d'observer comment la modification de certains paramètres tels que le taux d'actualisation et le prix du CO2 peuvent influer différemment sur la rentabilité des technologies.

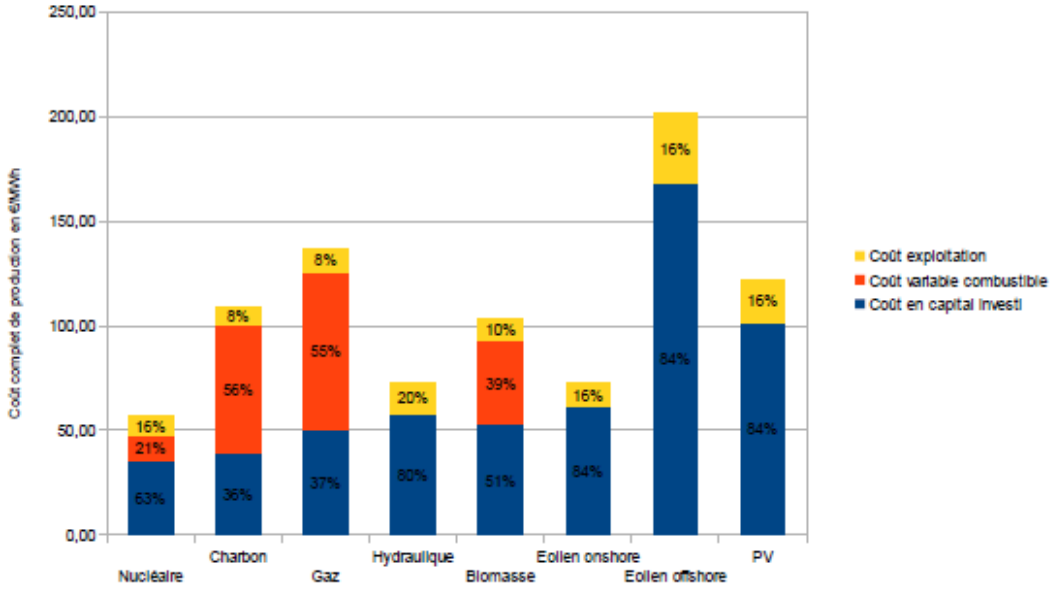

FIGURE 3.8 – Coût complet de production en € par MWh en 2030

3.4.2 Impact de la hausse du coût du capital.

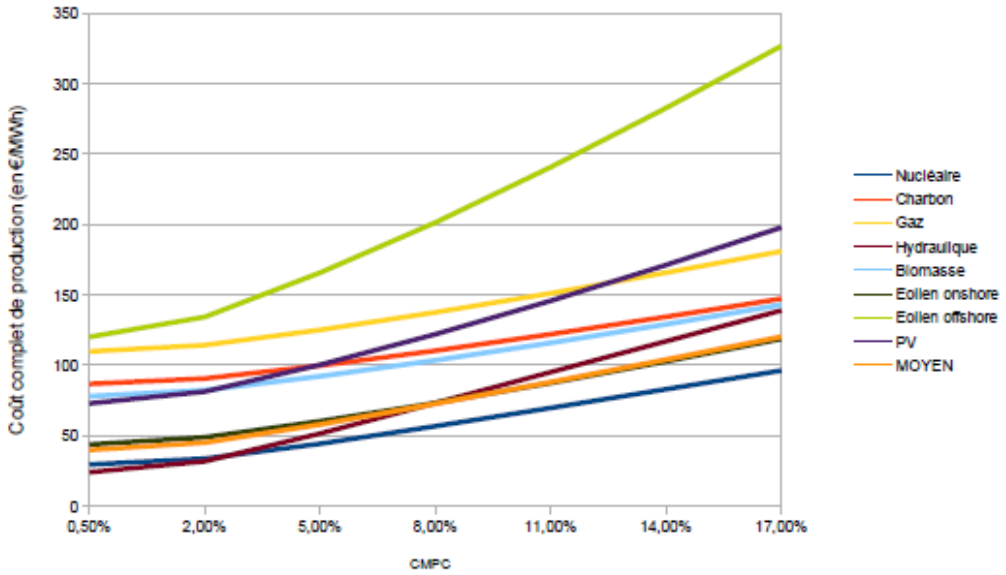

FIGURE 3.9 – Impact du taux d'actualisation sur coût complet de production en € par MWh en 2030

Le graphique 3.9 illustre les variations de coûts complets de production pour différentes technologies en fonction de différentes valeurs du coût moyen pondéré du capital. Les différentes courbes de coûts et leurs inflexions plus ou moins importantes suggèrent une élasticité du coût complet au taux d'actualisation qui est différente pour chaque technologie. En réalité, cette élasticité dépend de la part initiale du coût du capital dans le

coût complet de production. Ainsi, pour des technologies ENR, pour lesquelles les coûts en capital représentent jusqu'à 85% du coût complet, la sensibilité du coût de production au CMPC sera plus élevée. Il apparait en particulier dans ce graphe que la sensibilité du coût de production du nucléaire au taux d'actualisation est relativement moins importante que celle de technologies telles que l'éolien offshore ou le photovoltaïque.

Impact d'une hausse du coût moyen pondéré du capital : pas d'impact opérationnel mais une augmentation du coût de revient du MWh produit en particulier dans la filière ENR. Pour un parc électrique déjà installé, la variation du coût du capital n'a pas d'effet sur la stratégie de mobilisation des capacités, car elle s'établit uniquement sur le classement des différents coûts variables (logique de «merit order») qui ne sont pas affectés dans ce cas. En revanche, dans une logique d'investissement, ce graphique illustre que le coût de revient du MWh produit augmente avec le CMPC, dans des proportions différentes selon les technologies. Ainsi, l'augmentation d'un point de base du taux d'actualisation représente une hausse du coût de production unitaire compris entre 3 et 5 € pour les centrales nucléaire, à gaz et à charbon, mais également pour des technologies ENR comme l'éolien terrestre ou la biomasse. En revanche, l'ordre de grandeur est différent pour le reste des technologies puisque cette hausse du CMPC se répercuterait sur le coût de production unitaire à hauteur de 7 € pour l'hydraulique, 8 €pour le photovoltaïque et enfin 13 €pour l'éolien off-shore.

Dans une perspective d'investissement productif : un effet d'éviction sur certaines technologies ENR. Comme nous l'avons évoqué précédemment, une hausse du coût du capital n'a pas les mêmes conséquences pour toutes les technologies en termes de rentabilité. Le graphe 3.9 illustre en particulier des effets d'inversion dans la préférence de technologies selon les projections de taux d'actualisation réalisées. En particulier, dans un cas où les investisseurs anticiperaient une valeur particulièrement faible (inférieure à 2%) du taux d'actualisation, la technologie hydraulique devrait être préférée au nucléaire dans la mesure où des nouveaux sites hydrauliques seraient encore disponibles en France, ce qui n'est pas vraiment le cas. En revanche, pour des valeurs plus probables de ce taux d'actualisation situées autour de 8 %, le graphique laisse cette fois-ci apparaître un arbitrage entre cette même technologie hydraulique et l'éolien terrestre dont la rentabilité sera relativement moins affectée par les fluctuations du CMPC. Ainsi, dans des pays où il existe un risque sur le coût du capital (pays émergents par exemple), il vaudrait mieux orienter les décisions d'investissement vers la filière éolienne plutôt que celle de l'hydraulique. Enfin, les enseignements de ce graphique auraient tendance à disqualifier franchement certains types d'investissements, en particulier l'éolien offshore, qui n'est pas compétitif en termes de coûts avec les autres moyens de production et s'avère de plus très sensible au taux d'actualisation. Selon ce graphique, la filière photovoltaïque serait elle aussi délaissée lorsqu'il existe un risque de pression à la hausse.

L'existence de pression à la hausse sur le coût du capital aurait donc tendance à décourager les investissements en ENR, et plus particulièrement dans des filières moins matures telles que l'éolien off-shore ou le photovoltaïque. Il convient, de plus, de noter que ces résultats s'appuient sur des calculs supposant un taux d'actualisation identique pour toutes les technologies. Dans la pratique, ce taux d'actualisation devrait être supérieur pour les technologies renouvelables peu matures car une prime de risque technologique lui est inté-

grée. Ainsi, l'effet d'éviction sur les technologies ENR évoqué précédemment pourrait être encore plus prononcé.

3.4.3 Impact de la hausse des prix CO2 et importance de la prise en compte d'une modification du «merit order».

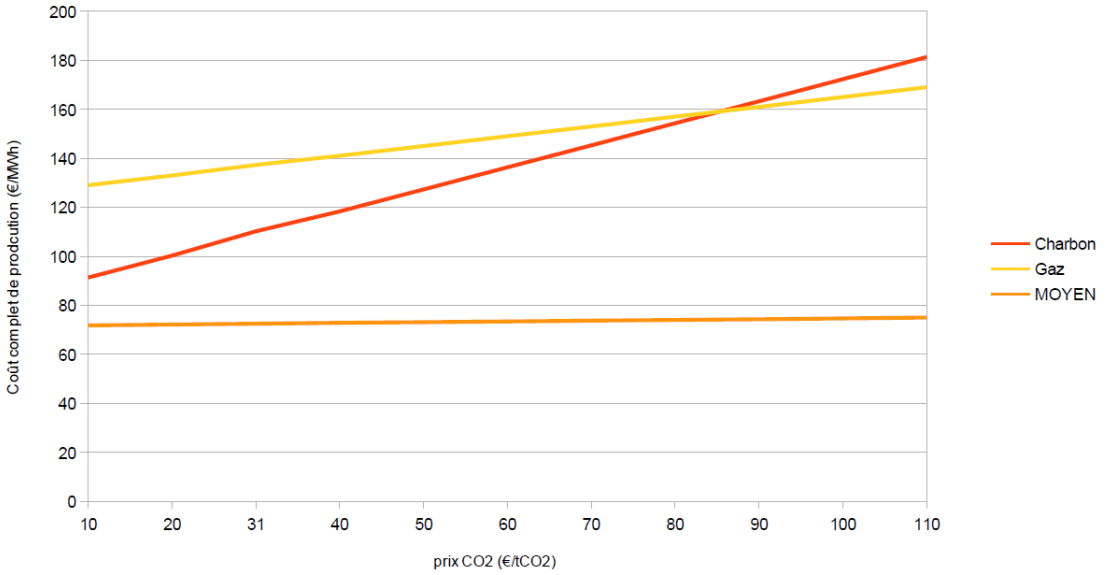

FIGURE 3.10 – Impact du prix du CO2 sur le coût complet de production en € par MWh en 2030

Le graphique 3.10 montre l'influence d'une variation du prix du CO2 sur les coûts complets de production, *toutes choses égales par ailleurs*, c'est à dire sans modification des durées d'appel des différentes technologies. Seules les technologies thermiques à combustible fossile sont affectées puisque le prix du CO2 est internalisé dans le coût total du pétrole, gaz et charbon. De plus, la part de ces centrales dans le mix électrique étant faible, le prix du CO2 s'avère au final avoir un impact assez négligeable sur le coût *moyen* de production, comparativement à une variation du CMPC illustrée précédemment. Le coût de production des TAC à fioul étant initialement très élevé relativement aux autres technologies fossiles, l'augmentation du prix du CO2 ne fait qu'accentuer ce coût de revient. Nous ne le représentons pas dans le graphique pour des raisons d'échelle de représentation des coûts.

Pour un parc de production existant : un impact opérationnel dont il faut tenir compte. La variation des rapports relatifs entre prix du charbon et du gaz a, contrairement au coût du capital, un impact sur la mobilisation du parc de production existant. En affectant puis en inversant le "merit order" entre ces deux technologies, les exploitants des parcs réajustent en réalité les durées d'appel de ces deux types de centrale. Les études sur les coûts de référence du secteur électrique, en raisonnant à durées d'appel inchangées,

n'internalisent traditionnellement pas le rebouclage sur la mobilisation générée par la variation du "merit order". Ainsi, le graphe 3.10 a tendance à biaiser les résultats de coûts à la hausse, avec un point d'inversion des coûts variables entre les deux technologies gaz et charbon qui est compris entre 80 et 90 €/tCO2. Tenir compte des modifications des durées d'appel (pour une production totale inchangée) générée par l'évolution du "merit order" modifie ce point de retournement : nous illustrons dans le graphe 3.11 que ce rebouclage opérationnel a une influence sur le coût moyen de production réel. Le point d'inversion des rapports entre coûts variables est en réalité situé autour de 50 €/tCO2. Tenir compte des modifications des durées d'appel des différents moyens de production permet notamment d'évaluer l'impact réel du prix du CO2 sur le coût moyen de production, qui est inférieur de quelques centimes d'euros par MWh au coût estimé dans un cas traditionnel sans rebouclage (cf. graphe 3.10).

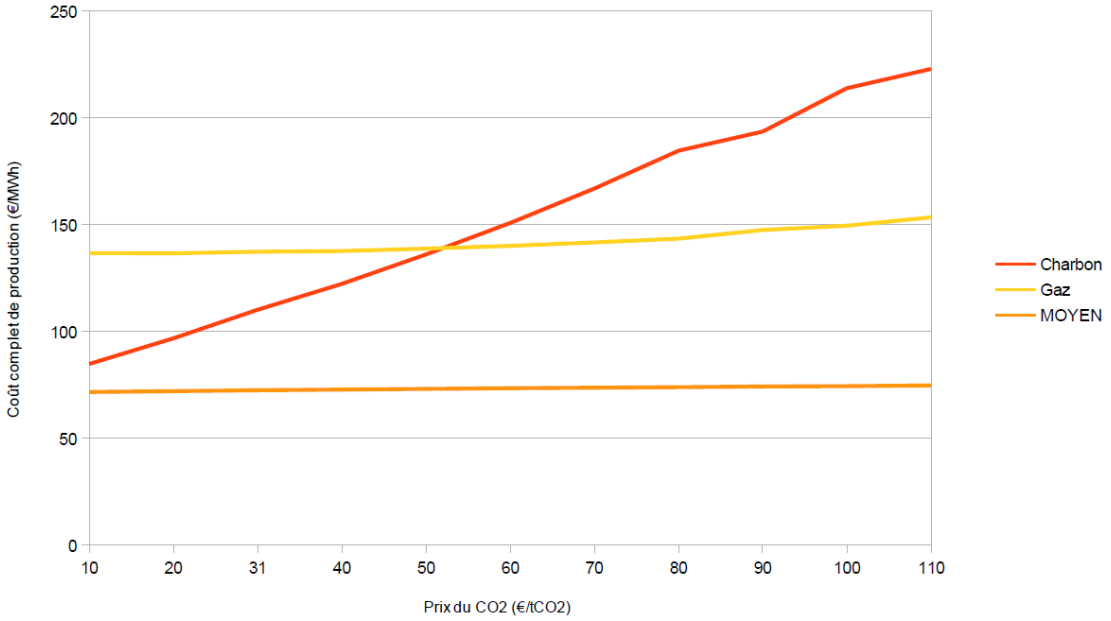

FIGURE 3.11 – Impact du prix du CO2 sur le coût complet de production en € par MWh en 2030, avec modification de la stratégie opérationnelle d'appel des centrales

Dans une perspective d'investissement productif : une moindre rentabilité des centrales thermiques à combustibles fossiles. Selon la force du signal-prix CO2, les investissements productifs devraient s'orienter vers des technologies de type nucléaire ou ENR dont les coûts de production seront moins élevés. Cependant, il parait délicat d'envisager une éviction totale de ces moyens de production à moyen-terme, en particulier parce que les centrales à gaz et charbon sont nécessaires pour des raisons de flexibilité (production de semi-base et pointe).

L'étude de ce scénario énergétique prospectif à l'horizon 2030 nous a permis d'illustrer l'importance du coût de financement sur les décisions d'investissement qui seront réalisées dans le moyen-terme. Nous avons également montré l'intérêt d'adopter une vision plus bouclée de la sensibilité des coûts de production, en particulier dans le cas du prix du CO2 qui affecte le "merit order", en intégrant explicitement la stratégie opérationnelle de production d'électricité, contrairement à l'approche traditionnelle des coûts. Nous poussons

dorénavant plus loin cette approche en intégrant ce parc électrique dans un contexte macroéconomique de politique climatique qui influera sur la demande totale et sur les coûts de financement. Nous montrerons en particulier que les objectifs implicitement poursuivis par la politique climatique (efficacité économique ou remboursement de la dette publique) influeront différemment sur les décisions d'investissement du secteur.

3.5 Réforme fiscale climatique et impacts sur les coûts de production : une projection à l'horizon 2030

La construction du scénario 2030 développé précédemment a consisté à combiner les données sur le dimensionnement du parc de production à l'horizon 2030 correspondant à une certaine hypothèse de croissance avec les prix relatifs à l'énergie issus de l'AIE. Etant donné l'absence de prise en compte explicite du prix du carbone dans l'étude de RTE, il y a toutes les raisons de penser que les effets d'interaction entre le prix du carbone, la croissance (ou tout du moins le PIB) et les taux d'intérêts n'ont pas été internalisés dans ce scénario. Pourtant, les deux premiers chapitres de cette thèse ont mis en évidence que l'introduction d'une taxe (ou d'un prix) carbone assise sur la consommation d'énergie fossile a bien des effets sur l'activité économique. De plus, cette taxe carbone a pour avantage de générer des recettes à disposition de l'État qui peut décider de les affecter au remboursement de la dette, mais aussi de les réinjecter dans l'économie afin de limiter les impacts négatifs de la politique climatique. Dans cette perspective de minimiser les coûts associés à la politique climatique, c'est la réduction des charges sur le travail (cotisations sociales employeurs ou salariés) qui est privilégiée dans le cas français. En revanche, le niveau élevé d'endettement public de l'État (90% du PIB en 2012) pouvant impacter les taux d'intérêts longs à la hausse, et *in fine* le coût de financement des investissements, peut laisser présager que les recettes additionnelles générées par la taxe carbone seraient intégrées au budget de l'État pour réduire le déficit public.

Les interactions entre prix du carbone, PIB, endettement et donc taux d'intérêt en fonction de différents designs de réforme fiscale envisagée seront donc explicitement intégrés au cadre de référence précédemment exposé, dans l'objectif d'en étudier les conséquences sur les coûts de production en 2030, qui éclaireront les choix d'investissement dans le secteur électrique. La quantification de ces interactions passera par l'utilisation du modèle macro-économétrique "Oxford Economic Forecasting" (OEF), dans lequel le taux d'intérêt long est endogène et dépend en partie du niveau d'endettement de l'État français.

3.5.1 Bouclage économique et correction du scénario de référence 2030

Le cadre de référence défini précédemment pour l'horizon 2030 n'intégrait pas les effets de rebouclage macroéconomique liés à la politique climatique sous-jacente à l'étude. Nous cherchons donc dans un premier temps à étudier les impacts relatifs d'une trajectoire de prix du carbone partant de 12€/tCO2 en 2011 pour atteindre 30€/tCO2 (prix AIE) en 2030 sur l'économie française à cet horizon. Nous retenons d'abord comme hypothèse que l'État ne réinjecte pas les recettes de cette taxe CO2 dans l'économie et choisit de réduire son déficit. Nous transposerons ensuite ces variations aux hypothèses de PIB et de CMPC présentes dans la section précédente.

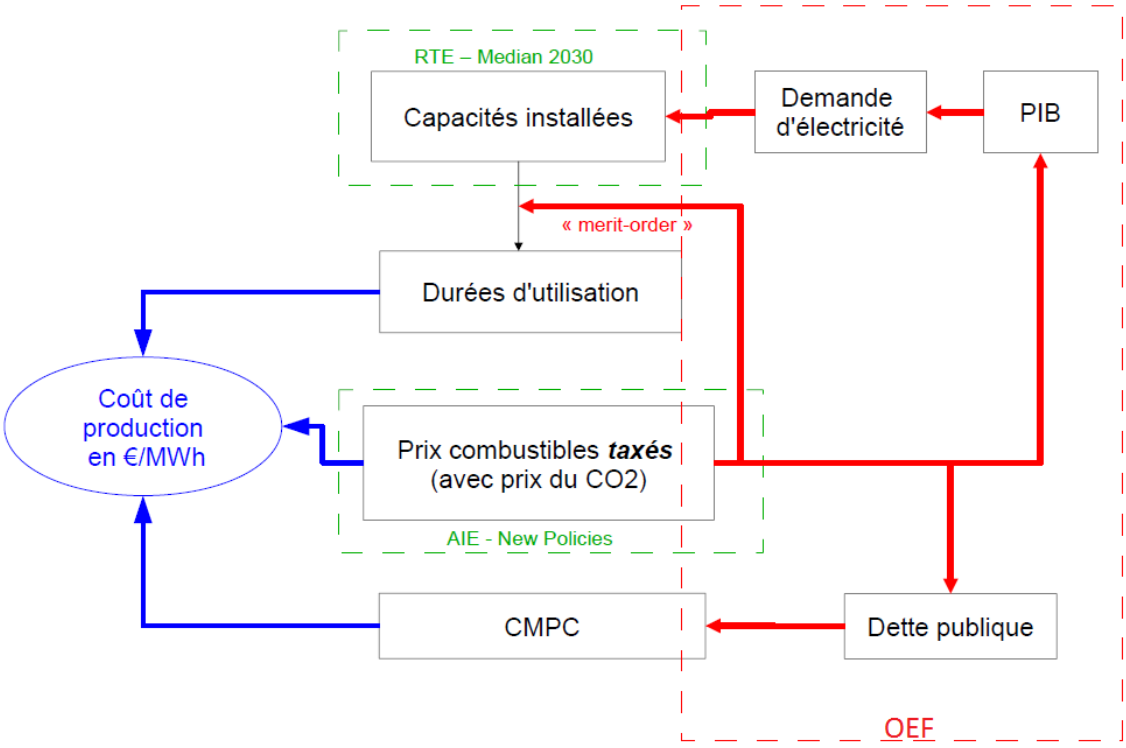

FIGURE 3.12 – Bouclage macroéconomique et coûts complets de production

Les simulations réalisées à l'aide du modèle OEF s'appuient sur un scénario comprenant la trajectoire du prix du carbone précédemment évoquée comparé à un scénario de référence Business as Usual (BaU) dans lequel il n'existe pas de prix du carbone. A l'horizon 2030, l'instauration d'un prix du CO2 aurait donc pour effet une diminution du PIB de 0,23% par rapport au cas BaU. L'utilisation des recettes additionnelles pour réduire en partie le déficit public, et donc la dette, a pour effet de pousser à la baisse le taux d'intérêt long français de 1,3% par rapport au BaU. La mise en place d'une taxe carbone sert bien évidemment à inciter à la réduction des Gaz à Effet de Serre, mais recouvre aussi dans ce cas la fonction salvatrice de générer des recettes fiscales.

Les résultats en termes de variations du PIB et de taux d'intérêt évoqués ci-dessus sont alors transposés aux variables d'entrée du secteur électrique : RTE fondait son scénario sur une élasticité de la consommation d'électricité à la croissance de 0.5. Avec l'hypothèse de croissance 2011-2030 retenue (+1.5%), ceci revient à un contenu électrique en 2030 de 0.26 TWh par Md€de PIB. Les résultats sont répertoriés dans le tableau 3.9.

	PIB 2030 (en Md€)	Consommation d'électricité (en TWh)	Taux d'intérêt long France	CMPC
Sans bouclage OEF	2405	627	3,7%	7,96%
Avec bouclage OEF	2399	**625**	3.65%	**7,92%**

TABLE 3.9 – Révision du scénario 2030 (RTE) avec bouclage économique (OEF)

La perte des 2 TWh de production est supportée par la dernière technologie du "merit

order", c'est à dire le moyen de production avec le coût variable le plus élevé. Sous nos hypothèses de prix des combustibles, il s'agit donc des centrales thermique à gaz [13]. Les coûts complets de production sont alors recalculés avec ces nouvelles hypothèses (-2 Twh de production, CMPC de 7.92%) et les coûts obtenus sont répertoriés dans le tableau 3.10. Le nouveau coût unitaire moyen de production est inférieur de 30 centimes d'euro par rapport au coût moyen calculé dans le scénario sans bouclage économique. En particulier, la baisse du CMPC liée à la réduction de la dette publique, induit des coûts inférieurs (entre -0,1% et -0,6%) par rapport aux coûts évalués sans bouclage économique pour toutes les technologies sauf pour les centrales à gaz, dont le coût de production a augmenté de 5%. Cet effet est essentiellement dû à la baisse de la durée d'utilisation qui est réalisée avec cette technologie du fait de la baisse de la consommation.

13. Comme précisé dans la section précédente, les TAC au fioul sont techniquement les technologies qui occupent la dernière place du "merit order" mais la production résiduelle de 1 TWh en 2030 assurée par cette technologie est incompressible (production d'extrême pointe).

	Fissile	**Thermique à combustion fossile**			**Énergies Renouvelables**				
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	Eolien offshore	PV
Coût en capital investi	35,41	39,33	57,04	504,26	57,88	52,65	60,75	167,28	101,25
Coût variable combustible	12,00	60,73	75,01	173,65	0	40	0	0	
Coût exploitation	8,85	8,92	12,26	114,40	14,61	10,40	12	33,04	20
Coût complet	56,26	108,98	144,32	792,32	72,49	103,05	72,75	200,32	121,25

TABLE 3.10 – Coût complet de production [€/MWh] scénario RTE median 2030 avec bouclage économique

Bien que les écarts observés entre les coûts avec ou sans bouclage économique restent d'ampleur limitée (moins de 1% de variation en général), la réalisation de cet exercice nous permet de mettre en avant un effet qui aura son importance dans la gestion des politiques climatiques pour les États : le recyclage de recettes et la gestion de l'endettement. Puisque les coûts de production sont finalement assez peu sensibles au prix du CO2 comparé à la sensibilité au CMPC, il apparait que le signal déclencheur des investissements sera incarné dans une plus forte mesure par le coût du financement que par le prix du carbone. Afin d'illustrer cet effet, nous étudions dorénavant le cas d'une politique climatique plus volontariste, où le prix du CO2 est représentatif des objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre que le gouvernement souhaite atteindre : c'est typiquement le cas d'une valeur tutélaire du carbone définie par la Commission Quinet.

3.5.2 Réforme fiscale climatique s'appuyant sur la valeur tutélaire du carbone.

En 2008, le Centre d'Analyse Stratégique avait réuni en France une commission d'experts présidée par Alain Quinet, afin de proposer une trajectoire du prix du carbone permettant de respecter les objectifs de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre définis pour 2020 (moyen terme) et pour 2050 (long terme). Le point de passage défini en 2020 (-20% de réduction des émissions *a minima* par rapport à 1990) devrait placer le pays sur la trajectoire du "facteur 4" visé en 2050 (-75% de réduction des émissions par rapport à 2005). Le prix du CO2, valeur duale associée à cette trajectoire d'émissions, retenu par cette Commission et internalisé dans l'évaluation des politiques publiques est supposé s'établir à 100€/tCO2 en 2030. Le contexte économique a profondément changé depuis 2008, et les réductions d'émissions de CO2 à horizon 2020 pourraient être spontanément réalisées du fait au ralentissement économique. Le rapport "trajectoire 2020-2050" [12] stipule que cette tendance naturelle à la réduction des émissions ne permet absolument pas d'atteindre l'objectif du "facteur 4" en 2050, même en tenant compte d'hypothèses pessimistes sur la croissance économique dans les prochaines décennies. On ne peut exclure que l'État ne revienne d'ici 2030 à la trajectoire de prix préconisée pour atteindre l'objectif de réduction des émissions à l'horizon 2050.

Nous examinons alors le cas où le prix du carbone s'établirait à 100€/tCO2 en 2030, pour les mêmes hypothèses de prix des combustibles et de capacités installées du parc électrique que précédemment. De nouveau, nous implémentons cette trajectoire du prix du CO2 avec le modèle OEF et nous considérons deux hypothèses alternatives de recyclage des recettes : une utilisation des recettes afin de réduire le niveau de dette publique (Réforme 1) et une réinjection de ces recettes sous forme de réduction des charges pesant sur le travail (Réforme 2). La première réforme vise donc à privilégier l'assainissement des finances publiques et à laisser l'économie supporter le coût de la politique climatique. En revanche, la seconde réforme envisagée cherche à minimiser les pertes économiques liées à la taxation des énergies fossiles et à éventuellement générer un double-dividende : la réduction des cotisations sociales est dans cette perspective la contrepartie optimale à la taxation du CO2 (cf. chapitre 1). Les résultats quantifiés sur les interactions entre prix du CO2, PIB et taux d'intérêt sont comparés au scénario de référence 2030 qui comprend le bouclage économique (défini ci-dessus) et sont recensés dans le tableau 3.11.

	Impacts sur le PIB	Variation des taux d'intérêt longs
Réforme 1	-0,5%	-3%
Réforme 2	-0,3%	+5,4%

TABLE 3.11 – Impacts des réformes fiscales avec prix du carbone à 100€/tCO2 (écart en % de variation par rapport au scénario 2030 corrigé)

En utilisant les recettes fiscales liées à la taxe CO2 pour rembourser une partie de la dette publique plutôt qu'en réduisant les charges sur le travail en contrepartie, la réforme 1 fait subir à l'économie un impact négatif plus important que la Réforme 2. En revanche, l'impact de la réforme 2 sur le PIB est également négatif, bien que plus faible que dans le premier cas, ce qui signifie que le ratio dette/PIB augmente dans ce cas et pousse les taux d'intérêt longs à la hausse. Nous remarquons que la Réforme 2, bien que minimisant les pertes d'efficacité économiques par rapport à la première réforme, ne permet pas de générer un double-dividende [14]. En revanche, la perte de PIB dans la réforme 1 est compensée par la réduction possible d'une partie de la dette, ce qui signifie que le ratio d'endettement diminue, ainsi que les taux d'intérêt longs. Les variations des données économiques et financières précédentes se traduisent en termes de demande totale de consommation et de CMPC. De plus, avec un nouveau prix du carbone s'élevant à 100€/tCO2, contre 30€/tCO2 dans le compte de référence, le coût taxé du gaz devient relativement moins cher (103€/MWh) que le coût du charbon (124€/tCO2). Le «merit order» s'inverse donc entre ces deux moyens de production et nous devons ajuster les durées d'appel de ces centrales afin de respecter la stratégie opérationnelle du planificateur. Ces données sont recensées dans le tableau suivant 3.12.

	Demande d'électricité (en TWh)	CMPC	Production centrale à gaz (en TWh)	Production centrale à charbon (en TWh)
Référence	625	7,92%	16	13
Réforme 1	**622**	7,83%	24	2
Réforme 2	**624**	8,09%	26	2

TABLE 3.12 – Réformes fiscales climatiques avec prix CO2 à 100€/tCO2 et bouclage économique (OEF)

Les coûts complets de production dans ces deux scénarios sont comparés aux coûts du compte de référence et illustrés dans le graphe 3.13. Pour des raisons d'échelle, la variation du coût de production des centrales à charbon, de l'ordre de 300%, n'est pas représenté. En effet, cette technologie est doublement pénalisée par ce type de réforme : ses coûts variables augmentent avec le prix du CO2 et son coût en capital n'est plus rentabilisé que

14. Les études réalisées avec les modèles MESANGE (modèle macroéconométrique) pour le rapport "Trajectoire 2020-2050" ou avec IMACLIM (modèle hybride) concluent toutes deux à l'existence d'un double-dividende à long terme. Nos résultats peuvent en partie provenir de l'horizon de temps plus court que nous considérons. L'estimation des coûts économiques d'une taxe carbone obtenue avec le modèle OEF, bien que supérieurs aux résultats de MESANGE, ne semble pas déraisonnable dans la mesure où les simulations réalisées à l'aide de GEMINI-E3 lors de la Commission Quinet concluaient à une perte de plusieurs points de pourcentages de PIB. Enfin, l'utilisation de notre modèle OLG dans le chapitre 2 concluait également à un rejet de l'hypothèse du double-dividende.

quelques centaines d'heures par an en raison de la baisse de la demande et du changement de sa position dans le "merit order".

Quelle que soit la réforme envisagée, le coût moyen de production d'un MWh d'électricité augmente. Ce coût est essentiellement tiré à la hausse par l'augmentation des coûts de production des centrales thermiques à combustibles fossiles (gaz, charbon et fioul). Les centrales à gaz sont dans les deux réformes plus sollicitées qu'auparavant, ce qui a tendance à réduire le coût unitaire de production, mais la hausse du coût variable lié au prix du CO2 l'emporte de telle manière que le coût complet de cette technologie augmente d'environ 7 à 9% par rapport au compte de référence. En revanche l'impact des deux réformes sur les coûts des autres technologies fait apparaître un arbitrage quant au recyclage des recettes. Prioriser la réduction de l'endettement permet de faire baisser le coût de financement des investissements en moyens de production, ce qui s'avère particulièrement bénéfique pour les technologies ENR. En effet, la section précédente montrait que les filières photovoltaïque, hydraulique et éoliennes possédaient les plus fortes élasticités aux variations du taux d'actualisation (CMPC). Au contraire, la réforme qui parait la plus appropriée quant à un objectif d'efficacité économique, où les recettes sont réinjectées dans l'économie, en reportant le problème de résorption de l'endettement, ce qui pousse les taux d'intérêts à la hausse, a tendance à générer des hausses de coût de production chez les technologies ENR. Ainsi, dans un contexte d'endettement élevé, poursuivre un objectif d'efficacité économique peut désinciter les investissements en technologies faiblement émettrices.

Il semble que le signal-prix carbone atteigne son objectif incitatif puisque les deux réformes mènent à des réductions d'émissions de CO2 de l'ordre de 6 à 8 millions de tonnes de CO2, avec une réduction plus importante dans le cas de la première réforme. En réalité cette réduction s'explique par la baisse de la demande (étroitement liée à la perte d'activité), puisque nous avons supposé que les centrales à combustible fossiles supporteraient la perte de demande (au regard de leur rang dans le "merit order"). Ce raisonnement de court-terme a pourtant ses limites. La transition vers une économie moins carbonée ne peut reposer durablement sur un ralentissement de la consommation d'électricité assis sur une moindre activité économique mais doit être portée par des investissements dans des technologies moins émettrices comme les ENR. Ainsi, la Réforme 1 (réduction de la dette publique) nous semble préférable à la Réforme 2 (recherche du double-dividende), non parce que les résultats obtenus en termes de réduction d'émissions sont meilleurs, mais parce que l'évolution des coûts de production qui en découle dégage un signal positif pour l'investissement dans des technologies bas carbone.

3.5.3 Les limites de l'approche.

L'approche adoptée dans ce chapitre présente un certain nombre de limites, et les résultats présentés précédemment doivent être interprétés avec précaution. Tout d'abord, le rebouclage de l'économie sur les coûts de production unitaires via la modification de la demande de l'électricité peut paraître quelque peu approximative. Dans le cas de référence (prix du CO2 à 31€/tCO2 en 2030), la baisse de la demande à hauteur de 3 TWh par an est supposée dans notre cas être entièrement supportée par la technologie thermique à gaz (coût variable le plus élevé). En toute rigueur, une baisse de la demande d'électricité devrait être répartie sur l'intégralité de la courbe de charge annuelle : la réduction de production devrait alors être assumée par la technologie marginale (avec le coût de production le plus élevé) aux heures concernées. Si la technologie fossile à gaz est marginale environ 70% du temps sur une année, il existe des plages horaires où d'autres technologies sont marginales (le nucléaire pour certaines heures creuses la nuit par exemple). Ainsi, une partie de la baisse de

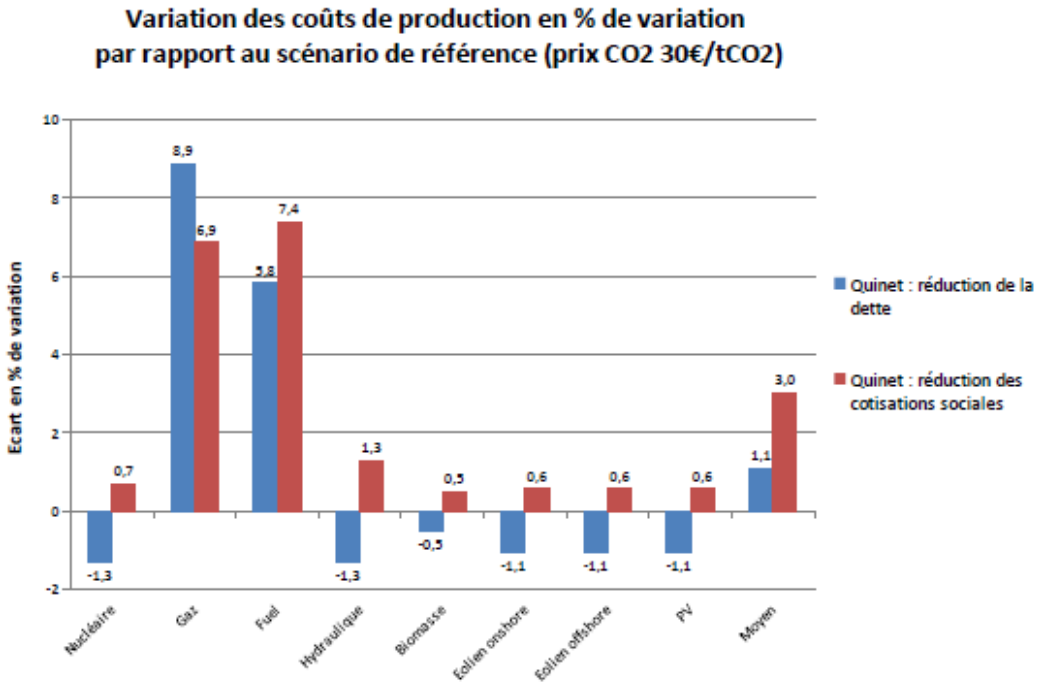

FIGURE 3.13 – Impacts des réformes fiscales climatiques (prix CO2 100€/tCO2) sur les coûts complets de production

demande devrait être en réalité supportée par les autres technologies (charbon, nucléaire). Pour des raisons de simplicité, nous avons supposé dans notre approche que la baisse de production d'électricité est intégralement assurée par la technologie majoritairement marginale sur l'année. Ceci signifie en particulier que les variations des coûts de production et des émissions de CO2 évoquées précédemment sont légèrement surestimées pour la technologie fossile à gaz (dans le cas d'un prix du CO2 faible) et pour la technologie thermique à charbon (dans le cas d'un prix du CO2 plus élevé).

D'autre part, l'utilisation d'une vision statique du parc de production installé à l'horizon 2030 limite dans une certaine mesure l'interprétation de nos résultats. En effet, nous prenons comme point de départ de notre étude des données fixes dans sur la détermination le coût unitaire de production. En réalité, ces scénarios (prix du CO2 élevé) devraient eux-mêmes interagir avec les décisions d'investissement (dans le cas de remplacement de technologies déclassées par exemple) qui affecteront les projections des capacités futures. De plus, certaines caractéristiques du développement des technologies renouvelables, comme les effets d'apprentissage, ne sont pas explicitement prises en compte dans cette projection des coûts.

Enfin, les résultats quantitatifs obtenus en termes de variation des coûts de production dans les différents scénarios étudiés, en particulier sur les ENR, sont relativement faibles (inférieurs à 1% en moyenne). Ceci est en partie dû à la faible variation du coût du financement dans les différentes réformes considérées (recyclage des recettes ou non) : l'impact sur les taux d'intérêts longs est de l'ordre de quelques dixièmes de points de base seulement, et est ensuite amorti lors de sa transmission au CMPC. Il serait intéressant d'étudier des scénarios plus contrastés en termes de variation de coûts de financement.

Nous abordons dorénavant la problématique sous un angle quelque peu différent, en ciblant notre étude sur les interactions entre prix du carbone, coût du capital et décision

d'investissement dans des technologies décarbonées. Nous relâchons en particulier le bouclage macro-économique de façon à nous autoriser des scénarios plus contrastés en termes de variation du coût du capital. Le calcul des coûts de production y est également abordé sous un angle plus dynamique, ce qui nous permet de prendre explicitement en compte des effets d'apprentissage sur les technologies ENR.

3.6 Coûts des investissements en technologies décarbonées

Nous supposons qu'à l'horizon 2030, une tranche nucléaire est déclassée (fin de vie) et doit être remplacée par une autre technologie décarbonée qui devrait assumer la même fourniture énergétique. Nous déterminons les coûts associés aux différentes options envisagées en termes d'investissement, et dans quelle mesure ces coûts peuvent être sensibles au coût du capital et prix du CO2.

3.6.1 Les différentes options de remplacement

En supposant que 1000 MW de nucléaire soient déclassés, il nous faut comparer des investissements en capacité qui fournissent la même quantité d'énergie, sachant que chaque technologie possède des caractéristiques propres (facteur de charge, intermittence) qui impliquent que les 1000 MW que nous cherchons à remplacer ne sont pas forcément équivalents à 1000 MW de puissance pour une autre technologie. Nous détaillons ici les hypothèses sous-jacentes au calcul de coûts générés par des investissements strictement équivalents en termes de quantité d'électricité produite.

Option 1 : remplacement par une nouvelle tranche de nucléaire. L'option par défaut retenue est de remplacer la tranche de nucléaire déclassée par une nouvelle tranche de nucléaire de type EPR (nouvelle génération). Nous supposons que le facteur de charge [15] associé à cette nouvelle technologie nucléaire est identique à celui de l'ancienne génération, pris ici à 80%. La différence entre ces deux générations de technologies se réalise en réalité sur la durée de vie d'une installation : nous retenons une durée de vie de 60 ans pour une centrale de type EPR, quand la tranche déclassée avait été amortie sur 40 ans. Nous évaluerons donc le coût associé à l'investissement dans 1000 MW de nucléaire nouvelle génération, qui produira chaque année pendant 60 ans 80% * 1000 * 8760 = 7 TWh d'électricité.

Les autres technologies de remplacement envisagées ont toutes des durées de vie de l'ordre de 20 ans, alors que le nucléaire évoqué précédemment est supposé fonctionner pendant 60 ans. Nous retiendrons donc qu'il faudra dans chacun des cas suivants trois séries d'investissements successifs (en 2030, 2050 et 2070) pour couvrir un même service énergétique. En revanche, nous nous restreindrons au cas où l'investisseur prend d'ores et déjà la décision d'investir dans la même technologie pendant 60 ans [16].

Option 2 : remplacement par de l'éolien terrestre. Le cas du remplacement d'une tranche de nucléaire par des éoliennes terrestres est plus délicat à construire que le cas

15. Le facteur de charge correspond au rapport entre la production effective sur un nombre d'heures données (en général une année) et la puissance maximale multipliée par ce même nombre d'heures. Il est très souvent utilisé comme indicateur de l'énergie susceptible d'être produite par une installation électrique.

16. Les coûts estimés peuvent alors être légèrement surestimés dans la mesure où la possibilité d'investir dans une technologie qui serait devenue relativement moins chère représente un avantage pour l'investisseur.

précédent, essentiellement du fait du phénomène d'intermittence associé à cette technologie. Tout d'abord, le facteur de charge est cette fois-ci de 20% soit quatre fois inférieur au facteur de charge du nucléaire. Si l'énergie produite par cette technologie était dispatchable, il faudrait donc installer environ 4000 MW d'éolien pour retrouver les 7 TWh indiqués précédemment. Cependant, il faut tenir compte du caractère intermittent associé à cette technologie : il peut exister des plages horaires pour lesquelles une éolienne est opérationnelle mais ne produit pas d'électricité car il n'y a pas de vent pour la faire tourner. Dans ce cas, il faut que le relais soit assuré par une technologie de production complémentaire et flexible (temps de réaction court), en l'occurrence une technologie thermique à combustion (TAC) au Gaz. Pour obtenir l'équivalent "dispatchable" (classique) de l'énergie "intermittente" produite par une technologie, nous nous appuyons sur la notion de crédit de capacité [17], qui mesure la capacité d'un moyen de production à assurer l'équilibre production-consommation avec une probabilité de défaillance limitée. Dans le cas de l'éolien terrestre et dans le contexte du scénario étudié, nous considérons que le crédit de capacité est égal à 10%. Ainsi, les 4000 MW d'éolien qui étaient supposés équivalents aux 1000 MW de nucléaire, ne sont en fait équivalents qu'à 400 MW d'énergie dispatchable classique. Il faut donc compléter ces 4000 MW d'éolien par 600 MW de TAC au gaz, qui ne fonctionneront que très peu en réalité (environ 500 heures par an), mais qui sont nécessaires pour assurer que cette combinaison "éolien + TAC" puisse assurer à toute heure le même service énergétique qu'une technologie dispatchable comme le nucléaire. Dans ce cas, l'énergie totale produite (éolien et TAC compris) est légèrement supérieure aux 7 GWh nécessaires : nous réajustons donc la puissance éolienne à installer et retenons comme option finale un investissement dans 3800 MW d'éolien terrestre et 600 MW de TAC au gaz, à renouveler deux fois sur la période considérée de 60 ans.

Option 3 : remplacement par de l'éolien offshore. La technologie éolienne offshore est également une technologie intermittente. Nous reproduisons alors le raisonnement expliqué précédemment, avec une hypothèse de facteur de charge de 30% et de crédit de capacité de 15%. Nous retenons comme option finale une série de trois investissements successifs dans 2550MW d'éolien offshore et de 600 MW de TAC au gaz.

Option 4 : remplacement par de la biomasse. La technologie biomasse produit de l'énergie dispatchable classique (combustible stockable). Ainsi, avec un facteur de charge de 80% identique à celui du nucléaire, l'option retenue est une série de trois investissements successifs de 1000 MW en technologie biomasse.

Option 5 : remplacement par du photovoltaïque. De nouveau, nous étudions le cas d'une technologie intermittente, avec pour caractéristiques un facteur de charge de 10% et un crédit de capacité de 5%. Nous retenons comme option une série de trois investissements successifs dans 7600 MW d'installation photovoltaïque et 600 MW de TAC au gaz.

Les cinq alternatives présentées précédemment ont été calibrées de façon à être équivalentes en termes de fourniture énergétique : chaque modalité d'investissement permet de produire environ 94 TWh d'énergie cumulée actualisée sur 60 ans dans le cadre de référence (CMPC de 8 % et prix du CO2 à 31 €/tCO2).

17. Le crédit de capacité est la capacité (puissance) conventionnelle pouvant être remplacée par une source variable (éolien par exemple) sans diminuer la fiabilité totale du système (cf. Ruffles et Ploszek - UKERC 2006).

3.6.2 Les coûts d'investissement associés aux différentes options.

Hypothèses et données

Nous reprenons les données sur les différents coûts utilisées dans la section précédente : coût fixe (en €par MW installé), coût variable, coût O&M (opération et maintenance). Le calcul des coûts reposera sur la séquence suivante. Nous supposons que la date de fin de construction de l'installation et la date de décaissement de la totalité des frais d'investissement coïncident [18]. Jusqu'à sa date de déclassement, les coûts annuels supportés par la technologie sont alors compensés des frais d'opération et maintenance et des coûts variables s'ils existent. A l'exception du nucléaire, nous étudierons donc trois séquences successives respectant le schéma d'un décaissement initial des frais d'investissement auquel s'ajoutent les coûts opérationnels annuels pendant 20 ans.

Raisonner en termes de successions d'investissements nous permet de tenir compte en particulier de gains par effets d'apprentissage sur quelques technologies. En effet, avec un horizon de temps assez étendu comme 60 ans, nous pouvons raisonnablement supposer que des technologies n'ayant pas encore atteint leur maturité aujourd'hui verront leurs coûts se réduire de génération en génération. C'est typiquement le cas pour les technologies éoliennes (terrestre et offshore) et photovoltaïque. Nous supposerons qu'entre deux générations successives en éolien terrestre (soit 20 ans), les coûts d'investissement diminueront de 10% par un effet d'apprentissage continu. Les coûts d'opération et maintenance qui sont indexés sur ce coût en capital [19] décroîtront également. De même, nous retenons un effet d'apprentissage permettant d'économiser 20% de coût d'investissement entre deux générations d'éoliennes offshore, et 30% pour la technologie photovoltaïque.

Nous retenons pour les prix des combustibles fossiles (gaz et uranium) et du C02 les hypothèses de l'AIE à l'horizon 2030, et nous supposons que ces prix resteront stables sur la période étudiée. En ce qui concerne l'uranium, la pratique industrielle reflète une volonté forte de sécuriser l'approvisionnement du combustible dès la construction de la centrale nucléaire. L'intégration de contrats long terme sur l'uranium dans les projets de construction de centrales est en effet une pratique qui s'est largement répandue au cours des dernières années. L'hypothèse que nous avons retenu est justifiée dans la mesure le prix de l'uranium est, dans la pratique, fixé sur une grande partie de la durée de vie de la centrale. Cette hypothèse forte peut paraître relativement plus contestable s'agissant du prix du gaz. Nous nous plaçons en réalité dans un contexte de réussite de la décarbonation du système énergétique mondial, dans lequel les tensions liées à la raréfaction de la ressource s'apaisent avec la baisse de la demande. De plus, le prix du gaz tout comme le prix du CO2 n'impacteront que très marginalement les coûts estimés dans la mesure où nous avons choisi de focaliser cette étude sur les technologies décarbonées. Le gaz intervient en tant que combustible dans le fonctionnement de la TAC, dont le coût ne représente in fine qu'une faible part du coût total des options "technologies intermittentes + TAC". Cet effet sera illustré dans un scénario où le prix du CO2 est supposé s'établir à 100 €/tCO2. Le calcul du coût variable associé à la TAC est réalisé à partir du prix du gaz, du rendement de cette technologie [20] et du prix du CO2.

18. Nous supposons pour simplifier que les dates de construction et d'investissement coïncident. En réalité les délais de construction s'étendent sur plusieurs années, ce qui signifie qu'une partie des coûts d'investissement est décaissée alors que la centrale n'est pas encore fonctionnelle et ne génère donc pas de revenus d'exploitation (intérêts intercalaires).

19. Tout comme dans la section précédente, nous supposons que les coûts en O&M représentent 2% du coût d'investissement

20. Une turbine à combustion à gaz possède un rendement de 30% contre 40% pour une Centrale Combinée à Gaz étudiée dans la section précédente.

Coût des options de remplacement et sensibilité aux différents facteurs

La mise en oeuvre des données nous permet alors d'évaluer les coûts d'investissements totaux actualisés associés à chaque option de remplacement, qui se comptent en milliards d'euros, et de rapporter ces montants à la quantité d'énergie produite (également actualisée). Le coût unitaire de production est un indicateur de comparaison des différentes options relativement plus fiable que dans l'étude réalisée précédemment (avec ajustement de la demande d'électricité), dans la mesure où le biais généré par une variation de la quantité d'énergie produite est dorénavant écarté.

Les coûts complets de production en €/MWh pour chaque technologie sont recensés dans la figure 3.14. Nous retrouvons alors un inter-classement des technologies identique à celui obtenu dans la section précédente. La technologie nucléaire représente le moyen de production pour lequel le coût complet est le plus faible. Suivent par ordre croissant de coût de production : l'éolien terrestre et la biomasse qui sont deux technologies relativement compétitives, puis le photovoltaïque et enfin la technologie éolienne offshore qui reste l'option de remplacement la plus chère (bien que la prise en compte d'effets d'apprentissage permette de réduire son coût). Le coût de production associé à la TAC n'est pas représenté dans ce tableau pour des raisons d'échelle mais s'établit à 316 €/MWh. Il est intéressant de noter que ce coût ne se répercute que très faiblement (à hauteur de moins de 5%) dans le coût total des technologies intermittentes. Comme évoqué précédemment, ceci laisse présager que les prix du gaz et du CO2 ne jouent qu'un rôle très marginal dans le choix des investissements. En revanche, le coût du financement devrait jouer un rôle prépondérant dans la rentabilité des investissements qui dépendent essentiellement du coût du capital.

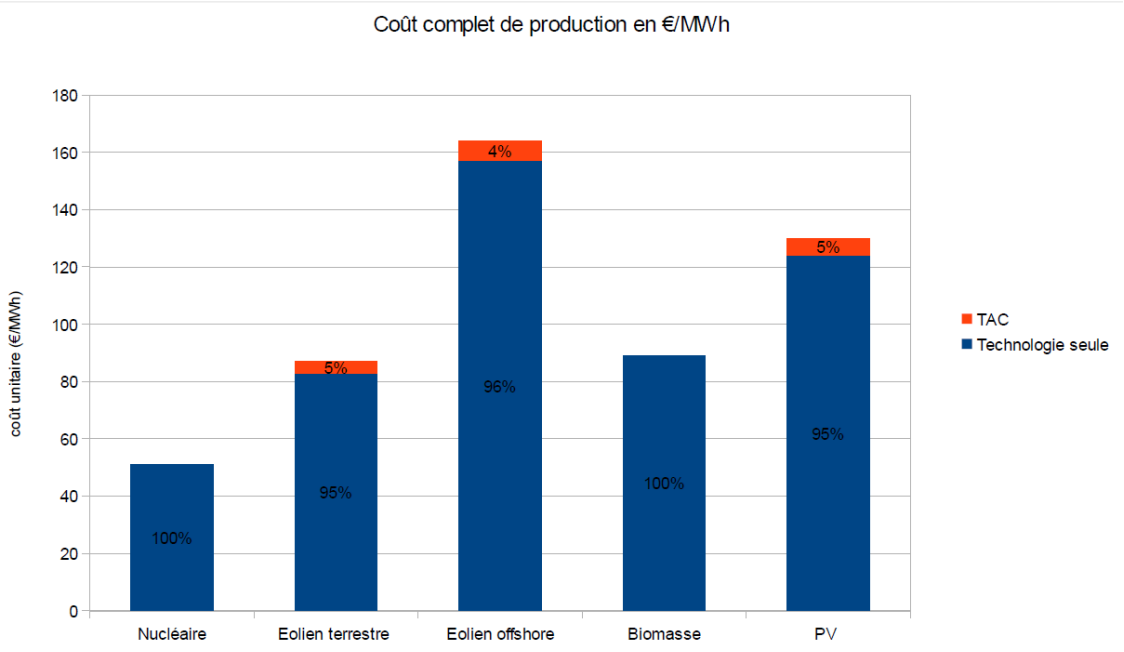

FIGURE 3.14 – Coût complet unitaire associé à chaque option de remplacement (en €/MWh)

Un impact quasi-inexistant d'une hausse du prix du carbone. Le tableau 3.13 recense le calcul des coûts de production associés aux différentes options de remplacement

Prix du CO2	Nucléaire	Eolien terrestre +TAC	Eolien offshore + TAC	Biomasse	PV + TAC
30€/tCO2	51€/MWh	87 €/MWh	164 €/MWh	89 €/MWh	130 €/MWh
30€/tCO2	51 €/MWh	89 €/MWh	166 €/MWh	89 €/MWh	132 €/MWh

TABLE 3.13 – Coût complet de production pour différents prix du CO2 (en €/MWh)

pour deux hypothèses de prix du CO2 : le prix à 30 €/tCO2 de référence (AIE) et un prix à 100€/tCO2 (cf. Commission Quinet). Il apparaît que les coûts de production sont extrêmement peu sensibles au prix du CO2 (élasticités inférieures à 0,01), ce qui n'est pas surprenant dans la mesure où nous avons choisi de centrer l'étude sur des technologies décarbonées. Le prix du CO2 n'intervient qu'au travers de l'utilisation des TAC, donc via le biais généré par l'intermittence de certaines technologies. Le coût de production des TAC est, quant à lui, relativement plus sensible au coût taxé du gaz, avec une élasticité six fois plus élevée que celle observée pour les autres technologies. Ainsi, il est tout de même intéressant de noter que le fonctionnement des TAC, nécessaire sur un plan technique, n'impacterait que très marginalement la rentabilité économique d'un investissement dans des technologies intermittentes.

Une élasticité non négligeable à une variation du CMPC. Les scénarios de réformes fiscales réalisés dans la section précédente ne conduisaient qu'à des variations marginales du coût du capital (de l'ordre de quelques dixièmes de point de base). Nous évaluons maintenant l'impact de variations plus contrastées du CMPC (entre 6% et 10%) sur les coûts de production associés aux différents investissements.

CMPC	Option 1 : Nucléaire	Option 2 : Eolien terrestre + TAC	Option 3 : Eolien offshore + TAC	Option 4 : Biomasse	Option 5 : PV + TAC
6%	44 €/MWh	77 €/MWh	144 €/MWh	83 €/MWh	113 €/MWh
8%	51 €/MWh	87 €/MWh	164 €/MWh	89 €/MWh	130 €/MWh
10%	58 €/MWh	96 €/MWh	184 €/MWh	94 €/MWh	146 €/MWh

TABLE 3.14 – Coût complet de production pour différentes valeurs du CMPC

Nous pouvons déduire des résultats indiqués dans le tableau 3.14 les élasticités apparentes des coûts de production au coût du capital. Il apparaît tout d'abord qu'une variation du coût du capital ne modifie pas notablement l'inter-classement des différentes options d'investissement : seule la compétitivité entre la biomasse et l'éolien terrestre est impactée. La biomasse est en effet la technologie la moins sensible aux variations du coût du capital (élasticité de 0,18) et devient préférable à l'éolien terrestre pour des valeurs de CMPC élevées. Les autres technologies, y compris le nucléaire, sont quant à elles relativement sensibles aux variations du coût du capital avec des élasticités apparentes de leur coût de production s'établissant aux alentours de 0,4. Nous retrouvons alors les résultats de la section précédente : le coût du capital est une variable prépondérante dans les choix d'investissement en technologies décarbonées. Une augmentation d'un point du coût du capital représenterait une hausse du coût de production d'un MWh d'environ 6%, soit une augmentation de 5€à 10€sur les technologies envisagées. Rapporté à la totalité de l'énergie

supposée produite sur la durée de vie du projet, ce surcoût s'élèverait à plusieurs millions d'euros.

3.6.3 Limites de l'approche

Cette approche nous a permis de compléter et confirmer les résultats évoqués dans la section précédente, en levant certaines des limites que nous avions identifiées sur la méthodologie alors adoptée. Nous avons ici adopté un point de vue plus dynamique sur l'évolution du système électrique, ce qui nous permet de pouvoir comparer la rentabilité associée à différentes technologies décarbonées sans biais liés aux variations d'énergie produite. L'horizon d'étude retenu est à la fois un avantage dans la mesure où il permet de tenir compte explicitement d'effets d'apprentissage influençant la rentabilité de technologies qui en sont pas encore matures, mais c'est également un inconvénient puisque l'incertitude entâchant des projections aussi lointaines nous oblige à retenir des hypothèses fortes (en particulier sur l'évolution du prix du combustible).

D'autre part, nous avons considéré que l'investisseur s'engageait d'ores et déjà pour une succession d'investissement lorsque les technologies considérées avaient une durée de vie de 20 ans. Dans ce sens, nous avons alors surestimé les coûts des ENR par rapport aux coûts du nucléaire puisqu'en réalité l'investisseur aura de nouveau une décision d'investissement à prendre lorsque la première génération d'ENR sera déclassée. Il est tout à fait possible que cet investisseur choisisse une technologie différente, en fonction des conditions économiques, technologiques et financières (nouvelle valeur du CMPC par exemple) à cette date (conditions qui n'auront pas forcément été anticipées 20 ans auparavant). Alors qu'un investissement dans une tranche de nucléaire est irréversible pour les 60 prochaines années, le choix d'une technologie ENR comprend en réalité une valeur d'option associée à la possibilité de réorienter sa décision d'investissement deux fois sur le même horizon de temps afin d'optimiser son profit. Si l'on tenait explicitement compte de cette valeur d'option (Smeers 2012) dans le calcul de rentabilité des investissements, l'écart de compétitivité entre le nucléaire et les ENR devrait théoriquement se réduire.

Cependant, une autre limite de notre approche pourrait contrebalancer l'effet précédent : l'absence de prise en compte des coûts d'intégration au réseau. Nous avons restreint notre étude à l'évaluation des coûts de production à la sortie des centrales. Ils n'intègrent donc pas les coûts d'insertion au réseau électrique qui existent pour les technologies décentralisées (création de raccordements au réseau en particulier), qui peuvent s'élever jusqu'à 20% du coût de "sortie centrale". S'il est vrai qu'une majorité de ces coûts est reportée sur la collectivité (via les gestionnaires de réseaux), une part de plus en plus importante est appelée à être supportée par l'investisseur lui-même. Ces coûts d'insertion devraient donc en toute rigueur être ajoutés aux coûts calculés précédemment, ce qui creuserait l'écart de compétitivité entre les ENR (décentralisées) et le nucléaire.

La méthodologie utilisée ici présente certes des limites que nous avons évoquées ci-dessus, mais nous a permis dans cette section de fournir des éléments chiffrés illustrant la rentabilité de différentes technologies de production et leur sensibilité à différents facteurs. Les ordres de grandeur sont quelque peu différents puisque nous nous sommes concentrés sur des variations significatives du coût du capital, mais nous retrouvons tout de même les conclusions identiques aux conclusions tirées d'une méthodologie basée sur un bouclage macroéconomique. Un prix élevé du CO2 peut servir de signal-prix pour décourager les investissements dans les technologies à combustibles fossiles, mais le CMPC doit en contrepartie permettre de financer à moindre coût des investissements dans des technologies décarbonées telles que les ENR.

3.7 Conclusion

Le coût du capital, le prix du CO2 et l'évolution de la demande d'électricité seront les trois facteurs déterminants dont dépendront les décisions d'investissements futurs dans le secteur électrique : c'est le constat qui peut être fait à partir de l'étude des coûts de référence de production de l'électricité. S'il est généralement admis que "la valeur du carbone : c'est le signal que le développement de nouvelles technologies plus sobres en carbone peut présenter de bonnes perspectives de rentabilité" (Rapport sur la Valeur Tutélaire du Carbone), il ne faut pas négliger non plus le coût de financement des investissements, qui sera la clé de la compétitivité des énergies renouvelables.

Nous avons dans ce chapitre revisité la méthode usuelle des coûts de production, en y intégrant une vision macroéconomique d'ensemble, dans la mesure où la tarification du CO2 interagit dans les faits avec les autres facteurs déterminants de ces coûts, dont le taux d'intérêt en particulier. La tarification du carbone représente bien évidemment un signal-prix visant à augmenter la compétitivité relative des technologies bas carbone, mais il s'agit également d'un instrument permettant de générer des recettes fiscales pour le gouvernement. Le choix par le gouvernement pour le recyclage de ces recettes aura donc un impact sur les coûts de production au travers des variables privilégiées ou non.

Nous montrons en particulier que la recherche publique d'un objectif de minimisation des coûts économiques associés à la tarification du CO2, et donc le choix d'une réinjection de ces recettes dans l'économie (via une réduction des charges sur le travail) au détriment d'un assainissement des finances publiques peut nuire aux objectifs de réduction des émissions. En effet, dans le cas où la question de la solvabilité de la dette souveraine est reléguée au second plan, la pression sur les taux d'intérêts se répercute en une hausse du coût de financement qui a pour effet principal de décourager les investissements en énergies peu carbonées. En revanche, faire de la résorption de la dette publique le premier objectif de la réforme fiscale considérée revient à apaiser les tensions sur les marchés financiers et à dégager un signal positif d'investissement dans ces technologies, sur lesquelles doivent reposer un futur énergétique moins carboné. Ainsi, il apparaît que reporter la résolution des problèmes d'endettement, même en raison de considérations d'équité intergénérationnelles (les générations actuelles porteraient alors la majorité du coût de la politique climatique), revient à reporter dans le temps des investissements en technologies décarbonée qui devront se faire *de toute façon* pour respecter l'objectif de facteur 4 à l'objectif 2050, et qui seront possiblement plus coûteux à l'avenir.

Bibliographie

[1] AIE (2012) "World Energy Outlook",*Editions OCDE*

[2] AIE - OCDE (Agence pour l'Energie Nucléaire) (2010) "Coûts prévisionnels de production de l'électricité : édition 2010",*Editions OCDE*

[3] Emmanuele Baldacci et Manmohan S. Kumar (2010) "Fiscal Deficits, Public Debt and Sovereign Bond Yields",*IMF Working paper*

[4] Cour des Comptes (2012) "Les coûts de la filière électro-nucléaire",*Rapport Public*

[5] Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) (2008) "Synthèse publique de l'étude des coûts de référence de la production électrique",*Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire*

[6] Gahungu J. et Y. Smeers (2012) "A Real Options Model for Electricity Capacity Expansion",*Loyola de Palacio Programme on Energy Policy*

[7] Alain Grandjean (2012) "Transition énergétique : financer à moindre coût les énergeis renouvelables",*Terra Nova*

[8] Jean-Marc Jancovici (2012) "Qu'est-ce que le "vrai coût" de l'électricité ?",*www.manicore.com*

[9] Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois (2010) "Energie : Econmie et Politiques",*Ouvertures Economiques, Editions de boeck*

[10] Ponssard J.-P., Devy D. et H. Tanguy "Economie de l'entreprise",*Les éditions de l'Ecole Polytechnique*

[11] Jacques Percebois (2012) "Rapport Energies 2050",*Rapport du Groupe de Travail présidé par Jacques Percebois, Centre d'Ananlyse Stratégique*

[12] Christian de Perthuis (2011) "Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone",*Rapport du Comité présidé par Christian de Perthuis*

[13] Jean Pierre Ponssard, David Sevy et Hervé Tanguy (2007) "Economie de l'entreprise",*Les éditions de l'école polytechnique*

[14] Alain Quinet (2009) "La valeur tutélaire du carbone",*Rapport de la Commission présidée par Jacques Percebois, Centre d'Ananlyse Stratégique*

[15] Réseau de Transport d'Electricité (RTE) (2012) "Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France : édition 2012",*http ://www.rte-france.com*

[16] Ruffles et Ploszek (2006) "The costs and impacts of intermittency : an assessment of the evidence on the costs and impacts of intermittent generation on the British electricity network",*http ://www.rte-france.com*

Conclusion générale

La thématique des politiques environnementales, et climatiques en particulier, a suscité un vif intérêt dans la sphère économique et politique depuis de nombreuses années. Les accords internationaux engageant les pays à respecter certains objectifs de réduction d'émissions de Gaz à Effet de Serre a donné lieu à de nombreuses préconisations quant à la politique climatique à implémenter au niveau national. La transition vers une trajectoire de croissance décarbonée reposera sur deux leviers principaux : la réduction de notre dépendance consommation d'énergie fossile au travers d'un signal-prix tel qu'une taxe CO2 et un encouragement aux investissements en technologies décarbonées.

Le cas d'une taxation des émissions a été particulièrement mis en valeur dès lors que la notion de double-dividende a été popularisée. La définition stricte de ce double-dividende stipule que le bien-être privé des agents (composante environnementale mise à part) pourrait être amélioré par un recyclage approprié des recettes environnementales. Cependant, la version popularisée à tort de ce double-dividende et possiblement visée par les gouvernements concerne plutôt un gain en activité économique qu'en bien-être. Au vu des contraintes actuelles pesant sur les économies européennes (niveaux d'endettement élevés, persistance de la faiblesse de la croissance), la mise en place d'une taxation du CO2 pourrait plus relever de la poursuite d'un objectif de réforme budgétaire plutôt que d'un objectif de réduction durable des émissions de Gaz à Effet de Serre.

La structure en trois parties de cette thèse reflète notre vocation à répondre à cette problématique au travers d'une approche graduelle : une identification des enjeux et interactions entre nos trois variables d'intérêt que sont la dette publique, le PIB et l'environnement nous permet de cibler dans un exercice de modélisation la recherche d'un double-dividende. Au regard des résultats obtenus quant aux conséquences de la mise en oeuvre d'une réforme environnementale sur le secteur énergétique, nous focalisons ensuite notre étude sur l'évolution des coûts de production et d'investissement pour différents scénarios macroéconomiques stylisés.

Le chapitre 1 identifie les principaux enjeux encadrant les relations entre dette publique, croissance et environnement. Une première focalisation sur l'interaction entre dette et croissance fait apparaître une relation bilatérale : une hausse de la croissance permet de réduire spontanément le niveau d'endettement dans la mesure où la richesse des individus augmente plus rapidement que le taux d'intérêt. D'autre part, le niveau d'endettement devrait affecter en retour l'activité économique et la croissance potentielle de l'économie au travers de deux effets principaux que nous avons retenu car s'appliquant bien au contexte actuellement observé dans les pays européens :

- le réajustement de la politique fiscale via une augmentation de la pression fiscale et/ou une diminution des dépenses publiques (approche retenue dans le chapitre 2)
- l'effet d'éviction sur le capital privé via une hausse des taux d'intérêt longs (approche retenue dans le chapitre 3).

Une réforme du système fiscal reposant sur une taxe environnementale peut faire figure de bon candidat à la refonte du système de taxation, en permettant éventuellement de concilier deux objectifs qui ont souvent été opposées dans les discours politiques : la nécessité de réduire les émissions de GES de nos économies et relancer l'activité économique en réduisant les distorsions fiscales totales (vision extrapolée du double-dividende). Nous synthétisons alors une littérature très vaste sur la thématique du double-dividende afin d'extraire les quatre conditions structurelles qui conditionnent la réussite ou non d'une réforme fiscale environnementale. Celle-ci aura en particulier vocation à transférer une partie du poids fiscal pesant sur le travail vers un bien polluant. La réforme fiscale environnementale aura donc d'autant plus de chance de générer un double dividende que :

- l'assiette des émissions est faible,
- le marché du travail est sensible à une variation des cotisations sociales (élasticité de l'offre de travail, existence ou non de chômage involontaire),
- le système fiscal initial était éloigné de l'optimum de second-rang.

Nous identifions ainsi dans ce chapitre les enjeux associés aux interactions entre dette publique, croissance et environnement au travers de la fiscalité en particulier. Alors que le second chapitre cherche à quantifier ces interactions, cette première approche de la problématique nous a permis de cibler les caractéristiques dont nous devrons tenir compte, ainsi que la nécessité de raisonner dans une perspective intergénérationnelle, dans la mesure où la dette comme l'environnement sont des variables impactant l'utilité des générations présentes mais également futures.

Le chapitre 2 fournit des indications qualitatives et quantitatives quant au meilleur design de réforme fiscale environnementale, selon différents critères. Nous avons développé dans ce chapitre un modèle parcimonieux permettant de traiter dans un cadre unifié des effets macroéconomiques, sectoriels et intergénérationnels de réformes fiscales environnementales. Les choix de spécification retenus auront en grande partie été éclairés par l'étude bibliographique réalisée dans le chapitre 1. Nous retenons en particulier les hypothèses suivantes :

- un raisonnement dans un cadre d'équilibre général qui permet de tenir compte des interactions entre les différents marchés dont le marché du travail ;
- un modèle à générations imbriquées afin de prendre en considération à la fois les externalités générées par des horizons de planification fini et l'absence d'altruisme, mais également de mesurer la répartition des coûts et bénéfices associés aux réformes sur les différentes générations ;
- une offre de travail endogène, dont l'importance dans l'occurrence d'un double-dividende a été soulignée dans le chapitre 1
- une politique budgétaire dynamique reposant sur des taxes proportionnelles (dont le niveau initial influera sur la probabilité de réussite de la réforme), l'émission de dette publique et une taxe d'ajustement ;
- l'existence de deux secteurs de production dont un secteur énergétique produisant un bien carboné (énergie finale) qui sera sujet à la taxation environnementale.
- l'intégration d'une utilité environnementale dans le bien-être des agents, impactée négativement par la pollution de stock issue des usages énergétiques.

La calibration de ce modèle et la mise en oeuvre de simulations nous a permis de hiérarchiser les différents types de réformes fiscales envisagées au regard de différents critères : le bien-être, l'efficacité économique, ou l'équité sectorielle. Il apparaît qu'une réforme reposant sur la taxation de l'énergie finale en tant qu'input de production et contrebalancée par la réduction des cotisations sociales permettrait de générer un double-dividende au sens de Goulder. C'est également la réforme environnementale qui génère le moins de coûts économiques (impact très légèrement négatif sur le PIB), et stimule durablement le marché du travail. En revanche, la mise en place d'une telle réforme ne permet pas d'assurer une réduction de la dette dans la mesure où les recettes fiscales se contractent à long terme (dues à la contraction de l'assiette énergétique). Enfin, le succès d'une telle réforme ne se réalise qu'au prix du sacrifice du secteur énergétique. Dans la mesure où nous ne tenons pas compte de possibilités de décarbonation (production d'un bien énergétique moins polluant), le succès de la politique climatique repose sur la contraction de l'activité de ce secteur. Cette constatation nous pousse à nous intéresser à l'impact de politiques environnementales sur un secteur important du système énergétique, c'est pourquoi nous traitons plus particulièrement du cas du secteur électrique dans le chapitre 3.

Dans la dernière partie de cette thèse, nous déclinons les interactions entre dette, croissance et environnement au cas du secteur électrique. Nous retenons dans ce cadre d'analyse un effet de l'endettement sur les coûts de production de ce secteur au travers d'une hausse du coût du capital (CMPC), qui dépend en partie des taux d'intérêts longs du pays. Nous nous intéressons alors à l'impact de différents scénarios de réformes environnementales sur les coûts de production et les décisions d'investissement du secteur à l'horizon 2030, dans une approche méthodologique de type LCOE (ou Coût Marginal de Long Terme). Les coûts complets de production sont constitués à la fois de coûts fixes (dépendant du coût du capital) et de coûts variables (qui sont impactés par le prix du CO2 dans le cas de combustibles fossiles), la répartition de ces coûts dépendant de la technologie considérée. En effet, les coûts de production des technologies décarbonée sont particulièrement sensibles au coût du capital, quand les technologies thermiques à combustibles ont une rentabilité relativement plus sensible au coût du CO2. Alors que la majorité des études spécialisées se contentent d'un calcul de sensibilité des coûts à une variation du prix du CO2 ou du coût du capital, nous élargissons cette approche en tenant compte des interactions entre ces deux variables, ainsi qu'à la demande d'électricité, au travers d'une réforme fiscale environnementale. Le mode de recyclage des recettes générées aura une importance cruciale sur les résultats au travers des variations du coût du capital qu'il génère : utiliser les recettes fiscales climatiques pour réduire l'endettement permet de relâcher la pression sur le coût du capital et donc sur le coût de production de l'électricité. Au contraire, la recherche d'un double-dividende permet de limiter l'impact négatif de la politique climatique sur le PIB (et sur la demande d'électricité *a fortiori*) mais pousse le coût du capital à la hausse au travers de la hausse de l'endettement public. D'un point de vue d'une politique climatique reposant en partie sur la décarbonation du mix électrique, le recyclage des recettes dans l'économie génère un signal prix relativement négatif quand à la rentabilité des technologies décarbonées. Les ordres de grandeur obtenus pour les variations sont faibles mais laissent présager la préconisation politique suivante : si la politique climatique est réellement pensée pour orienter l'économie vers un sentier de croissance moins carboné, alors il faut faire de la baisse du coût de financement une priorité. Une approche complémentaire cherchant à illustrer les décisions d'investissement dans le cadre d'un renouvellement du parc, avec des scénarios plus extrêmes permet de confirmer cette intuition. Ainsi, ce chapitre fournit des évaluations chiffrées de l'impact de différents design de réformes fiscales environnementales tout en illustrant la nécessité pour les décideurs politiques de penser la politique climatique autrement que comme un moyen de générer des recettes fiscales.

Cette thèse a donc montré par une approche croisée (macroéconomique et sectorielle) les différents types de réformes fiscales environnementales auxquelles peuvent faire appel les gouvernements européens et les effets qui pourraient en être attendus. Nos travaux ont également montré que l'intégration d'une taxe CO2 dans un cadre plus large visant à relancer la croissance peut être en contradiction avec la vocation première de cette taxe. Les circonstances économiques actuelles, pour le moins inédites, ont tendance à reporter sur cet instrument fiscal un rôle de générateur de recettes supportant la refonte du système fiscal afin de relancer l'activité et réduire la dette. Ainsi, il y a fort à parier que le critère de double-dividende au sens de Goulder ne soit pas un indicateur prioritaire pour les gouvernements, qui rechercheront plutôt un dividende en emploi ou en activité. Pourtant, une politique climatique durable doit reposer sur les deux leviers évoqués précédemment. Le signal-prix incarné par la taxe CO2 doit également inciter à des investissements dans des technologies décarbonées et non uniquement générer des recettes (qui devraient même se réduire à mesure que cette taxe corrige les externalités). Tout comme la politique climatique ne devrait pas avoir à être compensée par la perspective de gains en activité pour justifier de

son existence, la relance de l'économie ne devrait pas reposer sur cet instrument, et encore moins la réforme du marché du travail (qui peut être par ailleurs assurée par d'autres dispositifs telles que des réformes de TVA sociale).

Annexes

Chapitre 1 : Réforme fiscale environnementale : la dette publique oubliée ?

Les différentes familles de modèles et la quantification de ces coûts.

Le premier objectif des études d'une taxe carbone consiste essentiellement à modéliser les interactions climat-économie, de façon à identifier la trajectoire de prix carbone qui serait optimale afin de respecter les objectifs de réduction des émissions de GES. Trois grandes familles de modèles s'inscrivent dans cette veine :

Modèles bottom-up (optimisation dynamique). Le fonctionnement de ces modèles[21] est basé sur une fonction de demande d'énergie qui doit être satisfaite au moindre coût par le producteur (mix optimal des différentes technologies et des quantités produites). La contrainte additionnelle sur les émissions de CO2 fait apparaître un prix implicite du CO2 qui est intégré à la démarche d'optimisation de la production d'énergie. Les principales limites de ce type de modèles résident dans le traitement de la partie macroéconomique de l'étude de la taxe carbone : les trajectoires de demande d'énergie sont traitées de façon assez sommaire, puisque les variations des prix relatifs des différentes énergies ou les effets revenus liés à la taxe carbone ne jouent pas sur cette variable d'entrée du système. De plus, ce type de modèle présente un inconvénient qu'il partage avec la plupart des modèles "d'ingénierie" dits bottom-up : le traitement de l'innovation technologique y est presque impossible à modéliser. Les prédictions de ces modèles sont donc valables pour des horizons de temps assez courts, n'intégrant pas d'avancée technologique majeure dans la production d'énergie.

Modèles d'Equilibre Général Calculable (EGC). Ce type de modèles[22] s'appuie sur la représentation d'une économie en situation d'équilibre sur tous les marchés, où prix et salaires s'ajustent afin de faire coïncider offre et demande. Ce type de modèles fonde ses équations dans une approche micro-économique : en spécifiant explicitement les décisions des agents (maximisation des utilités ou des profits), le corps d'équations fait directement référence aux arbitrages individuels qui sont à l'origine des phénomènes macroéconomiques. Certains paramètres de ces fonctions sont calculés, ou bien choisis dans un ensemble de valeurs pertinentes : on parle alors de "calibrage", mais les paramètres sont plus souvent calibrés sur des valeurs du consensus plutôt que sur des estimations empiriques.

Modèles macroéconométriques. La méthode macro-économétrique combine à la fois l'analyse macroéconomique et l'économétrie. Ce type de modèles[23] repose sur la traduction des comptes nationaux en un système d'équations d'équilibre comptable ou de comportement (par exemple, la relation entre consommation et revenu), résultat des arbitrages d'un ensemble d'agents économiques (un agrégat), dont les choix individuels n'ont pas à être directement explicités, contrairement aux modèles EGC précédemment évoqués. Les paramètres de ces équations sont estimés sur comportements historiques à l'aide des méthodes économétriques traditionnelles.

21. GLOBAL2100 (Manne et Richels (1992, [?])), POLES (Criqui *et. al.* (2000, [?]))

22. La majeure partie de ces modèles s'appuient sur une modélisation de l'économie avec un agent représentatif à durée de vie infinie GEMINI-E3 (Bernard et Vielle (2003, [?])), mais il existe également une version à générations imbriquées de ce type de modèles (Rasmussen (2003, [?])) qui sont tout aussi adaptés à l'étude de politiques climatiques.

23. Oxford Economic Forecasting Model par exemple.

Afin de prendre en compte les effets de feed-back climatiques, les modèles évoqués précédemment sont en général conjugués à des des modules techniques dits intégrés ("Integrated Assessment"), permettant de relier les trajectoires d'émissions de GES à leur concentration dans l'atmosphère ainsi que leur effet sur la température, le niveau des précipitations et le niveau de la mer (Global Circulation Model-GCM).

Le tableau suivant, établi par Ekins et Barker (2001, [?]) donne un aperçu des principaux modèles utilisés pour la quantification des coûts d'une réduction des émissions de GHG. Ces différents modèles sont triés selon les degrés croissants de désagrégation dans la représentation de l'économie mais aussi dans la modélisation de l'interaction énergie-carbone [24].

Table 5.1 Types of model used in the GHG mitigation studies.

		Energy/carbon model		
		Carbon Coefficients	Fuel Supplies & Demands by Sector	Energy Technology Detail
Economy model	Aggregate Production/cost Function	FUND* RICE*		CETA* MERGE3* GRAPE*
	Aggregate Macroeconometric		Oxford*	
	Multisectoral General Equilibrium		MIT-EPPA* WorldScan G-Cubed* GEM-E3 (EU)	ABARE-GTEM* AIM* MS-MRT* SGM*
	Multisectoral Macroeconometric		MDM-E3 (UK) E3ME (EU)	

Note: Most of the models (marked *) are global models described in the EMF-16 study (see Weyant and Hill, 1999). (CPB, 1999) describes WorldScan; (Conrad and Schmidt, 1998) describes GEM-E3; and (Barker, 1995 and 1998) describes MDM-E3 and E3ME.ENDSource: adapted from Weyant and Hill (1999)

FIGURE 15 – Catégorisation des principaux modèles utilisés pour les études des quantification de réduction des GES

24. A mesure que l'on avance vers la droite et le bas dans ce tableau le niveau de désagrégation augmente.

Chapitre 2 : Réforme fiscale environnementale : cas d'un modèle OLG d'une petite économie ouverte à deux secteurs de production

Equilibre du marché des biens.

La nullité du profit de l'entreprise productrice de bien non-énergétique implique :

$$Y^g = w_t L_t^g + Ck_t K_t^g + p_t^e(1+t_t^e)E_t.$$

Or l'énergie finale est totalement absorbée dans l'économie soit en tant que bien de consommation pour les ménages soit en tant qu'input de production pour le secteur productif ; donc :

$$Y^g = w_t L_t^g + Ck_t K_t^g + p_t^e t_t^e E_t + p_t^e(Y_t^e - N_t c_t^e - N_{t-1} d_t^e)$$

Via la condition de nullité du profit pour l'entreprise productrice d'énergie finale, on obtient :

$$Y^g = w_t L_t^g + Ck_t K_t^g + p_t^e t_t^e E_t + p_t^e[w_t L_t^e + Ck_t K_t^e + p_t^z(1+t_t^z)Z_t] - p_t^e(N_t c_t^e + N_{t-1} d_t^e)$$

D'autre part,

$$p_t^e(N_t c_t^e + N_{t-1} d_t^e) = N_t(p_t^c c_t^{tot} - c_t^g) + N_{t-1}(p_t^c d_t^{tot} - d_t^g) - (N_t(t_t^g c_t^g + t_t^e c_t^e) + N_{t-1}(t_t^g d_t^g + t_t^e d_t^e))$$

En intégrant l'équation d'équilibre budgétaire de l'Etat, ceci implique :

$$\begin{aligned} p_t^e(N_t c_t^e + N_{t-1} d_t^e) =& N_t(p_t^c c_t^{tot} - c_t^g) + N_{t-1}(p_t^c d_t^{tot} - d_t^g) - G_t - ((1+r_t)B_{t-1} - B_t) \\ &+ N_t t_t^w w_t h_t + t_t^z p_t^z Z_t + t_t^e p_t^e E_t \end{aligned}$$

Donc, avec $N_t h_t = L_t = l_t^g + L_t^e$ et $K_t = K_t^g + K_t^e$:

$$Y_t^g = (1-t_t^w)w_t L_t + Ck_t K_t + p_t^z Z_t + G_t + ((1+r_t)B_{t-1} - B_t) - N_t(p_t^c c^{tot} - c_t^g) - N_{t-1}(p_t^c d^{tot} - d_t^g)$$

D'autre part nous avons,

$$\begin{aligned} N_t p_t^c c_t^{tot} + N_t s_t &= (1-t_t^w)w_t L_t \\ N_{t-1} p_t^c d_t^{tot} &= (1+r_t)s_{t-1} \end{aligned}$$

D'où :

$$Y_t^g = N_t c_t^g + N_{t-1} d_t^g + Ck_t K_t + p_t^z Z_t + G_t + N_t s_t - (1+r_t)N_{t-1} s_{t-1} + ((1+r_t)B_{t-1} - B_t)$$

En y substituant l'épargne via l'expression : $N_t s_t = B_t K_{t+1} + F_t$, on obtient :

$$Y_t^g = N_t c_t^g + N_{t-1} d_t^g + (K_{t+1} - (1-\delta)K_t) + p_t^z Z_t + G_t + F_t - (1+r_t)F_{t-1}$$

Evolution de long terme de la pollution.

Avec un coefficient d'émissions identique pour tous les usages énergétiques, l'équation d'accumulation de pollution dans l'atmosphère se réécrit :

$$P_t = P_{t-1}(1-m) + \theta Y_t^e, \text{ car } Y_t^e = N_t c_t^e + N_{t-1} d_t^e + E_t$$

Sachant qu'à partir d'une date t, que nous initialisons à $t = 0$, Y_t^e rejoint une trajectoire de croissance équilibrée : $Y_t^e = y_0^e(1+n)^t$. Il est alors possible d'en déduire une expression de P_t qui ne dépende que du temps (suite récurrente d'ordre 1) :

$$P_t = \underbrace{\left[P_0 - \theta y_0^e \frac{1+n}{n+m}\right](1-m)^t}_{\text{Dynamique transitoire} \to 0 \text{ en } +\infty} + \underbrace{\left(\theta y_0^e \frac{1+n}{n+m}\right)(1+n)^t}_{\sim cste \times (1+n)^t \text{ en } +\infty}$$

Ainsi, $\ln(P_t) \sim_{+\infty} \ln\left(\theta y_0^e \frac{1+n}{n+m}\right) + t\ln(1+n)$

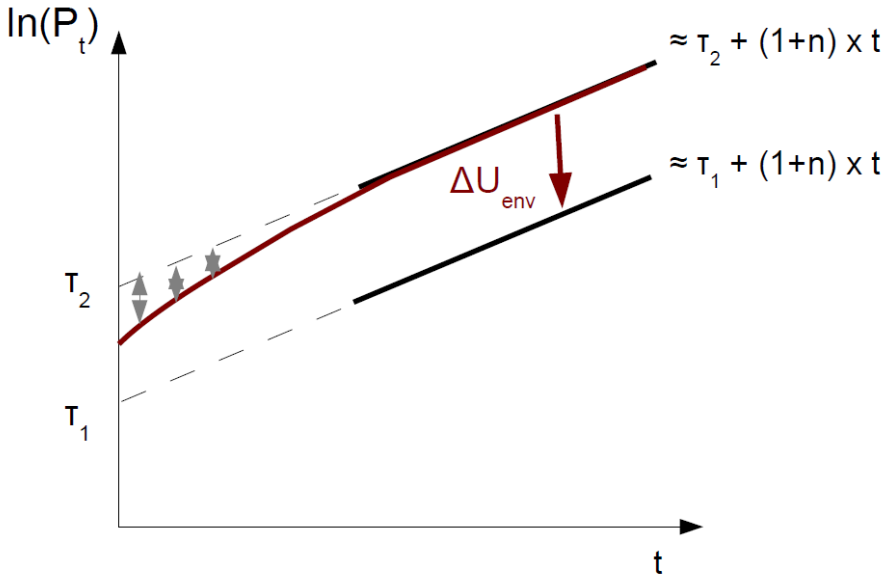

FIGURE 16 – Dynamique de long terme de la pollution, pour une variation du vecteur de taxes (nouveau vecteur exogène à l'état 2)

Entre deux états (1 et 2) de long terme générés par des vecteurs de taxes différents, la différence d'utilité environnementale pour une même génération sera déterminée par la variation de la production d'énergie finale y^e qui détermine l'origine de l'asymptote (τ). C'est ce que l'on observe sur le graphe 16.

Chapitre 3 : Coût du CO2, coût de la dette et coût de production dans le secteur électrique

	Fissile	**Thermique à combustion fossile**			**Énergies Renouvelables**					**Total**
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	Eolien offshore	PV	
Capacités installées (GW)	65	2,9	10,9	8,8	25,2	2,6	22	10	18	**165**
Énergie produite (TWh)	426	13	18	1	69	15	44	23	18	**627**
Part dans le mix électrique	68%	2%	3%	0%	11%	2%	7%	4%	3%	**100%**
Durée d'utilisation (h/an)	6554	4483	1651	114	2738	5769	2000	2300	1000	

TABLE 15 – Données sur le mix électrique en 2030 - RTE scenario median

	Fissile	**Thermique à combustion fossile**			**Énergies Renouvelables**				
	Nucléaire	Charbon	Gaz	Fuel	Hydraulique	Autres ENR	Eolien terrestre	Eolien offshore	PV
Coût en capital	35,75	39,48	50,88	506,18	58,17	52,81	61,11	168,28	101,85
Coût variable combustible	12,00	60,78	75,01	173,65	0	40			
Coût O&M	8,85	8,92	10,90	114,40	14,61	10,4	12	33,04	20
Coût complet	56,60	109,13	136,79	794,23	72,78	103,21	73,11	201,32	121,85

TABLE 16 – Coût complet de production par MWh (2030)

Résumé. Nous nous proposons dans cette thèse d'étudier les interactions entre politiques climatiques et budgétaires, dans un cadre unifié tenant compte de la dynamique de l'endettement des États, des arbitrages intergénérationnels, et de l'existence de disparités sectorielles. Dans un premier temps, nous identifions les enjeux autour de la réussite d'une réforme fiscale environnementale et les conditions structurelles influençant le succès d'une telle réforme. Une approche de la problématique au travers d'un exercice de modélisation nous permet par la suite de traiter des impacts intergénérationnels et sectoriels de différents designs de réformes fiscales environnementales dans le cas français. Il apparaît en particulier que la taxation de l'énergie finale en tant que facteur de production intermédiaire, associée à une réduction des charges fiscales pesant sur le travail permet de limiter relativement plus les coûts associés à la politique climatique. Enfin, dans une dernière partie nous nous intéressons plus spécifiquement au secteur électrique, et aux conséquences de différents scénarios de politiques climatiques et budgétaires en termes de coûts de production pour ce secteur. Nous montrons que si les tensions sur les finances publiques ne se résorbent pas, la hausse du coût de financement pourrait être défavorable au renouvellement du parc électrique en faveur de technologies décarbonées telles que les ENR. Ainsi, au travers d'approches macro-économique et sectorielle, ces travaux de thèse permettent d'illustrer l'arbitrage auquel les gouvernements pourraient être confrontés quant au mode de recyclage des recettes fiscales vertes retenu dans la politique climatique.

Mots Clés. Politique climatique, politique budgétaire, économie de la fiscalité, coûts complets de production de l'électricité.

Summary. This thesis studies the interactions between climate and fiscal policies, in terms of dynamic, intergenerational and sectoral effects. First, we identify the main goals encompassed by environmental tax reforms as well as the main structural conditions influencing the success of such a reform. In a second part we develop an overlapping generations model to assess the economic, intergenerational and sectoral impacts of different tax reforms in France. More precisely, our results show that taxing final energy and reducing labor taxes represents the most efficient way to combine climate and economic goals, in terms of welfare, and might lead to reaping the double-dividend. In a final chapter, this thesis focuses on the power generation sector, a major player in the energy transition. We study how different scenarios for climate and fiscal policies can impact production costs and investment decisions in this sector. If pursuing the double-dividend does not allow to reduce public debt, we show that the upward pressure on the capital cost could disadvantage investments in low-carbon technologies such as renewable technologies. On the basis of a macroeconomic approach on one hand and a sectoral approach on the other hand, this thesis illustrates the trade-off that governments may face in designing their climate policy : minimizing the economic cost or prioritizing the repayment of the public debt.

Keywords. Environmental policy, government debt, economics of taxation, Levelized Cost Of Electricity.