

UN MODÈLE QUANTITATIF DE
DÉVELOPPEMENT DURABLE :

R&D, TAXES ET RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE

RAPPORT FINAL
CONTRAT DE RECHERCHE ENTRE L'IFE ET L'IDEI

IDEI

Rédacteurs : Patrick Fève et André Grimaud

Octobre 2004

Avant-propos

Ce document est le rapport final d'un contrat de recherche entre l'IFE et l'IDEI. Il présente l'état actuel d'un modèle quantitatif de développement durable en croissance endogène. Il a été rédigé par Patrick Fève et André Grimaud. Ce modèle est le fruit d'une collaboration impliquant également Alain Bousquet, Fabrice Collard, Norbert Ladoux, Franck Portier et Gilles Saint Paul. L'IDEI continue de développer activement le modèle.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Croissance et réchauffement climatique : un cadrage quantitatif	7
2.1	Le cycle du carbone et le bloc climatique	8
2.2	Ordres de grandeur dans le compte central de B&N	9
2.3	Inertie du système	15
3	Un modèle quantitatif de croissance durable en croissance exogène	19
3.1	Le consommateur	19
3.2	Le secteur final	21
3.3	Les entreprises du secteur intermédiaire	21
3.4	Le secteur de la recherche	25
3.5	Extraction	27
3.6	L'équilibre de l'économie	28
3.7	Équations : Équilibre de l'économie	28
3.8	Équations : L'économie stationnarisée	30
4	Résolution numérique du modèle	32
4.1	La ré-écriture du système	34
4.2	Résolution du système	36
4.3	Illustration : l'algorithme avec une variable avancée et une variable retardée	38
4.4	Utilisation en simulation de l'algorithme	40
5	Calibration du modèle	42
5.1	La méthode de calibration	42

<i>IDEI – Un modèle quantitatif de développement durable</i>	3
5.2 Constitution de la base de données	43
5.3 Le consommateur	47
5.4 La production	49
5.5 Le secteur de la recherche	54
5.6 La technologie d'extraction	61
5.7 La fiscalité	62
5.8 Résumé de la calibration	64
6 Le compte central du modèle	66
6.1 Calage des émissions du compte central du bloc OCDE et du comportement du reste du monde	66
6.2 Compte central : variables économiques	68
6.3 Compte central : variables physiques	73
7 Les mécanismes économiques propres au modèle	76
7.1 Dynamique de transition : Diminution du stock de capital phy- sique initial	77
7.2 Dynamique de transition : Augmentation de la “profondeur des puits”	88
7.3 Choc sur la répartition des brevets	98
8 Impact des politique fiscales de taxation du carbone et de subvention de la R&D	109
8.1 Taxes et/ou Subventions?	109
8.2 Vers un contrôle des émissions	114
9 Conclusion	119

Chapitre 1

Introduction

Ce rapport expose le contenu et les résultats d'un modèle quantitatif visant à évaluer les politiques fiscales de lutte contre le réchauffement global de la planète. Il s'agit d'un rapport technique, qui combine modélisation théorique, calibration du modèle et évaluation quantitative.

Ce rapport se compose de 9 chapitres. Après ce bref chapitre introductif, le chapitre 2 montre les enjeux quantitatifs du problème de l'effet de serre pour les économistes, en montrant l'inertie des phénomènes géophysiques, même pour des variations brutales des comportements économiques. Le chapitre 3 présente en détail le modèle que nous avons construit, modèle dynamique d'équilibre général avec énergie et croissance endogène, auquel se rattache un modèle du cycle du carbone et un modèle dynamique d'évolution de la température atmosphérique. Le chapitre 4 détaille les problèmes liés à la résolution d'un tel modèle à anticipations rationnelles, et expose les solutions que nous apportons. Le chapitre 5 présente dans le détail la calibration du modèle, ainsi que la capacité du modèle à reproduire les évolutions passées. Le chapitre 6 présente brièvement le compte central du modèle, compte central autour duquel nous envisagerons nos variantes de politique économique. Le chapitre 7, par le biais d'étude des réponses du modèle à des chocs sur ses variables d'état, en dégage ses mécanismes économiques internes. Le chapitre 8 étudie la réponse de l'économie à des chocs exogènes sur les instruments fiscaux à la disposition des autorités, à savoir la taxation des émissions de dioxyde de carbone et la subvention à la R&D permettant d'économiser l'énergie. Enfin, le chapitre 9 conclue brièvement.

Brève description du modèle : Ce modèle s'intéresse à une économie fermée que l'on interprète comme étant l'économie mondiale. La modélisation incorpore les développements les plus récents de la théorie de la croissance endogène, qui formalise explicitement le progrès technique comme résultant d'une activité innovante qui obéit à des déterminants économiques au même titre que la consommation et l'investissement. Cette approche insiste sur les rentes de monopole comme facteur clé de l'incitation à la croissance.

L'innovation en économie d'énergies et les possibilités de substitution de facteurs non polluants aux facteurs polluants remettent en question les conclusions traditionnellement pessimistes sur la soutenabilité d'un taux de croissance positif en présence de problèmes d'environnement.

Le modèle fait également, suivant la pratique moderne, l'hypothèse d'anticipations rationnelles, d'après laquelle les agents connaissent le fonctionnement de l'économie et anticipent correctement le régime de politique économique qui prévaudra dans le futur.

Le modèle est fondé sur une fonction de production qui détermine la quantité de biens produits en fonction de la quantité de facteurs de production utilisée. Il existe deux types de facteurs de production en sus du capital : les facteurs polluants et non-polluants. Les facteurs non polluants sont considérés comme fixes tandis que les facteurs polluants proviennent d'une industrie d'extraction dont le coût marginal augmente aussi bien quand le flux d'extraction est plus élevé que quand le stock cumulé de ressources extraites par le passé est plus grand. Cette dernière dépendance permet de rendre compte de la croissance du coût des nouveaux gisements au fur et à mesure que les gisements existant se tarissent.

L'économie croît parce qu'au cours du temps interviennent des innovations qui permettent d'augmenter l'efficacité de l'un ou l'autre des types de facteurs. Ainsi distinguera-t-on les innovations "vertes", qui augmentent l'efficacité, et donc la demande relative, de facteurs non polluants, des innovations qui accroissent l'efficacité et la demande du facteur polluant. Les innovations proviennent de l'activité d'une partie des travailleurs ("les chercheurs"), ainsi il existe un lien entre le nombre de chercheurs et la quantité d'innovations produites par unité de temps. Dans l'état actuel du modèle, le nombre de chercheurs est considéré comme fixe, mais on envisage une extension où celui-ci serait endogène, c'est-à-dire où les individus choisiraient leur

carrière au moment de leur entrée sur le marché du travail. La proportion de chercheurs dans l'économie dépendrait ainsi, à long terme, du salaire de ceux-ci relativement aux autres catégories de travailleurs. Dans le modèle, on considère l'impact d'une taxe sur les émissions et d'une subvention à la R&D. Plus généralement, le modèle permet de simuler l'impact de n'importe quelle évolution au cours du temps de la taxe sur l'énergie à condition de se raccorder sur un sentier de croissance équilibrée. Ainsi, on peut par exemple étudier l'impact immédiat de l'anticipation d'une hausse de la taxe dans le futur.

Au delà de ces aspects théoriques innovants, le modèle se veut un outil de quantification des effets de politique fiscale de lutte contre l'effet de serre, et propose donc des variantes chiffrées. À terme, il constituera un outil d'aide à la réflexion en matière d'action publique contre l'effet de serre.

Chapitre 2

Croissance et réchauffement climatique : un cadrage quantitatif

Le modèle quantitatif que nous développons comprend pour l'essentiel trois blocs : un bloc OCDE, un bloc "Reste du Monde" et un bloc climatique. Le bloc OCDE est celui qui fait l'objet de notre effort de modélisation. Il n'est cependant pas possible de passer directement des émissions de gaz à effet de serre par l'OCDE au réchauffement de la planète. Le propre du problème de réchauffement climatique est en effet d'être de dimension planétaire. Et le reste du monde contribuera de manière croissante aux émissions mondiales durant le prochain siècle, sous une double dynamique de croissance du Pib par tête et de la croissance de la population.

Il nous est donc nécessaire d'adopter un jeu d'hypothèse concernant l'évolution du reste du monde, ainsi que d'utiliser une maquette du cycle du carbone et de la dynamique de la température atmosphérique. Pour ces deux blocs exogènes, sur lesquels ne porte pas notre effort de modélisation, nous reprenons les hypothèses de Boyer & Nordhaus.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de présenter le bloc température du modèle, pour des hypothèses arbitraires de croissance. Nous verrons ainsi que les évolutions de la concentration atmosphérique en CO_2 et la température atmosphérique moyenne sont extrêmement inerte à un horizon de 100 ans. Le bloc économique concernant la croissance de l'économie sera présenté dans le chapitre suivant.

2.1 Le cycle du carbone et le bloc climatique

Concernant le cycle du carbone, nous reprenons la formulation de Boyer & Nordhaus, qui suppose que l'accumulation et les échanges de CO₂ peuvent être approchés par un modèle linéaire à trois réservoirs. Le principe général est que les océans profonds représentent un réservoir vaste mais non illimité pour le carbone. Il existe dans le modèle trois réservoirs pour le carbone : en premier lieu l'atmosphère, en second lieu la biosphère et la surface des océans (qui absorbent rapidement le carbone), et, en troisième lieu, les océans profonds. Le modèle climatique est ensuite calibré/estimé pour posséder les mêmes propriétés variantielles que les gros modèle climatiques.

Sous les hypothèses que le cycle du carbone était à l'équilibre en 1750, que toutes les émissions se font dans l'atmosphère et qu'il n'y a pas de flux entre l'atmosphère et les océans profonds, on utilise le système dynamique suivant :

$$\begin{aligned} M_{AT}(t) &= 10 \times ET(t-1) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) \\ M_{UP}(t-1) &= \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) \\ M_{LO}(t) &= \phi_{33}(t-1) + \phi_{23}M_{UP}(t-1) \end{aligned}$$

où $M_i(t)$ représente la masse de carbone dans le réservoir i et à la période t (en Gigatonnes de Carbone (GtC)), ϕ_{ij} le taux d'échange du réservoir i au réservoir j par unité de temps, ET les émissions annuelles de CO₂ exprimées en GtC. AT représente l'atmosphère, MU la surface des océans et la biosphère et LO les océans profonds.

Nous reprenons également les équations de température de Boyer & Nordhaus. Ces équations prennent en entrée les émissions de gaz à effet de serre en en déduisent une variation de température par rapport à 1900. Dans la mesure où notre modèle ne prend en compte que les émissions de CO₂, on prend comme exogènes les émissions d'autres gaz à effet de serre, et fixons leur trajectoire au niveau de B&N. Dans le bloc température, c'est en accroissant la radiation que l'accumulation de GES conduit à un réchauffement climatique. L'équation liant forçage et accumulation de GES est donnée par :

$$F(t) = \eta \left(\log \left(\frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}^{PI}} \right) / \log(2) \right) + O(t)$$

où F représente l'accroissement du forçage depuis 1990, en Watts par mètres carrés, M_{AT}^{PI} la concentration atmosphérique en CO_2 à l'ère pré-industrielle (596.4 GtC) et O le forçage des autres GES (CFC, CH_4 , NO_2 et ozone) et des aérosols. Étant donné un flux de forçage, l'évolution de la température est donnée par :

$$\begin{aligned} T(t) &= T(t-1) + \sigma_1(F(t) - \lambda T(t-1) - \sigma_2(T(t-1) - T_{LO}(t-1))) \\ T_{LO}(t) &= T_{LO}(t-1) + \sigma_3(T(t-1) - T_{LO}(t-1)) \end{aligned}$$

où T représente l'accroissement de la température moyenne de l'atmosphère et de la surface des océans depuis 1900 et T_{LO} l'accroissement de température des océans profonds.

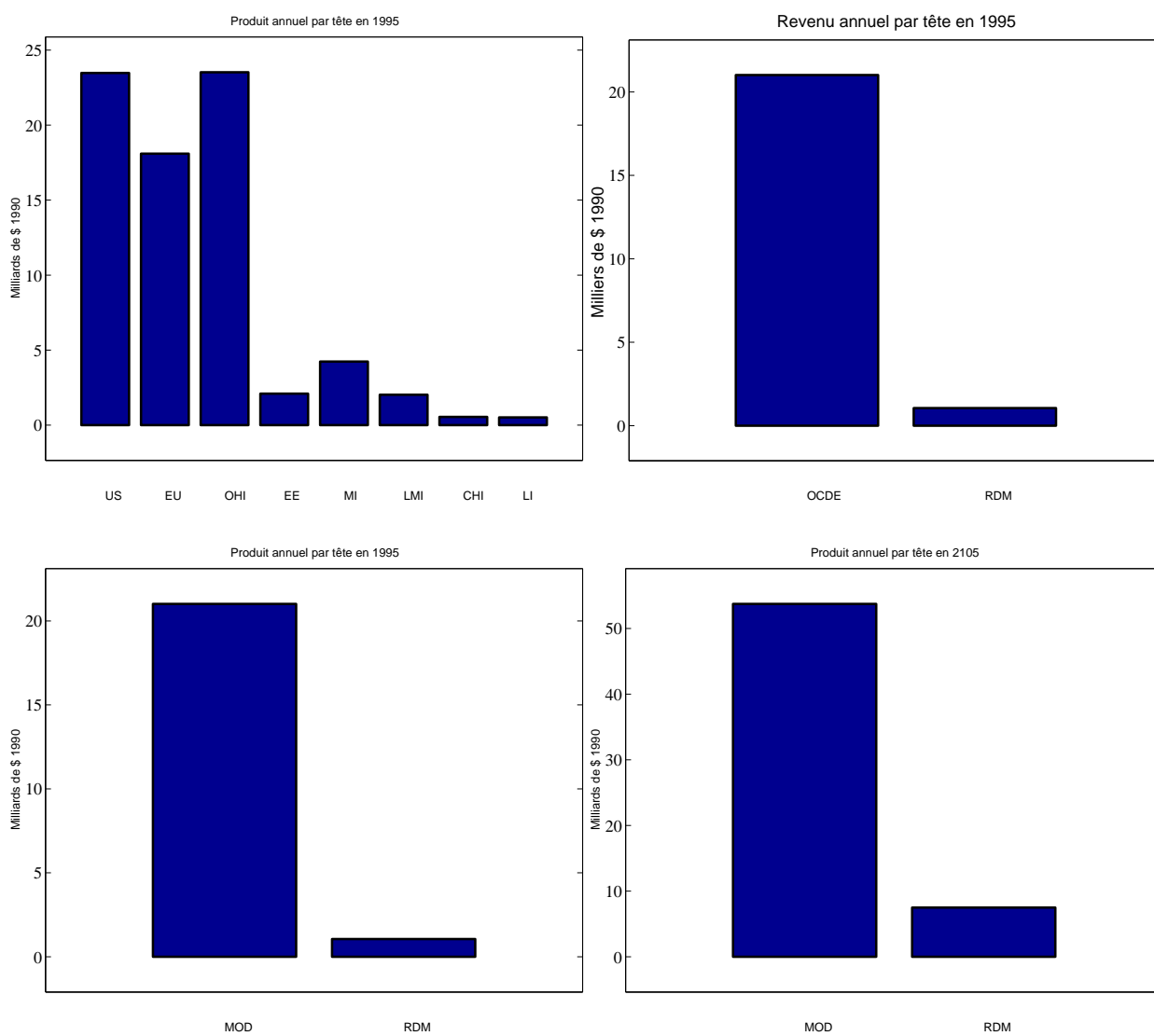
2.2 Ordres de grandeur dans le compte central de B&N

Avant d'utiliser notre modèle en variante pour évaluer l'impact de différentes politiques sur le réchauffement global, il est nécessaire de prendre la mesure des phénomènes en considérant une simulation du bloc température pour des trajectoires données *a priori* de production et d'émission. Dans ce qui suit, les projections de croissance, de population et d'émissions sont reprises de B&N. Notre "modèle" correspond aux zones États-Unis (US), Europe (EU) et Autres pays à haut revenu (OHI) de B&N, soit approximativement l'OCDE. Le "reste du monde" correspond aux zones Europe de l'Est (EE), pays à revenu moyen (MI), pays à revenu moyen-faible (LMI) et pays à faible revenu (LI).

Examinons les principales hypothèses du compte central de B&N. Nous nous inspirerons de ce compte central pour toutes les variables exogènes à notre modèle. La figure 2.1 montre le revenu annuel par tête de chacune des zones en 1995 et en 2015, ainsi que l'évolution du revenu annuel moyen par tête des pays du modèle et du reste du monde. On note une très faible convergence en niveau, les revenus annuels moyens étant de 21000 dollars 1990 pour les pays du modèle et 1000 pour le RDM en 1995, contre respectivement 53000 et 7000 environ en 2015.

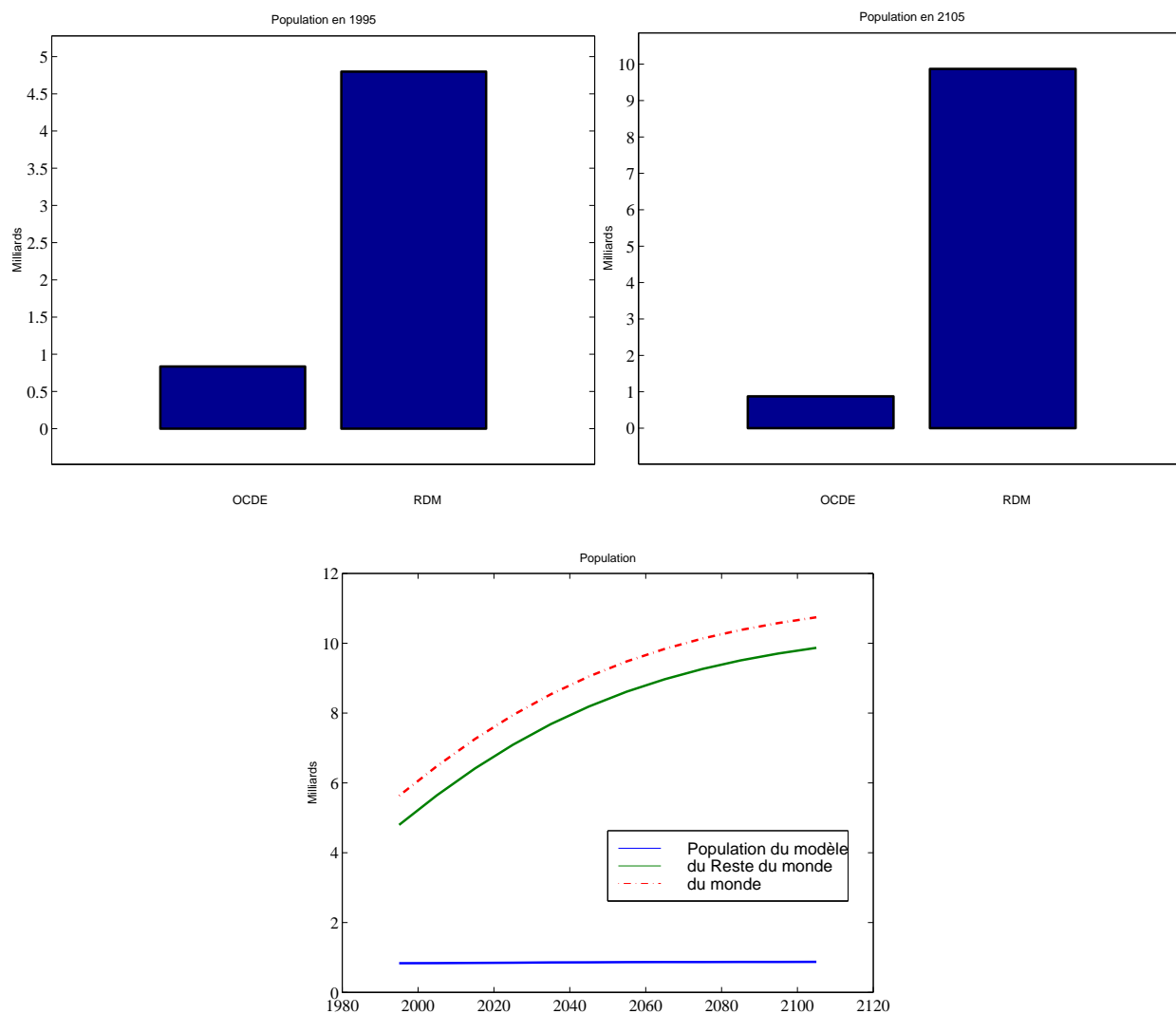
Cela ne signifie cependant pas que le reste du monde aura sur l'ensemble de la période un impact négligeable. En effet, le reste du monde possède

FIG. 2.1 – Production par tête : niveaux et tendances



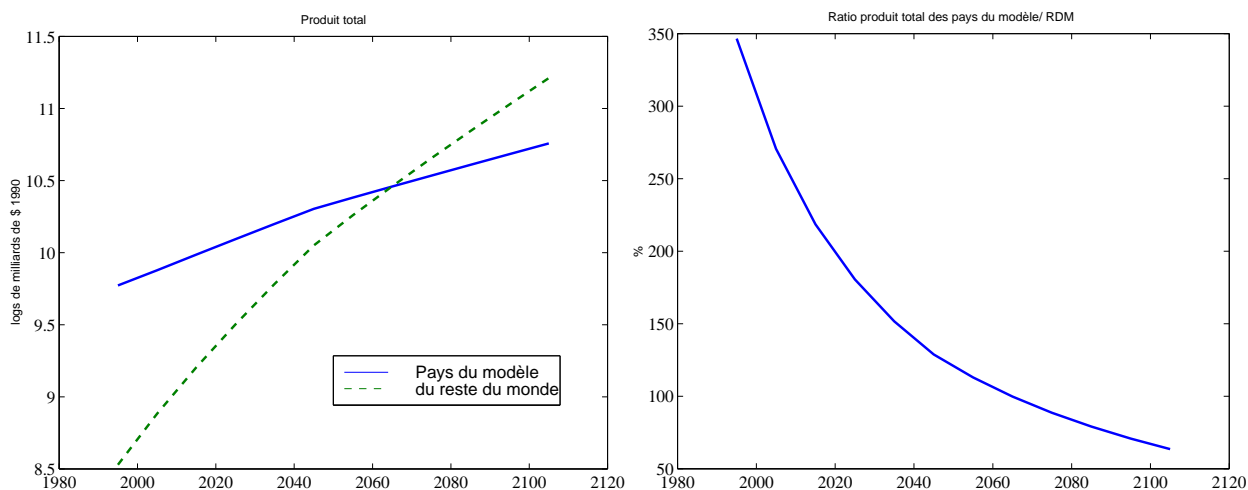
d'une part une population bien plus importante et croissant plus vite, et pollue d'autre part relativement plus par dollar produit, comme le montre les graphiques 2.2, 2.3 et 2.4.

FIG. 2.2 – Population : niveaux et tendances



La population du modèle est prévu relativement stable sur le prochain siècle (835 millions en 1995, 874 en 2105), alors que celle du RDM est près de huit fois plus importante en 1995 (4,8 milliards), et croît bien plus rapidement (près de 10 milliards en 2015 (figure 2.2). Dés lors, le produit total du RDM dépassera celui des pays du modèle vers 2060.

FIG. 2.3 – Production totale : niveaux et tendances



Enfin, le RDM émet nettement, plus de CO₂ par dollar produit. En 1995, les pays du modèle émettent 160 grammes de CO₂ par dollar 1990 produit, contre 660 grammes pour le reste du monde. Étant données les hypothèses de progrès technique économisant l'énergie (qui sera endogène dans notre modèle) et de décarbonisation de B&N, c'est respectivement 69 grammes et 161 grammes de CO₂ par dollar 1990 produit qui seront émis en 2105.

Comme on le constate sur la figure 2.4, le RDM émet au total un peu plus de 3 GtC par an en 1995, contre un peu moins de 3 pour les pays du modèle. En 2015, selon le compte central de B&N, ce sera un peu moins de 4 GtC par an pour les pays du modèle contre près de 12 GtC pour le RDM. Dés lors, la forte hausse des émissions mondiales sera pour une part principale attribuable au RDM, comme on le constate sur la figure 2.4. Cela signifie-t-il qu'il n'est pas quantitativement pertinent de ne modéliser que les pays de l'OCDE, alors que ceux-ci vont occuper une part faible des émissions mondiales pour le siècle à venir. Non, car il y a tout lieu de penser que les efforts d'économie d'énergie sont en grande partie liés à des efforts de R&D, efforts qui seront principalement effectués dans les pays du Nord, mais qui diffuseront dans l'ensemble du monde (et ce sera l'intérêt des pays riches de faciliter la diffusion de ce progrès technique).

La figure 2.5 présente l'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂, des accroissements de température atmosphérique moyenne (par rap-

FIG. 2.4 – Émissions de CO₂ : niveaux et tendances

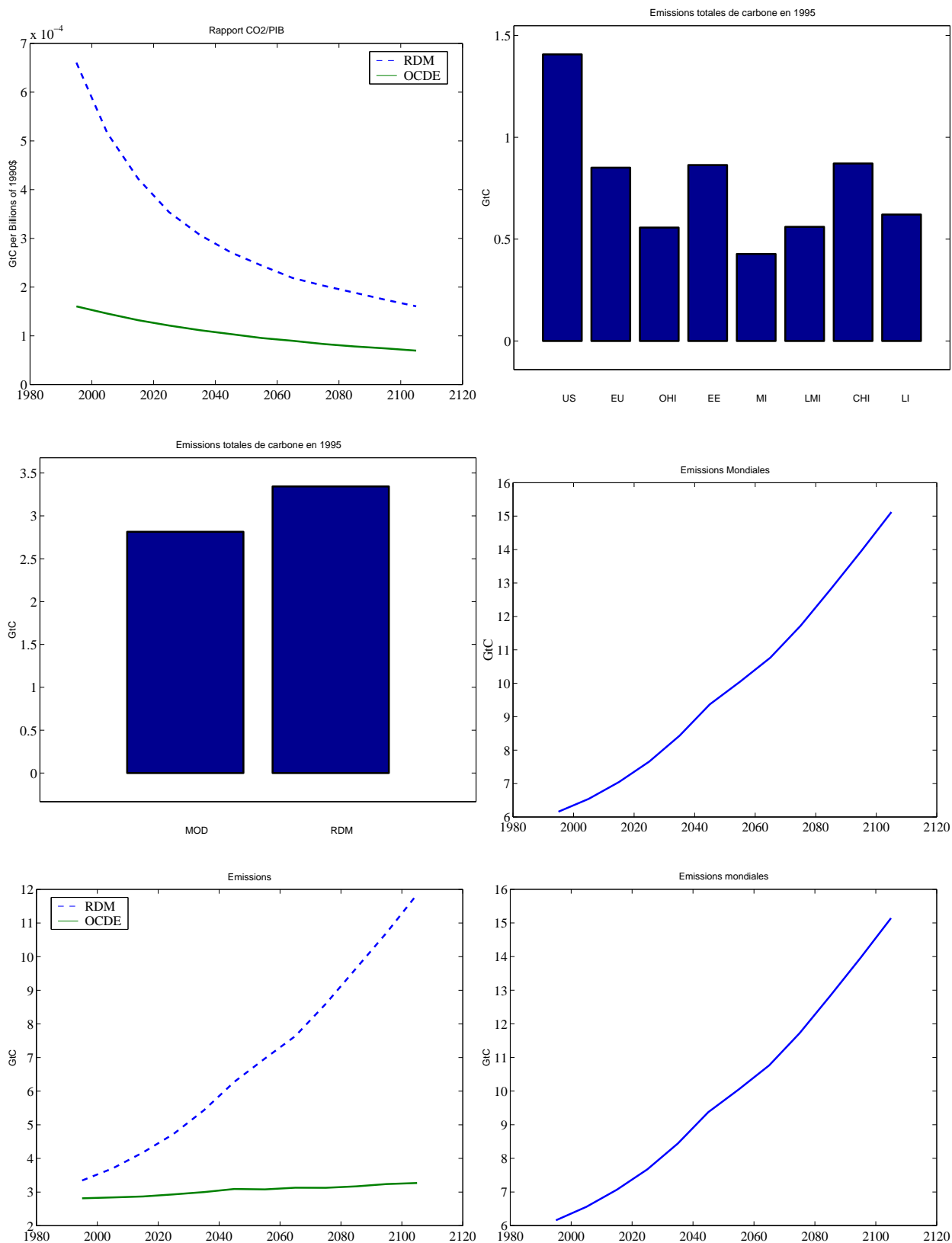
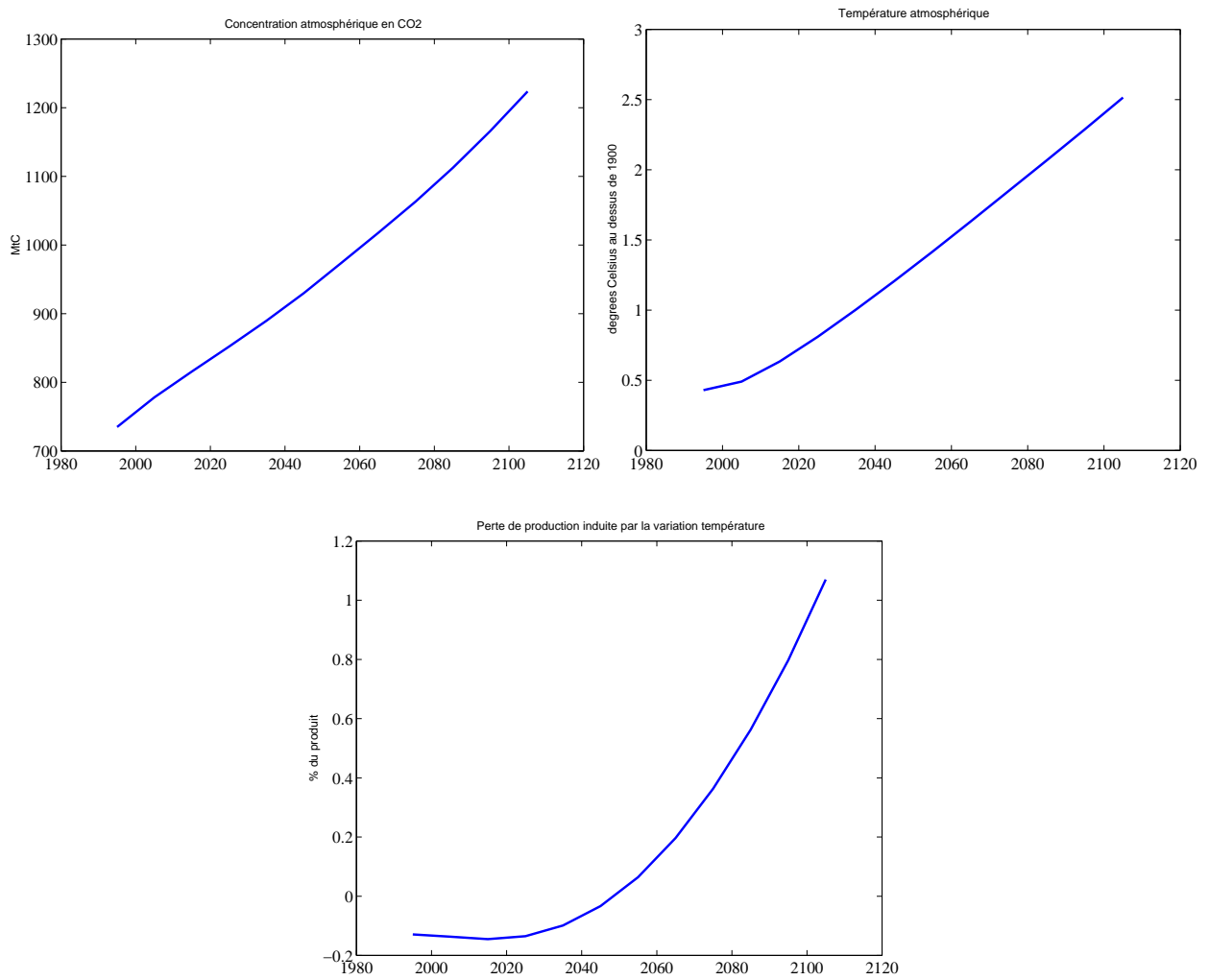


FIG. 2.5 – Concentration, température et perte de produit



port à 1900) ainsi qu’une évaluation faite par B&N du coût de ce réchauffement (en points de production)¹. Notons que dans ce scénario de base de B&N, la température est en 2015 2.5 degrés Celsius au dessus de son niveau de 1900, et que le coût engendré est de un peu plus de 1% de la production mondiale.

2.3 Inertie du système

Pour donner une idée de la marge de manœuvre dont nous disposons à l’horizon 2015, nous simulons le bloc température sous l’hypothèse que les émissions sont nulles à partir de 1995, ce qui ne correspond évidemment à aucune expérience réaliste. Les résultats sont présentés dans le graphiques 2.6. On constate que la concentration atmosphérique baisse relativement lentement, de sorte que la température continue à augmenter jusqu’en 2015. Selon les estimations de B&N, une telle hausse de la température atmosphérique moyenne est un bienfait plutôt qu’un problème, puisque la perte en production associée est négative.

Si l’on poursuit la simulation, on constate sur la figure 2.7 que la progression de la température se retourne vers 2125, et demeure en 2350 supérieure à son niveau actuel, de près de 0.5 degré celsius.

Faisons maintenant l’hypothèse que la croissance se poursuit au rythme précédemment supposé, mais que le rapport CO₂/production demeure dans tous les pays à son niveau de 1995. On est la dans un scénario extrême, qui représente l’autre coté de la fourchette des possibles par rapport au scénario “zéro émissions”. Les conséquences climatiques de ce scénario sont présentées sur la figure 2.8.

On observe une véritable explosion des émissions (prés de 35 GtC par an en 2105), de la concentration et de fait de la température (+3° en 2015), pour un coût évalué par B&N à plus de 2% du PIB.

C’est entre ces deux scénarios que se situe le domaine des possibles, et notre objectif sera de montrer comment et à quel coût atteindre des trajectoires intermédiaires.

¹Cette évaluation est bien sur extrêmement fragile et controversée, dans la mesure où sont comptabilisées des activités non marchandes (les loisirs de plein air) et le coût d’un risque de catastrophe (qui dépend des hypothèses faites sur l’aversion au risque des agents et sur la mesure de probabilité sur l’espace des états de la nature possible)

FIG. 2.6 – Projection avec zéro émissions

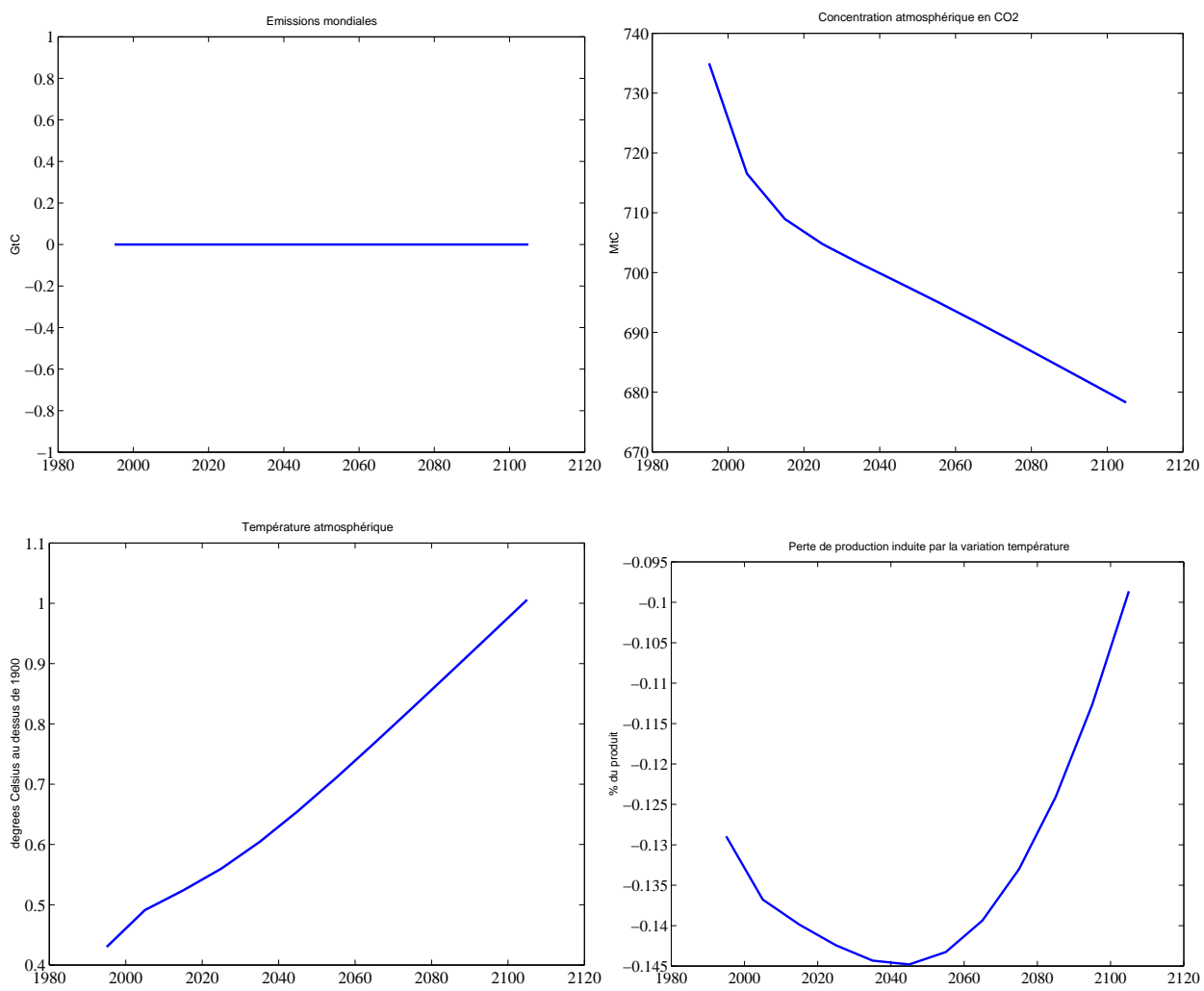


FIG. 2.7 – Projection avec zéro émissions

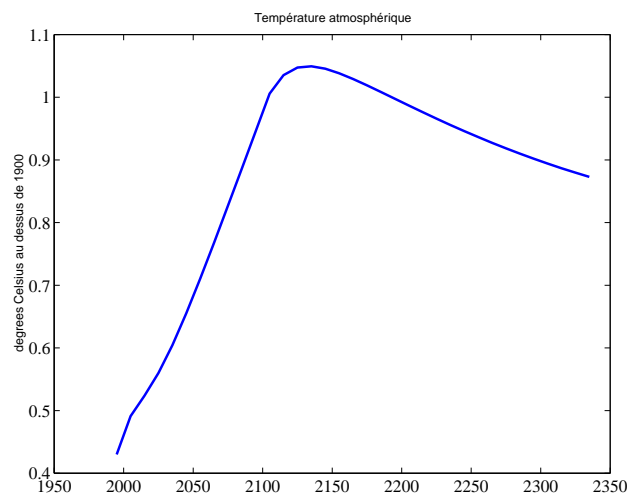
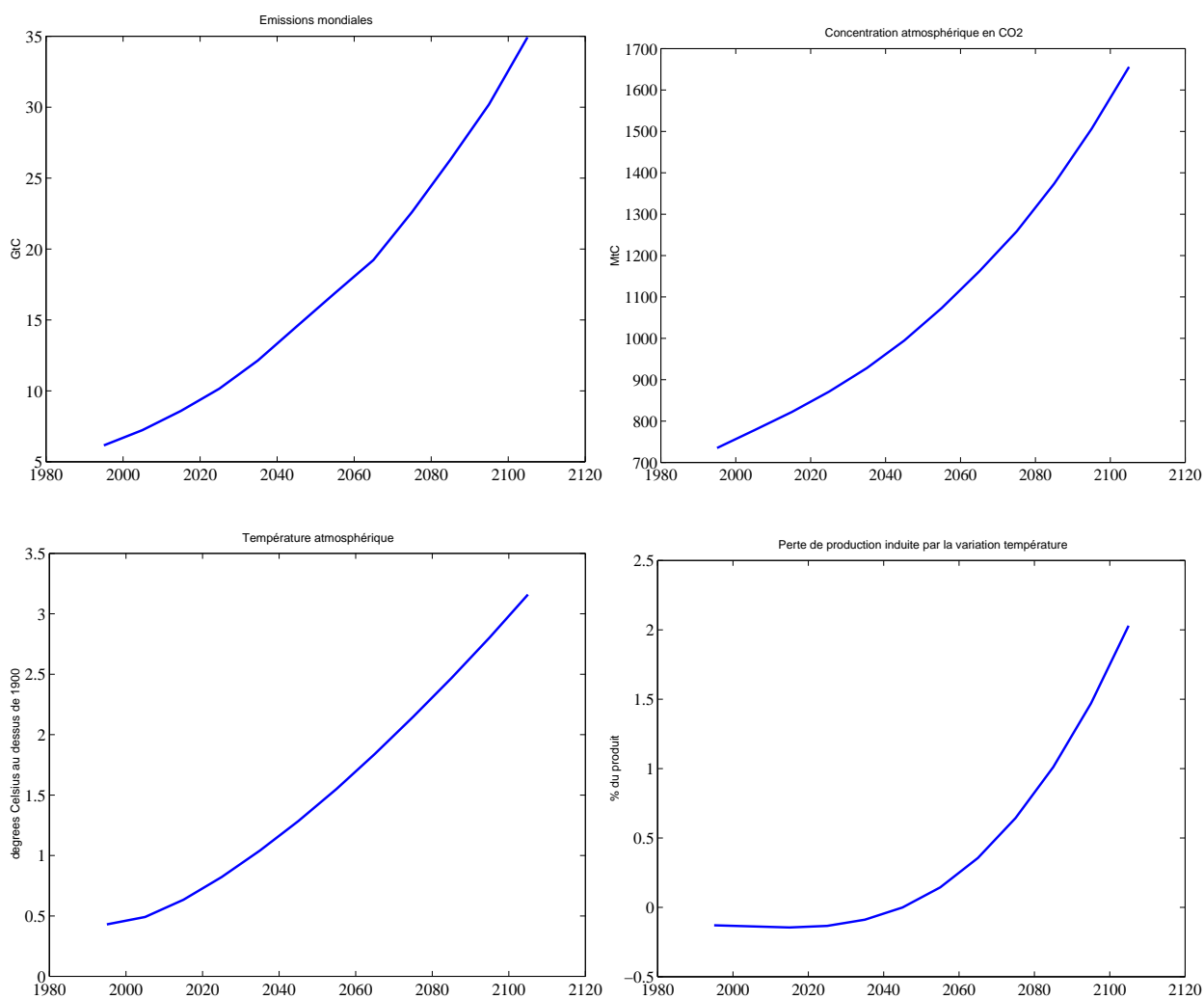


FIG. 2.8 – Projection avec un rapport CO₂/production bloqué à son niveau de 1995



Chapitre 3

Un modèle quantitatif de croissance durable en croissance exogène

Nous considérons une économie intégrée représentant une zone industrialisée — la zone OCDE — peuplée par un ensemble de consommateurs et d'entrepreneurs. Ces derniers produisent un bien final, noté F_t par la suite, pouvant être indifféremment consommé ou investi pour former du capital physique. Ce bien final est produit, notamment, en utilisant un ensemble de biens intermédiaires dont la production nécessite soit l'utilisation du travail, soit l'utilisation d'énergie. Il existe une variété de chacun de ces biens intermédiaires dont la masse s'accroît grâce à un processus de recherche et développement (R&D), spécifique à chaque type de bien. L'extension de l'espace des biens, par la R&D, est à l'origine d'une croissance soutenue dans l'économie. Ce chapitre présente donc le comportement des différents agents, consommateurs et entrepreneurs, ainsi que la détermination de l'équilibre de cette économie.

3.1 Le consommateur

L'économie est composée d'un très grand nombre de ménages tous identiques et ayant une durée de vie infinie. La masse totale de la population est supposée unitaire. Nous faisons donc abstraction de la croissance de la population, et l'ensemble des variables doit s'entendre par tête. Les ménages étant

tous identiques, nous faisons l'hypothèse qu'il existe un agent représentatif, dont les préférences pour la consommation sont représentées par la fonction d'utilité :

$$\mathcal{U}_0 \equiv \sum_{t=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t \frac{C_t^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} \quad (3.1)$$

où C_t représente la consommation. $\rho \in (0, 1)$ désigne le taux de préférence pour le présent du consommateur. Le consommateur entre dans la période en détenant un montant K_t de capital physique, loué aux entreprises du secteur des biens final au prix P_{Kt} , et un montant de titres B_t rémunéré au taux d'intérêt réel r_t . Il reçoit un salaire en paiement de la location de son travail au secteur manufacturier (W_t) ou au secteur de la recherche (W_t^R). Enfin il perçoit les profits des entreprises en monopole dans le secteur des biens intermédiaires et des transferts de l'État (T_t). Ces revenus sont alors utilisés pour consommer (C_t), investir (I_t) et acquérir de nouveaux titres (B_{t+1}). Le ménage fait ainsi face à la contrainte budgétaire

$$B_{t+1} + (1 + \tau_t^C)C_t + I_t = (1 + r_t)B_t + P_{Kt}K_t + W_t(1 - \theta) + W_t^R\theta + \Pi_t + T_t \quad (3.2)$$

L'investissement donne alors lieu à la formation d'un stock de capital, dont la loi d'évolution est donnée par la formule standard d'inventaire permanent

$$K_{t+1} = I_t + (1 - \delta_k)K_t \quad (3.3)$$

où $\delta_k \in (0, 1)$ représente un taux de dépréciation constant.

Les conditions d'optimalité en termes de consommation, accumulation de capital physique et détention de titres conduisent alors — après simplification — aux deux condition d'arbitrage suivantes

$$(1 + \tau_t^C) C_t^{-\sigma} = \frac{1 + r_{t+1}}{1 + \rho} (1 + \tau_{t+1}^C) C_{t+1}^{-\sigma} \quad (3.4)$$

$$P_{Kt} = r_t + \delta_k \quad (3.5)$$

auxquels on adjoint la condition de transversalité

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{1 + \rho} \right)^s C_{t+s}^{-\sigma} (B_{t+1+s} + K_{t+1+s}) = 0$$

3.2 Le secteur final

Ainsi que nous l'avons annoncé précédemment, les entreprises du secteur final produisent un bien homogène, pouvant être consommé ou investi. La production de ce bien est obtenue en combinant un bien panier de biens intermédiaires, noté Y_t , payé au prix P_{Y_t} , et du capital physique, K_t , loué au prix P_{K_t} auprès des ménages sur un marché des facteurs parfaitement concurrentiel. La production du bien s'effectue à rendements constants et est supposée représentée par la fonction de production de type Cobb–Douglas

$$F_t = B_F Y_t^\zeta K_t^{1-\zeta} \quad (3.6)$$

dans laquelle $\zeta \in (0, 1)$. ζ détermine l'élasticité de la production de bien final au panier de biens intermédiaires (Y_t), et B_F est une constante positive déterminant l'échelle de la production. Le marché du bien final et celui des facteurs étant supposés concurrentiel, la maximisation du profit conduit aux demandes de facteurs

$$P_{K_t} K_t = (1 - \zeta) F_t \quad (3.7)$$

$$P_{Y_t} Y_t = \zeta F_t \quad (3.8)$$

3.3 Les entreprises du secteur intermédiaire

Il existe un grand nombre d'entreprises produisant un même bien intermédiaire, en quantité $Y_t \geq 0$. Nous supposons que toutes les entreprises du secteur sont identiques et agissent en situation de concurrence parfaite. Aussi, sans perte de généralité, nous ferons l'hypothèse d'existence d'une entreprise représentative.

Le bien intermédiaire est obtenu en combinant un ensemble de biens intensifs en énergie, noté X_{1t} , et un ensemble de biens intensifs en travail, X_{2t} . La technologie est supposée à rendements constant et représentée par la fonction de production à élasticité de substitution constante

$$Y_t = (\omega^{1-\alpha} X_{1t}^\alpha + (1 - \omega)^{1-\alpha} X_{2t}^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.9)$$

où $\omega \in (0, 1)$ représente la part du bien intensif en énergie dans la production de Y_t , et $\alpha < 1$ détermine l'élasticité de substitution entre les agrégats de biens X_1 et X_2 dans la production de Y .

Soit P_{it} le prix du bien i , la demande pour chacun des biens est obtenue en maximisant le profit de l'entreprise

$$\max_{\{X_{it}\}_{i=1,2}} P_{Yt}Y_t - P_{1t}X_{1t} - P_{2t}X_{2t}$$

sous la contrainte (3.9). La demande pour chaque bien $i = 1, 2$ est alors donnée par

$$X_{1t} = \left(\frac{P_{1t}}{P_{Yt}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \omega Y_t \quad (3.10)$$

$$X_{2t} = \left(\frac{P_{2t}}{P_{Yt}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} (1 - \omega) Y_t \quad (3.11)$$

La libre-entrée sur le marché du bien intermédiaire, qu'implique l'hypothèse de concurrence parfaite, conduit alors à l'annulation des profits des entreprises produisant ce bien. Nous en déduisons l'expression du prix du bien intermédiaire en fonction du prix de chacun des deux autres agrégats de biens :

$$P_{Yt} = \left(\omega P_{1t}^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} + (1 - \omega) P_{2t}^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}$$

Chaque bien X_{it} , $i = 1, 2$, est un agrégat de biens intensifs en énergie ($Z_{1t}(j)$) et en travail ($Z_{2t}(j)$), représenté par la fonction à élasticité constante

$$X_{it} = \left(\int_0^{N_{it}} \tilde{X}_{it}(j)^{\frac{\sigma_i-1}{\sigma_i}} dj \right)^{\frac{\sigma_i}{\sigma_i-1}} \quad (3.12)$$

dans laquelle N_{it} représente la masse de bien de type i et $\sigma_i > 0$ est l'élasticité de substitution entre deux biens $\tilde{X}_{it}(j)$ et $\tilde{X}_{it}(j')$.

La demande de chaque bien $\tilde{X}_{it}(j)$, $i = 1, 2$, $j \in (0, N_{it})$ est obtenue en minimisant les coûts

$$\min_{\{\tilde{X}_{it}(j)\}_{j \in (0, N_{it})}} \int_0^{N_{it}} P_{it}(j) \tilde{X}_{it}(j) dj$$

sous la contrainte (3.12). Ainsi, la demande optimale de bien j ($j = 1, 2$) contingente au prix $P_{it}(j)$ est donnée par

$$\tilde{X}_{it}(j) = \left(\frac{P_{it}(j)}{P_{it}} \right)^{-\sigma_i} X_{it} \quad (3.13)$$

où P_{it} désigne le prix de l'agrégat X_{it} . Le prix de l'agrégat X_{it} est obtenu de la même façon que le prix P_{Yt} et est ainsi donné par

$$P_{it} = \left(\int_0^{N_{it}} P_{it}(j)^{1-\sigma_i} dj \right)^{\frac{1}{1-\sigma_i}} \quad (3.14)$$

Nous examinons maintenant le comportement des producteurs des biens intensifs en énergie ($\tilde{X}_{1t}(j)$, $j \in (0, N_{1t})$) et en travail ($\tilde{X}_{2t}(j)$, $j \in (0, N_{2t})$) composant les agrégats X_{1t} et X_{2t} .

Le secteur intensif en énergie

Chacune des entreprises $j \in (0, N_{1t})$ du secteur énergétique produit un bien différencié en quantité $\tilde{X}_{1t}(j)$ en utilisant de l'énergie, $E_t(j)$, payée au prix P_{Et} . La technologie de production est telle que la production d'une unité de bien $\tilde{X}_{1t}(j)$ nécessite la consommation d'une unité d'énergie. Ainsi la fonction de production de l'entreprise j peut être représentée par la fonction linéaire

$$\tilde{X}_{1t}(j) = E_t(j)$$

On suppose que l'entreprise j agit en situation de monopole sur son marché — mais demeure preneuse de prix sur le marché des facteurs — et maximise donc son profit

$$\max P_{1t}(j)\tilde{X}_{1t}(j) - P_{Et}E_t(j)$$

en tenant compte de la fonction de demande qui lui est adressée (demande optimale (3.13) avec $i = 1$). Il est alors optimal pour l'entreprise de fixer son prix en appliquant un taux de marge sur son coût marginal (P_{Et} le prix de l'énergie)

$$P_{1t}(j) = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1} P_{Et}$$

Il apparaît alors que toutes les entreprises du secteur fixent un prix identiques, ainsi à l'équilibre le prix du bien X_{1t} s'établit au niveau¹ Ainsi, à l'équilibre symétrique

$$P_{1t} = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1} P_{Et} N_{1t}^{\frac{1}{1-\sigma_1}} \quad (3.15)$$

¹Ce prix est obtenu en reportant le comportement optimal de fixation du prix dans la relation 3.14.

Le niveau produit par la firme j est alors donné par

$$\tilde{X}_{1t}(j) = N_{1t}^{\frac{\sigma_1}{1-\sigma_1}} X_{1t} \quad (3.16)$$

impliquant ainsi un profit de

$$\Pi_{1t}(j) = \frac{P_{1t} X_{1t}}{\sigma_1 N_{1t}} \quad (3.17)$$

Étant donné que chaque bien est produit selon une technologie linéaire, la consommation totale d'énergie dans l'économie est donnée par

$$E_t = \int_0^{N_{1t}} \tilde{X}_{1t}(j) dj \quad (3.18)$$

impliquant ainsi, d'après (3.18)

$$X_{1t} = N_{1t}^{\frac{1}{\sigma_1-1}} E_t \quad (3.19)$$

Le secteur intensif en travail

Le comportement des entreprises dans le secteur intensif en facteur travail est similaire à celui observé dans le secteur intensif en énergie. Ainsi, l'utilisation d'une unité de travail permet la production d'une unité de bien $\tilde{X}_{2t}(j)$, $j \in (0, N_{2t})$. La technologie est alors linéaire ($\tilde{X}_{2t}(j) = L_t(j)$). Comme les entreprises du secteur 1, les entreprises du secteur 2 maximisent leur profit

$$\max P_{2t}(j) \tilde{X}_{2t}(j) - W_t L_t(j)$$

où W_t représente le taux de salaire, en manipulant la demande (relation (3.13) pour $i = 2$). Elles fixent donc leur prix en appliquant un taux de marge constant au coût marginal

$$P_{2t}(j) = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 - 1} W_t$$

Là encore, toutes les entreprises du secteur adoptent un comportement de prix identique, ainsi

$$P_{2t} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 - 1} W_t N_{2t}^{\frac{1}{1-\sigma_2}} \quad (3.20)$$

impliquant un niveau de produit

$$\tilde{X}_{2t}(j) = N_{2t}^{\frac{-\sigma_2}{1-\sigma_2}} X_{2t} \quad (3.21)$$

et un profit individuel

$$\Pi_{2t}(j) = \frac{P_{2t}X_{2t}}{\sigma_2 N_{2t}} \quad (3.22)$$

La consommation totale de travail par le secteur étant donné par

$$L_t = \int_0^{N_{2t}} \tilde{X}_{2t}(j) dj \quad (3.23)$$

Ainsi, à l'équilibre

$$X_{2t} = N_{2t}^{\frac{1}{\sigma_2-1}} L_t \quad (3.24)$$

3.4 Le secteur de la recherche

Jusqu'ici la masse de biens intermédiaires de type i , $i = 1, 2$, était connue mais exogène. Cependant, nous supposons que le nombre de variétés de chaque type de bien s'accroît grâce à un processus de recherche et développement endogène : la découverte ou le développement d'un nouveau type de bien, intensif en énergie ou en travail, étend la variété des biens de type 1 et 2 respectivement. En d'autres termes, N_{1t} et N_{2t} sont déterminées de façon endogène dans le modèle. Nous supposons plus précisément qu'une fraction $\theta \in (0, 1)$ de la population N_t se consacre à la recherche et au développement de nouveaux biens. Les chercheurs peuvent consacrer leur temps à la création de nouveaux produits dans le secteur des biens intensifs en facteur énergétique (secteur 1 de la recherche) ou en facteur travail (secteur 2 de la recherche). Ce choix d'allocation est endogène et on a, en particulier, $h_{1t} = \theta N_t \mu_t$ et $h_{2t} = \theta N_t (1 - \mu_t)$, où μ_t représente la fraction des chercheurs se consacrant à la recherche dans le secteur énergétique.

La découverte d'un nouveau bien donne lieu à la création d'un brevet procurant à l'entreprise qui le produit un pouvoir de marché. On suppose que la production d'un nouveau brevet est une fonction du nombre de chercheurs. La technologie est à rendements décroissants de sorte que l'utilisation de h_{it} chercheurs dans le secteur i de la recherche ($i=1,2$) permet d'accroître le nombre de brevet de

$$\Delta_{it} = \frac{h_{it}^{\nu_i}}{c_i} N_{it}$$

avec $\nu_i \in (0, 1)$ et où la constante positive c_i peut s'interpréter comme un indicateur de productivité de la recherche. Ainsi, la loi d'évolution du nombre

de brevets est donnée par

$$N_{it+1} = N_{it} + \Delta_{it} \quad (3.25)$$

La durée de vie d'un brevet est supposée infinie. La valeur de ce brevet est alors déterminée par la somme actualisée des profits que son exploitation permettra de générer dans le futur

$$V_{it} = \sum_{s=0}^{\infty} \mathcal{R}_{t+s} \Pi_{it+s} \text{ pour } i = 1, 2 \text{ où } \mathcal{R}_{t+s} = \prod_{\tau=0}^s \frac{1}{1+r_{t+\tau}}$$

La valeur admet alors la représentation récursive

$$V_{it} = \Pi_{it} + \frac{V_{it+1}}{1+r_{t+1}} \text{ pour } i = 1, 2 \quad (3.26)$$

où r_t désigne le taux d'intérêt réel et Π_{it} est le profit attaché à l'exploitation de ce brevet.

Le profit d'une entreprise de recherche du secteur 1 (produisant des brevets pour la technologie intensive en énergie) est donné par

$$\Pi_{1t}^R = V_{1t} \frac{h_{1t}^{\nu_1}}{c_1} N_{1t} - (1 - \tau_t^R) W_t^R h_{1t} \quad (3.27)$$

où W_t^R désigne le salaire d'un chercheur. Nous supposons de plus que la puissance publique peut décider de subventionner la recherche afin d'encourager la recherche dans le secteur produisant des brevets intensif en énergie dans la mesure où ceci conduit à une diminution du contenu énergétique de chacun des bien de ce secteur. Une telle politique est capturée par τ_t^R qui représente le taux subvention à la recherche. Cette subvention est alors financée par un prélèvement forfaitaire sur les consommateurs (T_t). De façon similaire, le profit dans le secteur 2 (produisant des brevets pour la technologie intensive en travail) s'écrit

$$\Pi_{2t}^R = V_{2t} \frac{h_{2t}^{\nu_2}}{c_2} N_{2t} - W_t^R h_{2t} \quad (3.28)$$

La maximisation du profit dans chacun des secteur conduit à une allocation des chercheurs donnée par

$$\frac{\nu_1}{c_1} V_{1t} (\theta N_t \mu_t)^{\nu_1-1} N_{1t} = (1 - \tau_t^R) \frac{\nu_2}{c_2} V_{2t} (\theta N_t (1 - \mu_t))^{\nu_2-1} N_{2t} \quad (3.29)$$

3.5 Extraction

L'existence d'un bien intensif en énergie pose le problème de la provenance du facteur énergétique. Nous supposons dans cette économie que la ressource énergétique doit être extraite, et que l'activité d'extraction est coûteuse. Le coût d'extraction unitaire de l'énergie, exprimé en termes de produit, est supposé prendre la forme :

$$C_t^E = \Phi Z_t^\delta E_t^\beta \text{ avec } \beta, \delta > 0 \text{ et } \Phi > 0 \quad (3.30)$$

où Z_t représente le stock déjà extrait, dont la loi d'évolution est donnée par

$$Z_{t+1} = Z_t + E_t \quad (3.31)$$

L'entreprise d'extraction détermine son plan d'extraction en maximisant son profit, donné par

$$\Pi_t^E = \bar{P}_{Et} E_t - C_t^E E_t$$

\bar{P}_{Et} représente le prix de production de l'énergie.

Deux cas peuvent être envisagés, selon que l'entreprise internalise ou pas l'effet de leur activité sur les coûts supportés par les autres. Dans le cas où l'entreprise n'internalise pas cet effet, la condition d'optimalité portant sur l'extraction conduit à fixer un prix égal au coût unitaire d'extraction :

$$\bar{P}_{Et} = C_t^E \quad (3.32)$$

Lorsque l'entreprise internalise l'effet de congestion, prenant ainsi en compte l'impact de son choix en terme d'extraction (E_t) sur le coût unitaire, la condition d'optimalité devient

$$\bar{P}_{Et} = (1 + \beta) C_t^E \quad (3.33)$$

Ainsi, le coût unitaire d'extraction est égal à une fraction, $\kappa \leq 1$, du coût de l'énergie

$$\kappa \bar{P}_{Et} = \Phi Z_t^\delta E_t^\beta \quad (3.34)$$

si $\kappa = 1$, le modèle présente une pure externalité de congestion, lorsque $\kappa = 1/(1 + \beta)$ l'externalité est internalisée, et le coût marginal social est égal au coût de l'énergie.

Il importe finalement de noter ici que le prix de production du facteur énergétique s'écarte du prix à l'utilisation par l'application d'une taxe distortive τ_t^E de sorte que

$$P_{Et} = (1 + \tau_t^E) \bar{P}_{Et}$$

Cette taxe est entièrement redistribuée forfaitairement au consommateur (T_t).

3.6 L'équilibre de l'économie

Un équilibre de cette économie est une séquence de prix

$$\mathcal{P}_t = \{P_{Yt}, P_{Kt}, P_{1t}, P_{2t}, P_{Et}, \bar{P}_{Et}, W_t, W_t^R, r_t\}_{t=0}^{\infty}$$

et une séquence de quantité

$$\mathcal{Q}_t = \{Y_t, C_t, I_t, K_t, E_t, Z_t, L_t, N_{it}, h_{it}, X_{it}; i = 1, 2\}_{t=0}^{\infty}$$

telles que

1. Pour une séquence de prix \mathcal{P}_t et une séquence de taxe $\{\tau_t^C, \tau_t^E, \tau_t^R\}_{t=0}^{\infty}$, la séquence \mathcal{Q}_t maximise les profits de l'ensemble des entreprises et l'utilité du ménage représentatif;
2. Pour un séquence de quantité \mathcal{Q}_t et une séquence de taxe $\{\tau_t^C, \tau_t^E, \tau_t^R\}_{t=0}^{\infty}$, la séquence \mathcal{P}_t apure les marchés, et en particulier

$$F_t = C_t + I_t + \mathcal{C}_t^E E_t \quad (3.35)$$

$$L_t = (1 - \theta) N_t \quad (3.36)$$

La liste de l'ensemble des équations du modèle constituant l'équilibre de cette économie est dans la section suivante

3.7 Équations : Équilibre de l'économie

Les équations définissant l'équilibre sont données par le système suivant :

$$F_t = B Y_t^\zeta K_t^{1-\zeta} \quad (G.1)$$

$$P_{Yt} Y_t = \zeta F_t \quad (G.2)$$

$$P_{Kt}K_t = (1 - \zeta)F_t \quad (\text{G.3})$$

$$Y_t = (\omega^{1-\alpha}X_{1t}^\alpha + (1-\omega)^{1-\alpha}X_{2t}^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{G.4})$$

$$X_{1t} = \left(\frac{P_{1t}}{P_{Yt}}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \omega Y_t \quad (\text{G.5})$$

$$X_{2t} = \left(\frac{P_{2t}}{P_{Yt}}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} (1-\omega)Y_t \quad (\text{G.6})$$

$$P_{1t} = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1} P_{Et} N_{1t}^{\frac{1}{1-\sigma_1}} \quad (\text{G.7})$$

$$P_{2t} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 - 1} W_t N_{2t}^{\frac{1}{1-\sigma_2}} \quad (\text{G.8})$$

$$X_{1t} = N_{1t}^{\frac{1}{\sigma_1-1}} E_t \quad (\text{G.9})$$

$$X_{2t} = N_{2t}^{\frac{1}{\sigma_2-1}} L_t \quad (\text{G.10})$$

$$N_{1t+1} = N_{1t} + \frac{h_{1t}^{\nu_1}}{c_1} N_{1t} \quad (\text{G.11})$$

$$N_{2t+1} = N_{2t} + \frac{h_{2t}^{\nu_2}}{c_2} N_{2t} \quad (\text{G.12})$$

$$V_{1t} = \frac{P_{1t}X_{1t}}{\sigma_1 N_{1t}} + \frac{V_{1t+1}}{1+r_{t+1}} \quad (\text{G.13})$$

$$V_{2t} = \frac{P_{2t}X_{2t}}{\sigma_2 N_{2t}} + \frac{V_{2t+1}}{1+r_{t+1}} \quad (\text{G.14})$$

$$\frac{\nu_1}{c_1} V_{1t} (\theta N_t \mu_t)^{\nu_1-1} N_{1t} = (1 - \tau^R) \frac{\nu_2}{c_2} V_{2t} (\theta N_t (1 - \mu_t))^{\nu_2-1} N_{2t} \quad (\text{G.15})$$

$$W_t^R = \frac{\nu_1}{c_1} V_{1t} (\theta N_t \mu_t)^{\nu_1-1} N_{1t} \quad (\text{G.16})$$

$$(1 + \tau_t^C) C_t^{-\sigma} = \frac{1 + r_{t+1}}{1 + \rho} (1 + \tau_{t+1}^C) C_{t+1}^{-\sigma} \quad (\text{G.17})$$

$$P_{Kt} = r_t + \delta_k \quad (\text{G.18})$$

$$\kappa \bar{Q}_t = \Phi Z_t^\delta E_t^\beta \quad (\text{G.19})$$

$$Z_{t+1} = Z_t + E_t \quad (\text{G.20})$$

$$K_{t+1} = I_t + (1 - \delta_k)K_t \quad (\text{G.21})$$

$$F_t = C_t + I_t + k \bar{P}_{Et} E_t \quad (\text{G.22})$$

$$P_{Et} = (1 + \tau^E) \bar{P}_{Et} \quad (\text{G.23})$$

$$L_t = (1 - \theta)N_t \quad (\text{G.24})$$

3.8 Équations : L'économie stationnarisée

Pour simplifier les notations, nous effectuons un changement de variable dans les variables d'état et définissons

$$A_{it} = N_{it}^{\frac{1}{\sigma_i - 1}}, \quad i = 1, 2$$

Si le système dynamique précédent admet un sentier de croissance équilibré, il n'admet pas d'état stationnaire dans la mesure où l'activité de R&D, en développant de nouveaux produits, permet de maintenir une croissance soutenue. Il convient donc de redéfinir le système en termes de variables intensives. On définit ainsi

$$\begin{aligned} \gamma_t &= A_{1t+1}/A_{1t} & x_t &= A_{2t}/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ v_{1t} &= V_{1t}/A_{1t}^{2-\sigma_1+\frac{1}{\beta+\delta}} & v_{2t} &= V_{2t}/A_{1t}^{(2-\sigma_2)(1+\frac{1}{\beta+\delta})} \\ \pi_{1t} &= \Pi_{1t}/A_{1t}^{2-\sigma_1+\frac{1}{\beta+\delta}} & \pi_{2t} &= \Pi_{2t}/A_{1t}^{(2-\sigma_2)(1+\frac{1}{\beta+\delta})} \\ \pi_{1t}^R &= \Pi_{1t}^R/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & \pi_{2t}^R &= \Pi_{2t}^R/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ x_{1t} &= X_{1t}/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & x_{2t} &= X_{2t}/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ y_t &= Y_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & F_t &= F_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ c_t &= C_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & i_t &= I_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ w_t &= W_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & w_t^R &= W_t^R/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} \\ e_t &= E_t/A_{1t}^{\frac{1}{\beta+\delta}} & z_t &= Z_t/A_{1t}^{\frac{1}{\beta+\delta}} \\ q_t &= Q_t/A_{1t} & \bar{q}_t &= \bar{Q}_t/A_{1t} \\ p_{1t} &= P_{1t} & p_{2t} &= P_{2t} \\ k_t &= K_t/A_{1t}^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} & & \end{aligned}$$

Dans cet espace, le système définissant l'équilibre stationnarisé de l'économie s'écrit

$$F_t = B y_t^\zeta k_t^{1-\zeta} \quad (\text{H.1})$$

$$p_{yt} y_t = \zeta f_t \quad (\text{H.2})$$

$$p_{kt} k_t = (1 - \zeta) f_t \quad (\text{H.3})$$

$$y_t = (\omega^{1-\alpha} x_{1t}^\alpha + (1 - \omega)^{1-\alpha} x_{2t}^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{H.4})$$

$$x_{1t} = \left(\frac{p_{1t}}{p_{yt}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \omega y_t \quad (\text{H.5})$$

$$x_{2t} = \left(\frac{p_{2t}}{p_{yt}} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} (1 - \omega)y_t \quad (\text{H.6})$$

$$p_{1t} = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1} p_{Et} \quad (\text{H.7})$$

$$p_{2t} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 - 1} w_t / x_t \quad (\text{H.8})$$

$$x_{1t} = e_t \quad (\text{H.9})$$

$$x_{2t} = x_t L_t \quad (\text{H.10})$$

$$\gamma_t = \left(1 + \frac{h_{1t}^{\nu_1}}{c_1} \right)^{\frac{1}{\sigma_1-1}} \quad (\text{H.11})$$

$$\gamma_t^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} x_{t+1} = \left(1 + \frac{h_{2t}^{\nu_2}}{c_2} \right)^{\frac{1}{\sigma_2-1}} x_t \quad (\text{H.12})$$

$$v_{1t} = \frac{p_{1t} x_{1t}}{\sigma_1} + \gamma_t^{2-\sigma_1+\frac{1}{\beta+\delta}} \frac{v_{1t+1}}{1+r_{t+1}} \quad (\text{H.13})$$

$$v_{2t} = \frac{p_{2t} x_{2t} x_t^{\sigma_2-1}}{\sigma_2} + \gamma_t^{(2-\sigma_2)(1+\frac{1}{\beta+\delta})} \frac{v_{2t+1}}{1+r_{t+1}} \quad (\text{H.14})$$

$$\frac{\nu_1}{c_1} v_{1t} (\theta N_t \mu_t)^{\nu_1-1} = (1 - \tau_t^R) \frac{\nu_2}{c_2} v_{2t} (\theta N_t (1 - \mu_t))^{\nu_2-1} x_t^{\sigma_2-1} \quad (\text{H.15})$$

$$w_t^r = \frac{\nu_1}{c_1} v_{1t} (\theta N_t \mu_t)^{\nu_1-1} \quad (\text{H.16})$$

$$(1 + \tau_t^c) c_t^{-\sigma} = \frac{1+r_{t+1}}{1+\rho} (1 + \tau_{t+1}^c) c_{t+1}^{-\sigma} \gamma_t^{-\sigma(1+\frac{1}{\beta+\delta})} \quad (\text{H.17})$$

$$p_{kt} = r_t + \delta_k \quad (\text{H.18})$$

$$\kappa \bar{p}_{Et} = \phi z_t^\delta e_t^\beta \quad (\text{H.19})$$

$$\gamma_t^{\frac{1}{\beta+\delta}} z_{t+1} = z_t + e_t \quad (\text{H.20})$$

$$\gamma_t^{1+\frac{1}{\beta+\delta}} k_{t+1} = i_t + (1 - \delta_k) k_t \quad (\text{H.21})$$

$$F_t = c_t + i_t + \kappa \bar{p}_{Et} e_t \quad (\text{H.22})$$

$$p_{Et} = (1 + \tau_t) \bar{p}_{Et} \quad (\text{H.23})$$

$$L_t = (1 - \theta) N_t \quad (\text{H.24})$$

Chapitre 4

Résolution numérique du modèle

Étant données les non-linéarités introduites par la modélisation du comportement des agents, les trajectoires d'équilibre de ce modèle ne peuvent pas être obtenues analytiquement. La détermination des trajectoires d'équilibre de l'économie ne peut donc être obtenue que par le recours à des méthodes numériques de résolution approchée. Il existe de multiples méthodes de résolution approchée des modèles dynamiques à anticipations rationnelles (voir Judd (1998)). La méthode la plus communément utilisée consiste à linéariser le système d'équations aux différences finies définissant l'équilibre autour de l'équilibre stationnaire du modèle. On obtient alors un système dynamique linéaire d'équations aux différences finies pour lequel il est facile d'obtenir la solution par une méthode de type Blanchard et Kahn (1980). Toutefois, si cette approche présente un avantage certain en terme de simplicité, son usage peut être limité de part son caractère local. En effet, parce qu'elle repose sur une approximation de Taylor, cette technique requiert la différentiabilité des fonctions de comportement. Étant donné que certaines expériences que nous voulons mener — par exemple, l'analyse du traité de Kyoto — conduisent à l'introduction d'une contrainte quantitative sur l'utilisation des biens intensifs en énergie, la différentiabilité du système n'est pas toujours assurée. De plus, le caractère local de l'approximation linéaire réduit le champs des expériences à des chocs suffisamment petits pour ne pas remettre en cause la qualité de l'approximation. Ceci interdit dès lors l'analyse de changements importants de politique économique. Il est donc nécessaire d'avoir recourt à

des méthodes ne se limitant pas à l’approximation autour de l’état stationnaire lors de la détermination des trajectoires d’équilibre du modèle. Aussi, nous retiendrons une méthode proposée par Laffargue (1990) et Boucekkine (1995), reposant sur une algorithmes de relaxation, et programmé par Juillard (1996) dans le module DYNARE. Ce chapitre décrit cette approche.

Cette partie reprend les travaux de Juillard (1996), qui précise comment cette méthode a été implémentée dans le module DYNARE¹.

L’algorithme de relaxation propose de résoudre la dynamique d’un modèle à anticipations rationnelles en reconsidérant le problème non pas comme un système dynamique mais comme une fonction non-linéaire dont il s’agit de déterminer la solution. Le principe est alors le suivant. L’ensemble des conditions d’équilibre est évalué à chaque date, imposant ainsi dans un modèle à horizon de vie des agents infini à tronquer le temps. On obtient alors un système non-linéaire, dont le nombre d’équations est fourni par le produit du nombre de périodes considéré par le nombre d’équations définissant l’équilibre à chaque date. Ce système non-linéaire est alors résolu par une méthode de Newton-Raphson, et les trajectoires d’équilibre de chacune des variables du modèle sont obtenues. Étant donné ce principe de résolution, il est clair que cette méthode peut devenir lourde à mettre en œuvre pour de “grands” modèles et pour des horizons de simulation longs. Toutefois, Laffargue (1990) a montré que le Jacobien associé aux problèmes dynamiques dans lesquelles les variables retardées ne le sont que d’une période et où les anticipations ne fond intervenir que des variables avancées d’une période présente une bloc-diagonale, permettant alors l’utilisation de techniques numériques spécifiques aux matrices creuses permettant un gain en espace mémoire d’une part et un gain très important en temps de calcul d’autre part. Ainsi, la méthode demeure applicable dans le cas de gros systèmes.

Nous présentons maintenant la méthode en détails, en insistant tout d’abord sur l’écriture du système avant de présenter la méthode de résolution proprement dite. Nous en proposons alors une illustration dans un cas simple et montrons comment l’algorithme peut être utilisé. Dans une dernière section, nous discutons de l’utilisation de l’algorithme de résolution et de sa

¹Ce module, utilisable sous GAUSS ou MATLAB, est disponible gratuitement sur le site du Cepremap (<http://www.ceprenap.cnrs.fr/~michel/dynare/>). L’objet de ce module est d’agir comme un *parser* transformant une écriture économique du système d’équilibre en un système reconnu par ces deux logiciels.

mise en oeuvre.

4.1 La ré-écriture du système

Cette section propose une caractérisation du système d'équation permettant de résoudre la trajectoire dynamique d'un modèle intégrant des variables endogènes avancées et retardées.

On considère un modèle dynamique non-linéaire à n variables endogènes, $\{y_{i,t}\}_{t=0}^T$, $i = 1, \dots, n$, et m variables exogènes, $\{x_{j,t}\}_{t=0}^T$, $j = 1, \dots, m$, et à p paramètres, $\Theta = \{\theta_k; k = 1, \dots, p\}$. On note y_t le vecteur des variables endogènes à la date t , x_t , le vecteur des variables exogènes.

Le modèle est spécifié de telle sorte que les n valeurs courantes de y_t dépendent de valeurs passées et futures des variables endogènes, des variables exogènes et des paramètres. Les variables exogènes peuvent être avancées, contemporaines ou retardées, ceci ne changeant pas la nature du problème à résoudre. Pour simplifier l'exposé, il est supposé que seules les réalisations contemporaines des variables exogènes sont présentes.

Les trajectoires des variables endogènes satisfont alors le système dynamique à n équations aux différences finies suivant :

$$\begin{aligned} g_1(y_{t-r}, \dots, y_t, \dots, y_{t+s}, x_t, \Theta) &= 0 \\ &\vdots \\ g_n(y_{t-r}, \dots, y_t, \dots, y_{t+s}, x_t, \Theta) &= 0 \end{aligned}$$

Le système précédent admet ainsi au maximum r retards et s avances. Dans la plupart des problèmes, les n variables endogènes n'apparaissent pas à toutes les $s + r + 1$ périodes passées et avancées. Une condition d'identification est que toutes les variables endogènes doivent apparaître à la date courante².

Pour une séquence donnée des variables exogènes, x_t , $t = 1, \dots, T$, et un vecteur de paramètre Θ , il est possible de déterminer des trajectoires des variables endogènes pour les périodes allant de 1 à T . Une trajectoire particulière correspond à un vecteur de conditions initiales particulières y_{1-r}^*, \dots, y_0^* et un vecteur de conditions terminales particulières $y_{T+1}^*, \dots, y_{T+s}^*$. Les condi-

²L'absence de variables à des périodes passées ou avancées constitue une information qui peut être exploitée par l'algorithme (voir Juillard (1996)).

tions assurant l'existence d'une trajectoire unique sont discutées dans Boucekine (1995).

Pour chaque période $t = 1, \dots, T$, une trajectoire à anticipations rationnelles soit satisfaire simultanément les n équations caractérisant l'équilibre. C'est précisément cette restriction qu'exploite l'algorithme. Le système a résoudre s'écrit alors :

$$\begin{aligned}
 y_{1-r} &= y_{1-r}^* \\
 &\vdots \\
 y_0 &= y_0^* \\
 g_1(y_{1-r}, \dots, y_1, \dots, y_{1+s}, x_1, \Theta) &= 0 \\
 &\vdots \\
 g_n(y_{1-r}, \dots, y_1, \dots, y_{1+s}, x_1, \Theta) &= 0 \\
 &\vdots \\
 g_1(y_{T-r}, \dots, y_T, \dots, y_{T+s}, x_T, \Theta) &= 0 \\
 &\vdots \\
 g_n(y_{T-r}, \dots, y_T, \dots, y_{T+s}, x_T, \Theta) &= 0 \\
 y_{T+1} &= y_{T+1}^* \\
 &\vdots \\
 y_{T+s} &= y_{T+s}^*
 \end{aligned}$$

Pour une simulation particulière, la séquence des variables exogènes $\{x_t\}_{t=1}^T$, et le vecteur des paramètres Θ sont donnés. Il est alors possible de réécrire les équations du modèle en ne faisant plus intervenir que la variable endogène à chaque date. Cette écriture plus compacte est obtenue en notant :

$$f_t(z_t) = \begin{bmatrix} g_1(y_{t-r}, \dots, y_t, \dots, y_{t+s}, x_t, \Theta) \\ \vdots \\ g_n(y_{t-r}, \dots, y_t, \dots, y_{t+s}, x_t, \Theta) \end{bmatrix} \quad t = 1, \dots, T$$

où $z_t = [y'_{t-r} \dots y'_t \dots y'_{t+s}]'$. Dans le cas des vecteurs de conditions initiales et terminales donné, la notation correspondante est donnée par :

$$f_{1-r}(y_{1-r}) = y_{1-r} - y_{1-r}^* = 0$$

$$\begin{aligned}
& \vdots \\
f_0(y_0) &= y_0 - y_0^* = 0 \\
& \\
f_{T+1}(y_{T+1}) &= y_{T+1} - y_{T+1}^* = 0 \\
& \vdots \\
f_{T+s}(y_{T+s}) &= y_{T+s} - y_{T+s}^* = 0
\end{aligned}$$

Enfin, on notera Y le vecteur regroupant l'ensemble des variable endogènes empilées sur toutes les périodes :

$$Y = \begin{bmatrix} y_{1-r} \\ \vdots \\ y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_T \\ y_{T+1} \\ \vdots \\ y_{T+s} \end{bmatrix}$$

Dès lors, le problème revient à résoudre le système à $(T + r + s) \times n$ équations suivant :

$$F(Y) = \begin{bmatrix} f_{1-r}(y_{1-r}) \\ \vdots \\ f_0(y_0) \\ f_1(z_1) \\ \vdots \\ f_T(z_T) \\ f_{T+1}(y_{T+1}) \\ \vdots \\ f_{T+s}(y_{T+s}) \end{bmatrix} = 0$$

4.2 Résolution du système

L'ensemble des trajectoires d'équilibre est obtenu en résolvant le système d'équation non-linéaires précédent par une méthode de Newton-Raphson.

Cet algorithme revient à déterminer Y vérifiant $F(Y) = 0$ par une succession d'itérations. Intuitivement, cet algorithme remplace la fonction F par une approximation linéaire autour d'une condition initiale Y^0 , et résout le système linéaire obtenu pour engendrer une nouvelle valeur de Y , le processus est alors répété jusqu'à ce que la valeur de Y atteigne un point fixe. D'un point de vue plus formel, F est approché par son développement de Taylor au premier ordre autour de Y^0 :

$$F(Y) \simeq F(Y^0) + J(Y^0)(Y - Y^0)$$

où $J(Y^0) = \partial F(Y^0)/\partial Y^0$. En prenant cette approximation pour vraie, on peut alors résoudre $F(Y) = 0$ et obtenir

$$Y = Y^0 - J(Y^0)^{-1}F(Y^0)$$

Ce qui suggère alors le schéma d'itération suivant

$$Y^{k+1} = Y^k - J(Y^k)^{-1}F(Y^k)$$

ou

$$Y^{k+1} = Y^k + \Delta Y^{k+1} \text{ avec } \Delta Y^{k+1} \equiv -J(Y^k)^{-1}F(Y^k)$$

L'algorithme est alors le suivant

1. Pour une valeur de Y égale à Y^k , on calcule $F(Y^k)$ et $J(Y^k)$.
2. On obtient une nouvelle valeur de Y par le schéma itératif

$$Y^{k+1} = Y^k + \Delta Y^{k+1} \text{ avec } \Delta Y^{k+1} \equiv -J(Y^k)^{-1}F(Y^k)$$

3. Si $\|Y^{k+1} - Y^k\| < \varepsilon$, où $\varepsilon > 0$ est un critère d'arrêt, alors la solution est donnée par $Y^* = Y^{k+1}$, sinon l'algorithme retourne à l'étape 1 en utilisant la nouvelle valeur de Y .

une limite de cette approche est qu'elle nécessite l'inversion du jacobien $J(Y^k)$, qui dans ce cas est une matrice $[n \times (T+r+s)] \times [n \times (T+r+s)]$. Ainsi pour des modèles de grande taille (b grand) ou des horizons de simulation, T , important, la taille du jacobien explose quadratiquement. Cependant, comme le montre Laffargue (1990), il est possible d'exploiter la structure particulière du problème et d'utiliser le caractère creux du jacobien lors de son inversion par une technique de triangularisation. C'est ce que nous illustrons dans le paragraphe suivant.

Après cette triangularisation, le système est de la forme :

$$\begin{bmatrix} I & & & & \\ & I & C_1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & I & C_T \\ & & & & I \end{bmatrix} \Delta Y = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_T \\ 0 \end{bmatrix}$$

où $C_t = (S_{t,0} - S_{t,-1}C_{t-1})^{-1}S_{t,1}$ et $d_t = -(S_{t,0} - S_{t,-1}C_{t-1})^{-1}(f_t(z_t) + S_{t,-1}d_{t-1})$.

Les valeurs des éléments de ΔY sont alors obtenues par substitution successive du futur vers le présent :

$$\Delta y_t = d_t - C_t \Delta y_{t+1}$$

Ainsi, cette approche ne nécessite, lors de la résolution numérique, que le stockage de C_t et d_t , pour $t = 1, \dots, T$ simplifiant ainsi la résolution et permettant le traitement de systèmes de grande taille sur des horizons longs.³

4.4 Utilisation en simulation de l'algorithme

Afin d'illustrer comment cet algorithme détermine les trajectoires du modèle, il peut être utile de décrire comment s'effectue une simulation. Pour un compte central de référence, il est possible de calculer la trajectoire de croissance déterministe de l'ensemble des variables économiques. Cet état stationnaire en variables stationnaires détermine les conditions initiales pour les variables endogènes retardées (les variables pré-déterminées ou variables d'état).

Il est également nécessaire de déterminer les conditions terminales : celles-ci doivent correspondre à l'état stationnaire de l'économie étant donnée la nouvelle séquence des variables exogènes. En effet, comme dans la plupart des modèles faisant apparaître des anticipations, notre modèle admet comme solution une trajectoire selle : la convergence vers l'état stationnaire des trajectoires est conditionnée par la nouvelle séquence des exogènes nous assure donc le respect des conditions de transversalité.

Deux cas peuvent alors se présenter. Le premier est celui où la séquence des exogènes perturbe l'état stationnaire initial mais ne l'affecte pas à long

³Cette technique a été utilisée avec succès sur le modèle MULTIMOD développé par le fond monétaire international.

terme : ceci caractérise un choc transitoire. Dans ce cas, la condition terminale est identique à la condition initiale. Dans le second cas, la valeur des exogènes change de façon permanente. L'état stationnaire vers lequel converge l'économie est alors différent de l'état stationnaire initial : il dépend du nouveau niveau des exogènes.

Ainsi, une simulation consiste alors à déterminer l'unique trajectoire vérifiant les conditions terminales, étant données les conditions initiales sur les endogènes retardées (les variables pré-déterminées).

Chapitre 5

Calibration du modèle

Ce chapitre décrit la procédure de calibration du modèle. Après avoir rappelé les principes de base guidant cet exercice, nous en présentons les détails. Le tableau 5.10 synthétise les différents résultats liés à l'exercice de calibration.

5.1 La méthode de calibration

La calibration du modèle consiste en trois principales étapes :

1. La spécification des comportements des agents (ménages, entreprises) à l'aide de formes fonctionnelles.
2. La définition de la mesure, c'est à dire la construction d'une base de données cohérente avec le cadre théorique et comptable du modèle
3. La détermination de valeurs numériques des paramètres structurels du modèle.

La première phase a déjà été réalisée dans le chapitre 3, dans la mesure où pour chaque agent et chaque comportement, nous avons spécifié explicitement les formes fonctionnelles utilisées, à la fois pour les objectifs (utilité, technologie...) et les contraintes.

La seconde phase, présentée dans la section 5.2, consiste à construire un ensemble de données cohérentes avec le modèle étudié. Le cadre comptable du modèle impose la redéfinition et la reconstruction des agrégats ma-

croéconomiques. Par exemple, le produit intérieur brut correspond dans le modèle à la somme de la consommation finale (privée et publique) et de l'investissement privé. Ainsi, les exportations, importations et les variations de stocks sont absentes de la comptabilité du modèle.

La troisième et dernière étape consiste à fixer des valeurs pour les paramètres structurels — c'est-à-dire ceux définissant la classe paramétrique de fonctions imposée lors de la première étape — de telle sorte que le modèle reproduise un ensemble de faits mesurés à l'étape précédente.

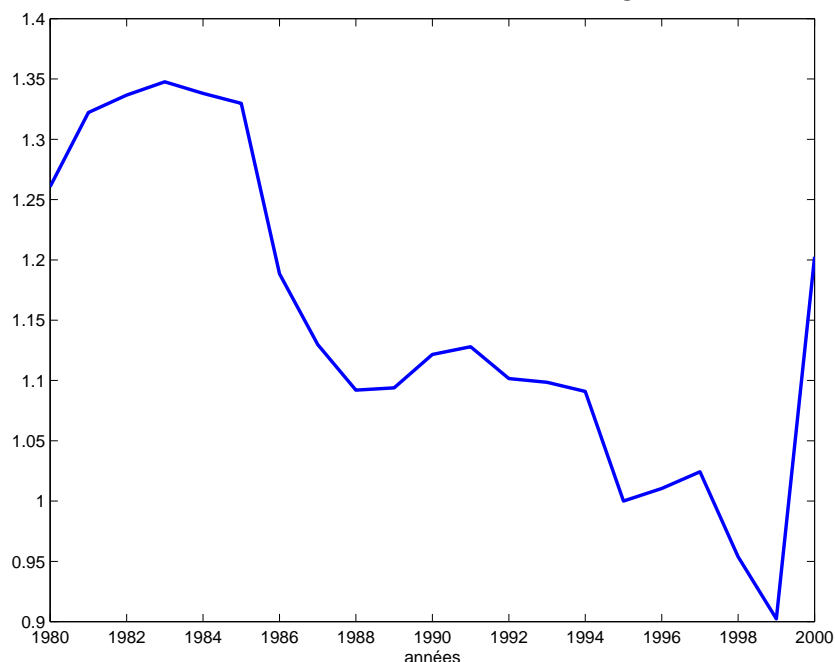
5.2 Constitution de la base de données

Le modèle est étalonné sur l'ensemble de la zone OCDE avec des données annuelles pour la période 1980–2000. Ce choix est en partie dicté par un problème de disponibilité statistique pour les pays non OCDE. Il est en partie justifiable dans la mesure où en 1995 45% des émissions polluantes étaient réalisées par cette zone seule. Dans l'avenir, nous souhaitons étendre le modèle à la zone non-OCDE.

Les données sont extraites, sauf indication contraire, des bases des *principaux indicateurs économiques* et *perspectives économiques de l'OCDE*. Les différentes séries macroéconomiques sont reconstruites de façon à respecter la comptabilité interne du modèle. Ainsi, la valeur ajoutée est définie comme la somme de la consommation finale, mesurée par la consommation privée et publique en biens finals en dollars 1995 (code 001023HSA), et de l'investissement, mesuré par la formation brute de capital fixe en dollars 1995 (code 001035HSA). Ces variables sont divisées par la population totale de la zone OCDE (code 001). L'indice de prix de la valeur ajoutée, noté P_t , est mesuré par le déflateur du PIB (code 00PDGDP).

La série initiale de prix de l'énergie, notée $P_{E,t}^o$, correspond à l'indice de prix à la consommation de l'énergie (code 005251K). Le prix relatif de l'énergie, $P_{E,t} = P_{E,t}^o / P_t$, est alors obtenu en divisant ce prix par le déflateur du PIB, et est reporté dans le graphique 5.1. Cet indice croît fortement au début des années quatre-vingt, puis baisse significativement et continûment

FIG. 5.1 – Prix relatif de l'énergie



jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix. Notons cependant la brusque hausse du prix en 2000. La construction d'une série de consommation d'énergie nécessite un certain nombre d'ajustements, afin de la rendre compatible avec la mesure de la consommation et de l'investissement. En effet, les données de l'OCDE concernant l'énergie sont exprimées en quantités physiques — en Kilo Tonnes équivalent Pétrole (KTEP). Les données disponibles pour la zone OCDE sont la production (code 000581004), l'importation (code 000581003) et les exportations (code 000581004), toutes énergies confondues.¹ La consommation d'énergie en KTEP à une période t quelconque, notée $E_{KTEP,t}$, est alors définie comme la somme de la production et des importations à laquelle on retranche les exportations.² On cherche alors à exprimer les KTEP en prix de l'année de base. En 1995, le prix du baril de pétrole était de 16.5 \$ en moyenne³. En faisant l'hypothèse que le prix d'une

¹Cette variable est déflatée par la population totale, si bien que la variable considérée définit la consommation d'énergie en KTEP par tête.

²Ces données n'étant disponible que sur la période 1980–1997, nous avons dû la compléter en utilisant les publications statistiques fournies par l'*Energy Information Administration* (<http://eia.doe.gov/>).

³On peut se reporter à <http://www.eia.doe.gov/emeu/mer/prices.html> pour les

énergie ne dépend que de son pouvoir calorifique et sachant qu'une TEP se réfère effectivement à une tonne de brut⁴, le prix d'une KTEP en 1995 vaut alors

$$P_{E,1995} = 1000 \times 7.33 \times 16.5\$ = 120945\$$$

A partir de cette valeur de référence, le prix en dollars d'une KTEP à n'importe quelle date peut être obtenu en multipliant le prix à la consommation de l'énergie par ce chiffre :

$$P_{EKTEP,t} = P_{E,1995} \times P_{EC,t}$$

Les dépenses totales d'énergie de la zone OCDE sont ainsi déterminées par la multiplication du prix de la KTEP à toutes les périodes par la consommation d'énergie exprimée en KTEP :

$$P_{EKTEP,t} \times E_{KTEP,t}$$

La production en valeur est alors définie comme la somme du PIB en valeur et de la dépense d'énergie :

$$P_t \times (C_t + I_t) + P_{EKTEP,t} \times E_{KTEP,t}$$

La part de l'énergie dans la production, notée $s_{e,t}^y$, est alors obtenue en divisant la consommation d'énergie en valeur par la production en valeur. La consommation d'énergie en base 95 s'en déduit par

$$E_t = s_{e,t}^y Y_t \frac{P_t}{P_{E,1995}}$$

où Y_t représente la production en volume base 95. Cette production est obtenue en divisant la production en valeur par le déflateur du PIB. Le graphique 5.2 reporte la production, la consommation, l'investissement et l'énergie par tête sur la période 1980–2001. Les trois premières variables présentent un profil tendanciel similaire. Sur cette période, le taux de croissance annuel moyen est respectivement de 2.02%, 1.91 % et 2.72% pour la production, la consommation et l'investissement par tête. En revanche, l'énergie par tête présente un profil tendanciel moins marqué dans la mesure où son taux de croissance annuel moyen s'établit à 1.02%. Le graphique 5.3 reporte l'évolution de la part de ces différentes composantes sur la période 1977–1997. Différentes statistiques descriptives sur ces parts sont reportées dans le tableau 5.1. Les

FIG. 5.2 – Variables macroéconomiques (exprimées par tête)

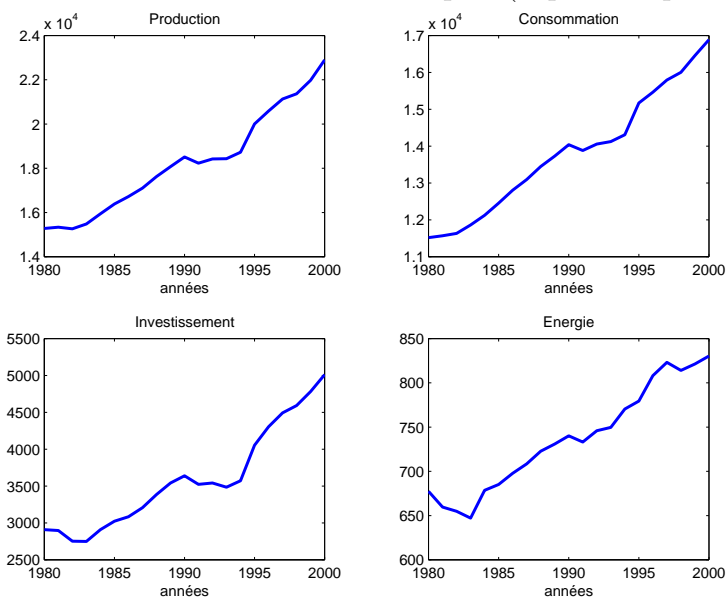
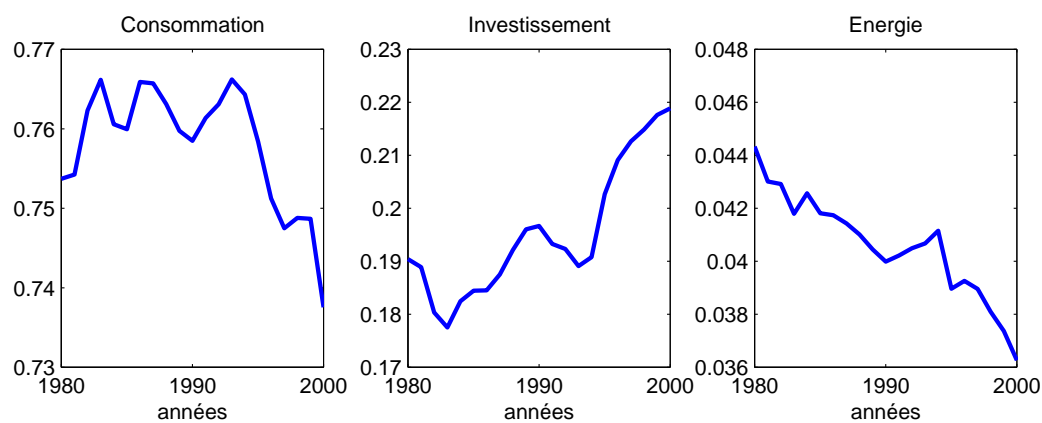


FIG. 5.3 – Parts dans la production



TAB. 5.1 – Statistiques descriptives sur les parts

	Consommation (C/Y)	Investissement (I/Y)	Energie (qE/Y)
Moyenne	75.8	19.5	4.7
Ecart-type	0.7	1.3	0.7
Minimum	73.8	17.8	3.37
Maximum	76.6	21.9	5.74

Note : toutes les statistiques sont exprimées en pourcentage.

parts de la consommation et de l'investissement dans le produit sont respectivement de 76% et 19% en moyenne. En revanche, la part de l'énergie demeure relativement faible, s'établissant entre 3% et 6% au cours de la période considérée. Elle présente une tendance marquée à la baisse depuis le début des années quatre-vingt, ce qui nous conduira par la suite à retenir les années quatre-vingt-dix comme base de calibration.

A partir de ce cadre comptable, nous pouvons maintenant détailler la calibration des paramètres structurels du modèle. Le tableau 5.2 présente les différents paramètres structurels du modèle et l'agent ou le secteur auquel il se rattache. Il est important de noter que le modèle donne un ensemble de prédictions tous les dix ans. Les paramètres structurels décrivant les lois d'évolution et les relations entre les variables de stocks et de flux sont donc ajustés afin de tenir compte de la fréquence décennale du modèle.

5.3 Le consommateur

On regroupe ici trois paramètres décrivant les décisions intertemporelles des consommateurs.

σ et ρ : Le problème du consommateur impose l'étalonnage de deux paramètres : le taux de préférence pour le présent, ρ , d'une part et le paramètre déterminant l'élasticité de substitution intertemporelle, σ , d'autre part.

différentes séries de prix du pétrole selon le type ou encore le pays d'origine.

⁴Une tonne représente 7.33 barils.

TAB. 5.2 – Les paramètres calibrés du modèle

Paramètre	Lien
Consommateur	
δ_k	Taux de dépréciation du capital
σ	Inverse de l'élasticité de substitution intertemporelle
ρ	taux de préférence pour le présent
N	Taille de la population
Secteur des biens finals	
B	Constante d'échelle
ζ	Elasticité du produit au bien intermédiaire
Secteurs des biens intermédiaires	
α	Elasticité prix
ω	Part de l'énergie
σ_1	Elasticité prix du bien 1
σ_2	Elasticité prix du bien 2
Secteur de la recherche	
θ	Part des chercheurs dans la population
ν_1	Elasticité de la production de brevet à l'effort (S1)
ν_2	Elasticité de la production de brevet à l'effort (S2)
c_1	Facteur d'échelle (S1)
c_2	Facteur d'échelle (S2)
La technologie d'extraction	
β	Elasticité de l'extraction à l'énergie
δ	Elasticité de l'extraction au stock
Φ	Facteur d'échelle
Taxation	
τ	Taxation de l'énergie
τ^C	Taxe à la valeur ajoutée
τ^R	Subvention à la R&D

Le paramètre ρ est fixé à 0.219, impliquant un taux annuel de préférence pour le présent de 2%.

Le paramètre σ est fixé à l'unité. Ce choix peut se justifier de deux façons. En premier lieu, la faible précision des estimations de ce paramètre laisse apparaître un important intervalle de confiance. Cependant, la valeur $\sigma = 1$ (utilité logarithmique) apparaît comme un choix médian raisonnable. En deuxième lieu, cette valeur est choisie à des fins de comparabilité avec le modèle de Nordhaus, puisque celui-ci retient une fonction d'utilité logarithmique.

δ_k : L'arbitrage consommation/épargne réalisé par le consommateur le conduit à formuler des choix en termes d'accumulation du capital physique. Cette accumulation dépend de l'étalonnage de δ_k , le taux de dépréciation du capital physique. Le paramètre δ_k est choisi de sorte que le coefficient de capital à l'état stationnaire du modèle soit égal à 0.3 par décennies, c'est à dire $\delta_k = 0.705$.

5.4 La production

Nous présentons la calibration des paramètres liés à la production en distinguant ceux liés au secteur des biens finals de ceux liés au secteur des biens intermédiaires.

Le secteur des biens finals

L'étalonnage du secteur des biens finals conduit à la détermination des paramètres B – la constante d'échelle dans la fonction de production – et ζ – le coefficient de la fonction de production Cobb-Douglas de biens finals–.

B : Le paramètre B représente la constante d'échelle dans la fonction de production des biens finals. Ce paramètre est fixé de sorte que le modèle reproduise le niveau du produit intérieur brut moyen par tête en 1995 pour les zones US, EU et OHI de Boyer et Nordhaus (2000), soit 210 136 milliers de \$ par habitant. LA valeur B correspondante est égale à 14.8125.

ζ : Le paramètre ζ est fixé en utilisant la demande en biens intermédiaires

$$\zeta = \frac{py}{f} = \frac{s_y}{s_f}$$

où s_f représente la part de la production dans la valeur ajoutée (supérieure à l'unité) et s_y la part de Y dans la valeur ajoutée. Afin d'identifier ζ , il faut connaître à la fois s_y et s_f . D'après l'équation emplois-ressources sur le marché des biens, nous avons immédiatement que $f = pib + c^E e$, c'est à dire que la production est égale au PIB augmenté du coût de l'extraction énergétique. Ainsi, on en déduit que la part de la production dans la valeur ajoutée, s_f , est donnée par $s_f = 1 + s_e$, où s_e est la part de l'énergie dans la valeur ajoutée calculée précédemment. De plus, la condition de libre-entrée sur le marché des biens intermédiaires conduit à $py = qe + wL$, impliquant ainsi que la part des biens intermédiaires dans la valeur ajoutée, s_y , est donnée par la somme de la part de l'énergie, s_e , et du travail, s_L

$$s_y = s_e + s_L$$

La connaissance de la part de la rémunération du travail dans la valeur ajoutée nous permet ainsi de calculer s_y . Le tableau (5.3) présente la part du travail dans 14 pays de l'OCDE et sur 1970-1990. On constate que cette variable est relativement stable dans le temps et entre pays. Dans le modèle, nous fixons la part du travail à 68%, soit la moyenne des valeurs du tableau (5.3). La part des biens intermédiaires dans la valeur ajoutée s'établit donc à $s_y = 0.0479 + 0.68 = 0.728$, tandis que $s_f = 1.047$. On en déduit alors $\zeta = 0.70$.

Le secteur des biens intermédiaires

L'étalonnage du secteur des biens intermédiaires conduit à la détermination des paramètres α , réglant la substitution entre biens intensifs en travail et biens intensifs en énergie – ce paramètre détermine également l'élasticité prix de la demande d'énergie –, ω , la part de l'énergie dans la production, et σ_i $i = 1, 2$, les élasticités-prix des biens 1 et 2, permettant de déterminer le niveau des taux de marge.

α : La valeur du paramètre α détermine le degré de complémentarité-substituabilité entre le travail et l'énergie. La demande d'énergie a fait l'ob-

TAB. 5.3 – Part du travail dans 14 pays de l'OCDE

	Niveau			Variations
	1970	1980	1990	1970-1990
Allemagne	64.1	68.7	62.1	-2.0
Australie	64.8	65.9	62.9	-1.9
Belgique	61.6	71.6	64.0	2.4
Canada	66.9	62.0	64.9	-2.0
Danemark	68.7	71.5	63.3	-5.5
Etats-Unis	69.7	68.3	66.5	-3.3
Finlande	68.6	69.6	72.3	3.7
France	67.6	71.7	62.4	-5.2
Italie	67.1	64.0	62.6	-4.5
Japon	57.5	69.1	68.0	10.5
Norvège	68.4	66.4	63.9	-4.5
Pays-Bas	68.0	69.5	59.2	-8.8
Royaume-Uni	71.4	70.8	71.8	0.4
Suède	69.7	73.6	72.6	2.9
Moyenne	66.7	68.8	65.5	-1.3
Ecart-Type	3.5	3.1	4.0	4.7

jet de nombreuses études quantitatives cherchant à estimer l'élasticité prix.⁵ Chung (1994) reporte les différents résultats d'estimation de l'élasticité de substitution entre énergie et travail pour un ensemble d'études effectuées entre 1973 et 1987, portant principalement sur les États-Unis. Il ressort que le travail et l'énergie sont plutôt substituables avec une élasticité à leur propre prix assez proche.⁶ En termes de comparaison entre les pays, l'étude de Artus et Perroux (1980) reporte les résultats de différents travaux. Ainsi, l'élasticité de substitution entre énergie et travail varie entre 0.78 et 1.23 pour l'Allemagne, entre 0.78 et 1.17 pour la France et entre 0.87 et 1.10 pour la Grande-Bretagne, tandis qu'elle est égale à 1.15 pour le Japon. Atkinson et Manning (1995) résume un ensemble d'études publiées entre le milieu des années 70 et le début des années 80. Ces travaux sont essentiellement effectués sur des données agrégées et font intervenir plusieurs facteurs (travail, capital, énergie...). Le tableau (5.4), repris de l'étude de Bjørner et Jensen (2000),

TAB. 5.4 – Élasticité–prix de l'énergie

Type d'études	Médiane	Moyenne	Min.	Max.	Nombre
Toutes	-0.47	-0.66	-0.06	-2.05	25
Séries temporelles	-0.38	-0.44	-0.06	-1.06	16
Coupe transversale	-0.84	-1.06	-0.27	-2.05	9

Source : Bjørner et Jensen (2000)

résume les valeurs estimées de l'élasticité–prix de la demande d'énergie. Il faut noter que celle-ci dans le modèle est égale à $1/(\alpha - 1)$. Il apparaît qu'une valeur de -0.6 ressort généralement de l'ensemble des travaux. Un autre fait marquant est que l'élasticité obtenue est plus importante en coupe

⁵Les articles de Griffin (1993) et Atkinson et Manning (1995) passe en revue les différents méthodologiques liés à ces estimations.

⁶Berndt et Wood (1975) trouvent une élasticité prix de l'énergie de -0.47 et du travail de -0.45 . De plus, leur élasticité de substitution est de 2.85, ce qui implique une assez forte substituabilité.

transversale⁷ qu' en série temporelle.⁸ Il ressort de ces différents travaux que nous pouvons raisonnablement retenir $\alpha = -0.5$, ce qui donne une élasticité de substitution entre énergie et travail de $2/3$ et une élasticité de la demande d'énergie à son propre prix de $-2/3$.

ω : L'étalonnage de ω est réalisé à partir du comportement de demande bien intensif en énergie. Ce paramètre est déterminé de sorte que la part des dépenses d'énergie dans le produit à l'état stationnaire du modèle soit égale à 4.1%, pourcentage observé sur la période 1991–2000, soit $\omega = 0.0803$.

σ_i ($i = 1, 2$) : L'étalonnage de σ_i , $i=1,2$, est réalisé sur la base d'une information portant sur les taux de marge. En effet, les entreprises produisant des biens intermédiaires ayant un pouvoir de marché dans ce modèle, elles appliquent un taux de marge, noté m , sur leur coût marginal lorsqu'elles vendent ceux-ci aux entreprises produisant le bien final. S'il est relativement aisé de mesurer des taux de marges *moyens* en utilisant le compte des Sociétés et Quasi-Sociétés de la comptabilité nationale, la mesure du taux de marge sur coût marginal est plus difficile dans la mesure où les coûts marginaux ne sont pas directement observables, en tout cas à un niveau agrégé.

Vers la fin des années 80 s'est développée une nouvelle méthode d'évaluation des taux de marge sur coût marginal à un niveau relativement agrégé en utilisant les fluctuations de court terme de la production et des inputs (Hall, 1986 et 1988, et Bills, 1987).

Résumons simplement l'approche de Hall. L'idée est que l'économie est à la fois frappée par des chocs de nature technologique et par des chocs non-technologiques (pour faire simple, des chocs de demande). Une bonne mesure de la technologie doit donc être orthogonale aux chocs de demande. Hall montre que la bonne mesure de la technologie, le résidu de Solow, est une fonction du taux de marge sur coût marginal. L'idée est alors d'estimer la valeur de ce taux de marge qui rend le résidu de Solow orthogonal à une mesure de la demande, par exemple les dépenses publiques.

⁷Ngyen et Streitwieser (1997) obtiennent ainsi une forte élasticité (-3.6) à son propre prix de l'énergie. Cette élasticité va en diminuant au fur et à mesure de l'agrégation.

⁸Ceci renvoie à l'idée assez communément admise que les études en séries temporelles fournissent des élasticité de court-moyen terme, tandis que celles en coupe transversales donnent des élasticités de long terme.

Oliveira–Martins, Scarpetta et Pilat (1996) proposent une évaluation des taux de marge de 1970 à 1992, dans 14 pays de l’OCDE et 36 secteurs de l’industrie, ceci en utilisant une correction de la méthode de Hall proposée par Roegers (1995). Leurs résultats sont présentés dans le tableau (5.5) pour les pays du G7. Sur les 14 pays considérés, le taux de marge moyen sur coût marginal va de 13% en Belgique et Finlande à 26% au Japon sur la période 1980-92 et pour les Pays-Bas pour l’ensemble de la période.

Dans cette étude, nous choisissons un niveau de taux de marge au milieu de cet intervalle, soit environ $m = 20\%$. Dès lors, la valeur de σ_i , $i=1,2$, est de

$$\sigma_i = \frac{1 + m}{m} = \frac{1.2}{0.2} = 6$$

5.5 Le secteur de la recherche

Le secteur de la recherche impose l’étalonnage de θ , la part des chercheurs dans la population active, c_i , $i=1,2$, constantes de calage dans la technologie de recherche, et ν_i déterminant le rendement de la recherche dans chacun des secteurs.

θ : Le paramètre θ est fixé de façon à reproduire le taux de croissance moyen de long terme de l’économie. Nous retenons un taux de croissance du PIB par tête des pays du modèle de 10% tous les dix ans, soit un taux annuel de 0.96%. Ceci conduit à fixer $\theta = 0.0803$.

ν_1 et ν_2 : La calibration de l’élasticité, ν , de l’activité de recherche–développement (R&D) au nombre de chercheurs est problématique. En effet, s’il existe un grand nombre de données documentant les dépenses des entreprises en R&D, il n’existe en revanche que peu d’information mesurant la production et l’emploi liés à cette activité. De plus, les statistiques existantes ne concernent qu’un nombre très réduit d’économies (essentiellement les États–Unis, quelques données étant disponibles pour la France et le Japon). Aussi nous avons supposé que le paramètre d’élasticité était identique dans les deux secteurs — celui intensif en énergie et celui intensif en travail.

L’approche retenue pour l’étalonnage du paramètre ν exploite les conditions définissant le comportement optimal de production des entreprises de

TAB. 5.5 – Taux de marge sectoriels pour les pays du G-7 (période 1970-92)

Secteur	U.S.	Japon	Allemagne	France	Italie	R.U.	Canada
Food products	1.05	1.32	1.12	1.11	.	1.20	1.09
Textiles	1.08	1.19	1.15	1.10	1.16	1.03	1.20
Wearing apparel	1.10	.	1.11	1.15	1.14	1.03	1.10
Leather products	1.08	.	1.18	1.11	1.14	1.06	1.11
Footwear	1.08	.	.	1.13	1.13	1.04	1.07
Wood products	1.22	.	1.20	1.15	1.17	1.18	1.28
Furniture	1.06	1.25	1.15	1.21	1.21	1.19	1.16
Printing & Publishing	1.19	1.10	1.09	1.24	1.18	1.09	1.21
Plastic products	1.07	1.15	.	.	1.08	.	1.17
Non-metal mineral products	1.18	1.26	1.26	1.24	1.30	1.15	1.32
Metal products	1.09	1.11	1.20	1.18	1.39	1.03	1.16
Chemical products	1.26	1.26	1.24	1.19	.	1.08	1.20
Machinery & equipment	1.06	1.09	1.06	1.12	1.19	.	1.15
Motorcycles & bicycles	1.13	.	.	.	.	.	.
Professional goods	1.09	1.22	1.67	.	1.21	1.16	.
Other manufacturing	1.08	1.38	1.30	.	1.09	.	1.11
Beverages	.	1.26	1.33	1.68	.	1.54	1.30
Paper products & pulp	1.13	1.20	1.29	1.13	1.15	1.05	1.39
Petroleum & coal products	1.11	1.10	1.09	.	.	1.06	1.31
Rubber products	.	1.15	.	1.20	1.10	.	1.12
Pottery & china	1.09	1.22	.	1.29	1.30	.	1.40
Glass products	1.17	1.41	1.23	1.22	1.30	1.06	1.31
Iron & steel	1.10	1.19	1.14	1.16	1.17	.	1.25
Non-ferrous metals	1.14	1.26	.	1.26	1.15	1.05	1.14
Shipbuilding & repair	.	1.27	.	.	.	.	1.16
Other transport equipment	.	.	.	.	1.05	.	.
Tobacco products	1.56	.	1.52	3.12	.	1.56	1.19
Petroleum refineries	1.03	1.04	.	1.19	.	1.07	.
Industrial chemicals	1.18	1.23	.	1.21	1.16	1.06	1.40
Drugs & medicines	1.44	1.54	1.45	1.04	.	1.16	1.25
Office & computing machinery	1.54	1.24	1.58	1.17	1.67	1.47	.
Radio, TV & comm. equipment	1.40	1.13	1.34	1.11	1.19	1.25	1.31
Electrical apparatus	.	1.05	.	1.25	1.08	.	1.16
Railroad equipment	.	.	.	1.69	.	.	1.13
Motor vehicles	1.09	1.17	1.15	1.13	1.02	.	1.14
Aircraft	.	.	.	1.21	1.10	.	1.25

R&D.⁹ Rappelons que le profit d'une entreprise de recherche est donné par

$$\Pi_{it}^R = V_{it} \frac{h_{it}^{\nu_i}}{c_i} N_{it} - W_t^R h_{it} \quad (\text{E.1})$$

où W_t^R désigne le salaire d'un chercheur. La maximisation du profit permet alors de déterminer l'effort optimal de recherche dans le secteur, et conduit à l'égalisation du salaire des chercheurs à leur productivité marginale :

$$W_t^R = \nu_i V_{it} \frac{h_{it}^{\nu_i-1}}{c_i} N_{it}$$

A l'optimum, le profit de l'entreprise se réécrit donc

$$\Pi_{it}^R = (1 - \nu_i) V_{it} \frac{h_{it}^{\nu_i}}{c_i} N_{it} \quad (\text{E.2})$$

Ainsi, le profit des entreprises produisant de la R&D s'exprime comme une fraction constante du chiffre d'affaire. Une estimation naturelle du paramètre ν peut donc être obtenue en calculant le ratio entre l'excédent brut d'exploitation (EBE) des entreprises produisant de la R&D et leur chiffre d'affaire. Mulkay, Hall et Mairesse (2000) étudient le comportement d'investissement en R&D sur un panel de 500 entreprises françaises et américaines pour la période 1982–1993. Ils disposent en particulier d'informations sur les ratios EBE/capital (Π/K) et capital/ventes (K/V) de ces entreprises. Il est alors possible d'évaluer le paramètre ν sur leur échantillon par la formule

$$\nu = 1 - \frac{\Pi}{K} \times \frac{K}{V}$$

Le tableau 5.6 reporte les résultats pour les économies françaises et américaines. Nous reportons en particulier une estimation du paramètre ν à la moyenne et à la médiane de l'échantillon. Cette estimation indique clairement que ν doit s'établir entre 0.5 et 0.8. Mulkay, Hall et Mairesse (2000) reportent également une mesure des cash flows et du capital ajustée pour la R&D. Cette mesure

⁹Une approche alternative aurait été d'estimer directement le paramètre ν à partir de l'expression de la fonction de production de ce secteur. Cependant, l'absence de données portant sur la production de recherche-développement (et non les dépenses de R&D) interdit une telle pratique. L'utilisation d'une variable proxy telle le nombre de brevets dans l'année ne s'avère pas satisfaisante, dans la mesure où son caractère informatif est trop limité pour espérer obtenir une estimation précise et raisonnable de ν .

TAB. 5.6 – Approche par les profits

	France		Etats-Unis	
	Moyenne	Médiane	Moyenne	Médiane
Π/K	0.1562	0.1428	0.2764	0.2431
K/V	1.5589	1.4948	1.6787	1.5809
Π/V	0.2435	0.2135	0.4640	0.3843
ν	0.7565	0.7865	0.5360	0.6157

est obtenue en ajoutant aux cash flows les investissements en R&D des entreprises ($\Pi + R$), et en augmentant le stock de capital physique (K) de ces entreprises par le stock de connaissance (G) — le cumul d'un savoir-faire accumulé lors de l'activité de recherche.¹⁰ Cette correction conduit à une

TAB. 5.7 – Approche par les profits

	France		Etats-Unis	
	Moyenne	Médiane	Moyenne	Médiane
$(\Pi + R)/(K + G)$	0.1526	0.1417	0.2384	0.2185
$(K + G)/V$	2.7454	2.5868	2.8988	2.7358
$(\Pi + R)/V$	0.4189	0.3665	0.6911	0.5978
ν	0.5811	0.6335	0.3089	0.4022

augmentation importante de la part des profits dans les ventes, passant par exemple de 24.35% en moyenne pour les entreprises françaises à 58.11% sur la même période. Il en résulte ainsi une baisse du paramètre ν estimé, qui devrait alors s'établir entre 0.3 et 0.6.

Ces estimations sont en conformité avec une approche basée sur une évaluation de la part du travail dans la valeur ajoutée de ce secteur. En effet, une étude réalisée en 1995 par la National Science Foundation établit

¹⁰ G est obtenu par une loi d'inventaire permanent

$$G_t = R_t + (1 - \delta_R)G_{t-1}$$

dans laquelle δ_R est fixé à 15% et où G_0 est obtenu en utilisant l'information disponible avant la date initiale de leur échantillon.

qu'entre 45 et 83% des dépenses totales en R&D effectuées aux États-Unis sont allouées au paiement des salaires et autres bénéfices des chercheurs.¹¹ Goolsbee (1998) propose de retenir une part des revenus versés au travail s'établissant au milieu de cet intervalle. Ceci conduit alors à retenir une valeur de ν de 2/3, apparaissant cohérente avec les résultats obtenus dans le tableau 5.6. Cette approche prudente se justifie d'une part par la quasi-inexistence de données — un comportement prudent dans la sélection d'une valeur pour ν s'imposant alors — et par la faible qualité de ces données. Ainsi, une pratique courante consiste à assimiler dépenses en R&D à la production de R&D, alors que ces deux quantités diffèrent. De plus, une mesure "naturelle" de la production de R&D est fournie par le nombre de brevets accordés dans l'année, elle est toutefois sujette à de fortes erreurs de mesure.

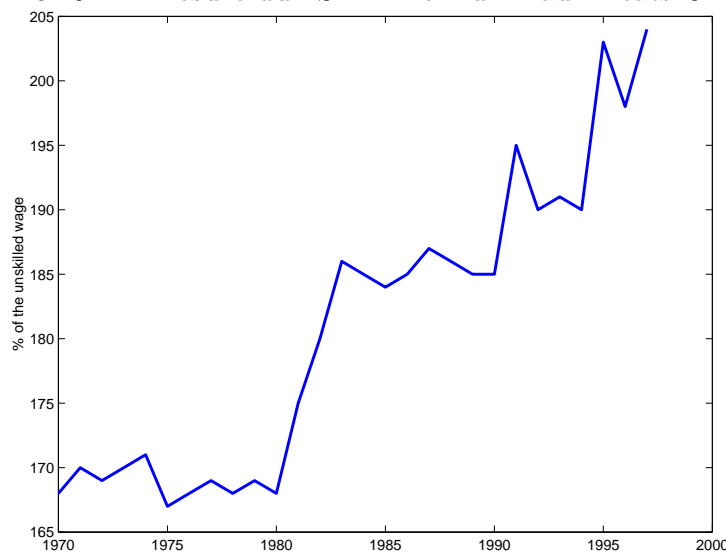
c_1 et c_2 : Les paramètres c_1 et c_2 permettent de déterminer le rythme de création de nouveaux brevets dans le secteur des biens intensifs en énergie (c_1) et en travail (c_2), étant donné le nombre de chercheurs $h_{i,t}$ dans chaque secteur ($i = 1, 2$). Les paramètres c_1 et c_2 sont fixés de façon à reproduire d'une part le rapport w^R/w observé, c'est à dire dans le modèle le salaire des chercheurs relatifs aux autres salaires de l'économie, et d'autre part la valeur observée de μ , c'est à dire la part des chercheurs travaillant dans le secteur intensif en énergie. Nous discutons tout d'abord les différentes façons de calculer ce salaire relatif.

Il existe deux moyens distincts d'approcher le salaire relatif des chercheurs. Une première approche se fonde sur l'observation directe des salaires par occupation : on identifie une catégorie "chercheurs" et on mesure son salaire moyen. La seconde approche se fonde sur le niveau de diplôme. Sous l'hypothèse que les chercheurs sont des diplômés de troisième cycle, et qu'en première approximation, par arbitrage, le salaire d'un diplômé de troisième cycle est similaire quelle que soit son occupation, alors le ratio salaire des diplômés/salaire des non diplômés peut nous permettre de caler les paramètres ν_i .

En ce qui concerne la mesure par le diplôme, le graphique 5.4 (Ingram et

¹¹La largeur de l'intervalle est liée au fait que cette mesure varie beaucoup en fonction de la mesure des prestations et allocations versées aux chercheurs.

FIG. 5.4 – Mesure du “Skill Premium” aux États-Unis



Neumann (1999)) représente le salaire moyen des “qualifiés” au États-Unis en pourcentage de celui des “non-qualifiés”, la qualification étant mesurée par les années d’études. On observe que le ratio s’établit autour de 2 en fin d’échantillon, sachant qu’un fait marquant sur ces vingt dernières années est l’augmentation de la prime à la qualification. Sur données suédoises, Lindquist (2001) utilise également les années d’éducation pour mesurer la qualification, et obtient un ratio plus faible de 1.14 en 1981 et 1.34 en 1997, ce ratio s’élevant à 1.39 en 1992 et 1.56 en 1997 pour les hommes travaillant dans le secteur privé. Enfin, l’enquête “Génération 92” du CEREQ propose une étude, en 1997-1998, portant sur 27 000 jeunes français sortis du système scolaire en 1992, à tous niveaux de diplômes. Pour les diplômes de niveau inférieurs au baccalauréat, le salaire médian varie entre 5500 francs par mois pour une première année de CAP–BEP tertiaire à 6500 francs pour un bac généraliste et 7500 francs par mois pour un bac technologique. Pour les diplômes de l’enseignement supérieur, le salaire médian cinq ans après l’obtention du diplôme est de 12250 francs par mois pour un Bac+5 et plus en mathématiques, sciences et technologie, 13500 francs par mois pour une école de commerce ou de gestion et 13950 francs par mois pour un diplôme d’ingénieur. Ainsi, le ratio Ingénieur/bac technologique vaut 180%, le ratio Ingénieur/première année de CAP–BEP tertiaire vaut 245%.

La seconde source d'information correspond directement à la mesure du salaire par occupation. Nous disposons aux États-Unis du “National Compensation Survey”, qui propose la mesure des salaires médians par occupation. En 1999, le salaire médian horaire à temps plein d'un “professional speciality” (Ingénieur, architectes, informaticiens, scientifiques, médecins, enseignants, juges, artistes) était de \$ 27.17, alors que le même salaire était de \$13.10 en moyenne pour les “blue collars”, soit un ratio de 207%, un chiffre d'un ordre de grandeur similaire à ceux obtenus par un critère de diplôme. Nous retiendrons une valeur du “wage premium” de 2.

Concernant la part μ de chercheurs travaillant dans le secteur intensif en énergie, nous utilisons des données publiées par le site *Energy Trends*¹². Ces données concernent les dépenses de R&D à des fins d'économie énergétique ainsi que leur part dans la R & D totale. Ces données sont disponible pour différents pays (Allemagne, Canada, États-Unis, Italie, Pays-Bas) pour la fin des années 1990. Les parts de ces différents pays sont alors pondérées par leur taille relative afin de déterminer un indicateur agrégé. Le tableau 5.8 reporte la part de la R&D énergétique dans la R&D totale de ces pays, l'année associé et le poids accordé à ce pays lors du calcul de l'indicateur agrégé. La part

TAB. 5.8 – Part de la R&D énergétique

Pays	Part de la R&D énergétique (en %)	Année	Poids du pays (en %)
Allemagne	1	1997	14
Canada	8	1997	6
Etats-Unis	2	1996	68
Italie	4	1996	9
Pays-Bas	6	1996	3
Moyenne pondérée			2.5

des chercheurs travaillant dans le secteur intensif en énergie apparaît assez variable selon les pays, mais elle reste relativement modeste. Compte tenu de l'importance relative de chaque pays, on obtient alors $\mu = 2.5\%$.

¹²Ces données sont disponibles sur le site <http://energytrends.pnl.gov/>.

Au total, les paramètres c_1 et c_2 sont ainsi fixé afin de reproduire $w^R/w = 2$ et $\mu = 0.025$.

5.6 La technologie d'extraction

L'extraction impose l'étalonnage des paramètres α , β et Φ .

β et δ : A partir de la valeur étalonnée pour α (nous avons retenu $\alpha = -0.5$), il est possible d'étalonner les valeurs de δ et β à l'équilibre du marché de l'énergie. On peut alors déterminer le taux de croissance du prix relatif de l'énergie. En effet, en inversant l'expression de la demande d'énergie et en l'exprimant en taux de croissance, il vient :

$$\gamma_{pE/p} = (1 - \alpha)(\gamma_y - \gamma_e)$$

où $\gamma_{pE/p}$ désigne le taux de croissance du prix relatif de l'énergie, γ_y le taux de croissance du PIB et γ_e le taux de croissance de l'énergie. En utilisant l'expression la loi d'évolution du stock déjà extrait (la variable notée Z dans le texte du modèle), on a égalité entre le taux de croissance du stock déjà extrait γ_z et le taux de croissance de l'énergie γ_e :

$$\gamma_z = \gamma_e$$

En utilisant le coût d'extraction de l'énergie, on obtient la relation suivante sur les taux de croissance :

$$\gamma_{pE/p} = (\delta + \beta)\gamma_e$$

Sachant que $\gamma_{pE/p} = (1 - \alpha)(\gamma_y - \gamma_e)$, on obtient

$$\beta + \delta = (1 - \alpha) \left(\frac{\gamma_y}{\gamma_e} - 1 \right)$$

Pour $\alpha = -0.5$, les taux de croissance sur les décennies 80 et 90 de l'énergie par tête et du produit par tête permettent de déterminer

$$\delta + \beta = 1$$

Les paramètres β et δ sont tous les deux fixés à 0.5 de sorte à vérifier la contrainte sur leur somme à l'unité.

Φ : Il nous reste maintenant à fixer la constante d'échelle Φ dans la fonction d'extraction. Ce paramètre est fixé de sorte que le coefficient technique énergie/produit soit égal en 1995 à la valeur observée dans les données. La valeur de Φ correspondante est égale à 0.027.

5.7 La fiscalité

La fiscalité est résumée dans le modèle par trois paramètres : τ^E , la taxe sur l'énergie, τ^C , la taxe sur la consommation et τ^R , la subvention de la R & D.

τ^E : Le paramètre τ^E correspond au taux de taxation apparent de l'énergie, utilisée comme consommation intermédiaire dans les pays de l'OCDE. Il est déjà très difficile d'évaluer un taux de taxe moyen sur l'énergie pour un pays particulier. Sur la base des données de l'AIE, nous pouvons obtenir des prix et taxes sur l'énergie dans chacun des pays de l'OCDE. Même en se restreignant au G7, il est malheureusement impossible d'obtenir des données pour chaque pays et pour un ensemble de type d'énergie assez représentatif. Nous avons cependant obtenu des données assez précises en ce qui concerne la taxation du fuel lourd utilisé par l'industrie pour les pays du G7 sauf le Canada et les États-Unis, sur la période 1991-1997. Ces données sont présentées dans le tableau (5.9). Le taux de taxe moyen (en pondérant chaque pays par sa part dans la consommation totale de fuel lourd) décroît régulièrement sur ces sept ans, pour finir aux alentours de 10%. Notons que le Japon se distingue très nettement des quatre autres pays avec un taux de taxe aux alentours de 3%, contre plus de 15% ailleurs. Notons que ce type d'énergie ne représente qu'une faible part de l'ensemble de l'énergie consommée par l'industrie, autour de 3% dans le G7, un peu plus pour les cinq pays que nous considérons. Ce taux de 10% doit être considéré comme une borne supérieure sur le taux moyen apparent sur l'énergie dans la mesure où le fuel est en général plus taxé que les autres énergie fossiles (gaz, charbon) et que les énergies non-fossiles, et dans la mesure où les États-Unis et le Canada, qui taxent moins l'énergie, sont absent de l'échantillon. En l'absence d'information supplémentaire, nous fixons ce taux à 5%.

TAB. 5.9 – Taxation du fuel lourd utilisé par l'industrie

Taux de taxe (%)						
	France	Allemagne	Italie	Japon	Royaume-Uni	G7*
1991	20.8	13.1	18.8	2.9	14.6	11.7
1992	21.8	14.4	17.6	2.9	15.7	12.1
1993	24.5	15.3	16.5	2.9	15.9	12.7
1994	14.3	14.7	15.7	2.9	18.9	11.4
1995	14.2	14.2	16.3	2.9	18.7	10.6
1996	13.3	13.2	16.3	2.9	21.3	10.7
1997	13.8	13.0	15.5	4.3	22.0	10.7
Part dans l'énergie totale (%)						
	France	Allemagne	Italie	Japon	Royaume-Uni	G7*
1991	7.7	7.0	9.5	6.5	9.3	3.4
1992	7.2	7.1	9.1	5.7	7.3	3.1
1993	7.4	5.7	8.0	5.7	9.0	2.9
1994	6.8	5.4	8.4	5.6	8.3	2.8
1995	6.1	5.9	7.8	5.5	5.8	2.6
1996	5.9	5.2	7.2	4.9	4.6	2.3
1997	5.7	4.0	7.1	4.5	3.1	2.1

* Moyenne pondérée.

τ^C : Le taux de taxe τ^C sur la consommation est fixé à 20%. Dans la mesure où la TVA est la source quasi unique de recette fiscale sur le compte central, 20% est dans l'ordre de grandeur des dépenses publiques hors transferts dans les pays de l'OCDE. Notons que ce taux n'a aucun effet sur l'état stationnaire du modèle et que seule des modifications de ce taux au cours du temps vient affecter le comportement des variables du modèle.

τ^R : Le taux de subvention de la R& D est fixée à zéro pour le compte de référence du modèle. Les effets d'une modification de ce taux seront évalués par la suite.

5.8 Résumé de la calibration

Le tableau 5.10 résume le travail de calibration exposé précédemment.

TAB. 5.10 – Calibration du modèle

Paramètre	Lien	Valeur
Bien final		
B	Constante d'échelle	14.8125
ζ	Elasticité du produit au bien intermédiaire	0.7000
Bien intermédiaire		
α	Elasticité prix	-0.5000
ω	Part de l'énergie	0.2000
σ_1	Elasticité prix du bien 1	6.0000
σ_2	Elasticité prix du bien 2	6.0000
Recherche		
θ	Part des chercheurs dans la population	0.0803
ν_1	Elasticité de la production de brevet à l'effort (S1)	0.6666
ν_2	Elasticité de la production de brevet à l'effort (S2)	0.6666
c_1	Facteur d'échelle (S1)	0.0939
c_2	Facteur d'échelle (S2)	0.2946
Extraction		
β	Elasticité de l'extraction à l'énergie	0.5000
δ	Elasticité de l'extraction au stock	0.5000
Φ	Facteur d'échelle	0.2070
Taxation		
τ	Taxation de l'énergie	0.0500
τ^C	Taxe à la valeur ajoutée	0.2000
τ^R	Subvention à la R&D	0.0000
Consommateur		
δ_k	Taux de dépréciation du capital	0.7050
σ	Inverse de l'élasticité de substitution intertemporelle	1.0000
ρ	taux de préférence pour le présent	0.2195
N	Taille de la population	1.0000

Chapitre 6

Le compte central du modèle

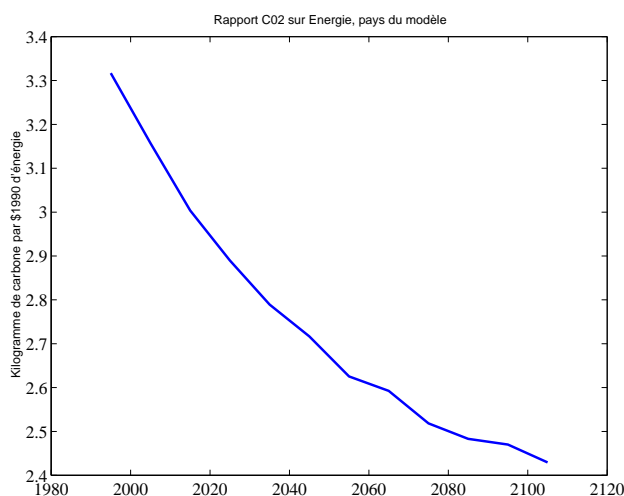
Le chapitre précédent a présenté en détail la calibration du modèle. Son compte central produit une trajectoire de production par tête et d'énergie par tête pour l'OCDE. Nous expliquons dans un premier temps la manière dont est calée la trajectoire du rapport émissions sur énergie et le comportement du reste du monde. Dans un second temps, nous présentons les trajectoire de la production mondiale, des émissions mondiales, de la concentration atmosphérique en CO₂ et de l'accroissement de la température atmosphérique moyenne.

6.1 Calage des émissions du compte central du bloc OCDE et du comportement du reste du monde

Notre modèle propose une prédiction de la quantité d'énergie utilisée par l'OCDE. A énergie donnée, l'émission de gaz à effet de serre peut varier selon la nature de l'énergie utilisée (par exemple nucléaire *versus* charbon), mais également à la suite de progrès technique permettant, par exemple, d'émettre moins à quantité de charbon utilisé donnée. Notre modèle n'endogénéise pas dans sa version actuelle la variation du rapport CO₂ émis/énergie. Nous supposons que ce rapport évolue (à la baisse) de façon exogène, de sorte à ce que l'évolution du rapport CO₂ émis par dollar 1990 produit réplique celle du compte central de Boyer & Nordhaus. La séquence exogène du rapport CO₂/Énergie est présentée sur la figure 6.1. Ce rapport vaut près de 3.3kg

de carbone par \$ 1990 d'énergie en 1995, et descend à un peu plus de 2.4 en 2105. Cette évolution est le fruit d'un effet de composition dans l'utilisation des énergies fossiles et non fossiles ainsi que d'un progrès technique de décarbonisation. Les versions futures du modèle endogénéiseront cette évolution.

FIG. 6.1 – Décarbonisation exogène pour les pays du modèle



Le modèle produisant une série énergie/production endogène, nous obtenons une série endogène d'émissions/production. On fait alors l'hypothèse que le rapport émissions/production du reste du monde évolue de sorte à ce que le rapport de ces deux ratios reste en tout point du temps égal au même rapport dans le compte central de B&N. Ainsi, tout effort de R&D conduisant à une réduction du rapport énergie/production dans les pays du modèle sera transmis au RDM. L'hypothèse ainsi faite permet d'obtenir un compte central proche de celui de B&N, mais de permettre aux effets de R&D de jouer également sur les émissions du RDM, dont on a vu au chapitre 1 qu'elles contribuaient de manière essentielle dans les émissions mondiales pour le siècle à venir.

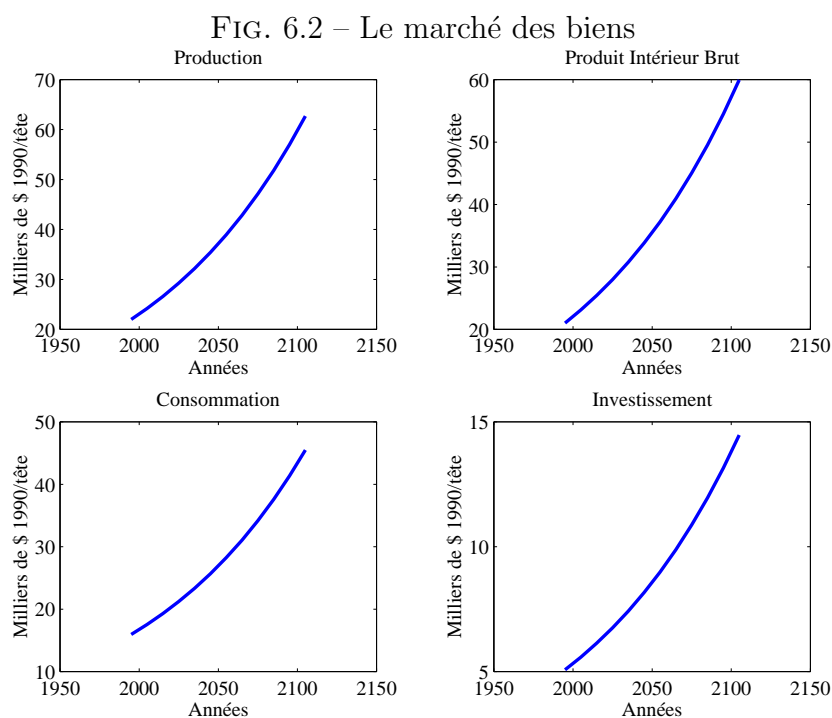
Un jeu d'hypothèse similaire permet de simuler la trajectoire de production par tête du reste du monde. Nous supposons que le ratio produit par tête des pays du modèle/produit par tête du RDM demeure en tout point égal à celui du compte central de B&N. Ainsi, les variations de croissance du modèle sont, en variantes, transmises au RDM.

Munis de ces deux jeux d'hypothèses, nous pouvons obtenir une trajectoire d'émissions mondiales de CO₂, qui constitue l'input du bloc température du modèle.

On présente sur les graphiques 6.2 à 6.13 les principales évolutions le long de notre compte central. Il est à noter que celui-ci est volontairement choisi très similaire à celui de B&N.

6.2 Compte central : variables économiques

Comme précisé plus haut, le modèle est calé pour reproduire un compte central très proche de celui de Boyer et Nordhaus (2000). La figure (6.2) représente le sentier de croissance équilibrée, le long duquel la PIB, la production, l'investissement et la consommation croissent au même taux.

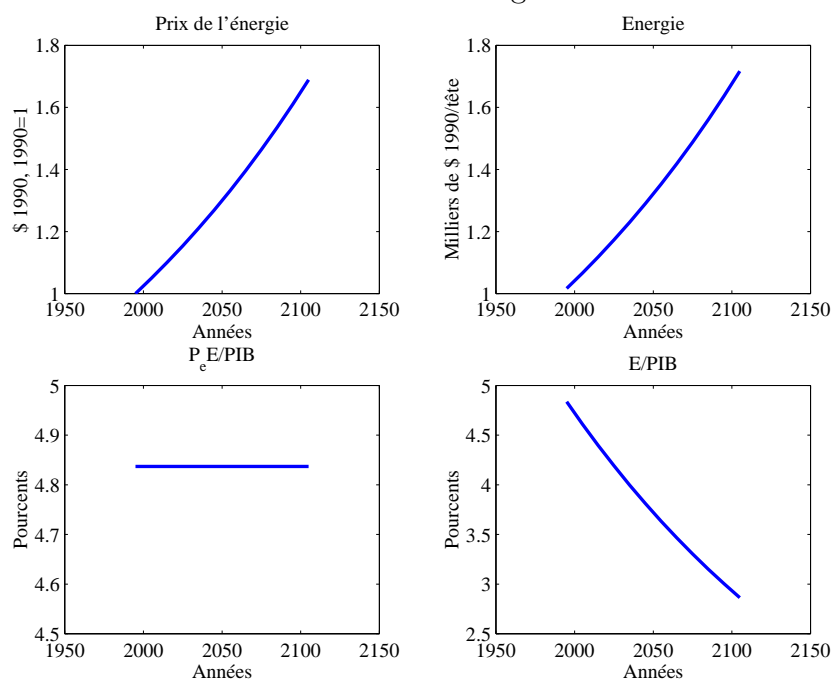


Note : Les données présentées sont exprimées en valeurs annuelles

Le graphique (6.3) montre l'influence de la R&D et du progrès technique endogène : l'énergie utilisée croît moins vite que la production, son prix plus

vite étant donnée la technologie d'extraction. La part des dépenses consacrée à l'énergie demeure constante le long d'un sentier de croissance équilibrée, mais le coefficient technique énergie/PIB baisse tendanciellement : il est possible de produire de plus en plus en utilisant relativement de moins en moins d'énergie, parce que la R&D augmente la productivité de l'énergie. Ceci est effectivement réalisé à l'équilibre décentralisé car le prix de l'énergie augmente suffisamment pour rendre rentable un tel effort de R&D (sans pour autant garantir l'optimalité sociale de ce niveau d'effort en R&D).

FIG. 6.3 – Énergie

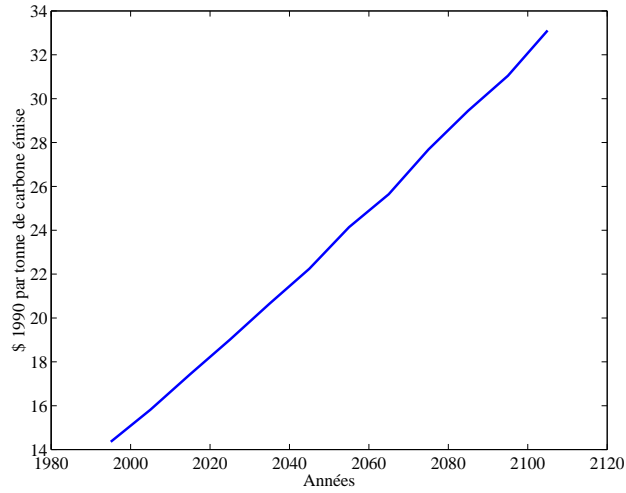


Note : Les données présentées sont exprimées en valeurs annuelles

On observe sur la figure (6.4) que si le taux de taxe sur l'énergie est constant, le montant en dollar de la taxe par tonne de carbone émis est croissant, bien que restant à des niveaux modestes, et ce parce que le prix de l'énergie est lui même croissant.

Les graphiques (6.5) et (6.6) illustrent les évolutions affectant la R&D. Notons que l'effort relatif affecté aux deux type de recherche est constant, et que c'est la croissance sans bornes du nombre de brevets dans les deux

FIG. 6.4 – Taxe sur l'énergie



secteurs qui est à la source de la croissance dans cette économie.

Nous avons déjà souligné plus haut que l'évolution du ratio $\text{CO}_2/\text{Energie}$ était pris comme un donnée exogène au modèle (graphique (6.7)). En revanche, la baisse constatée du ratio CO_2/PIB (graphique (6.8)) résulte bien du mécanisme endogène de baisse de l'intensité en énergie de la production.

FIG. 6.5 – R&D

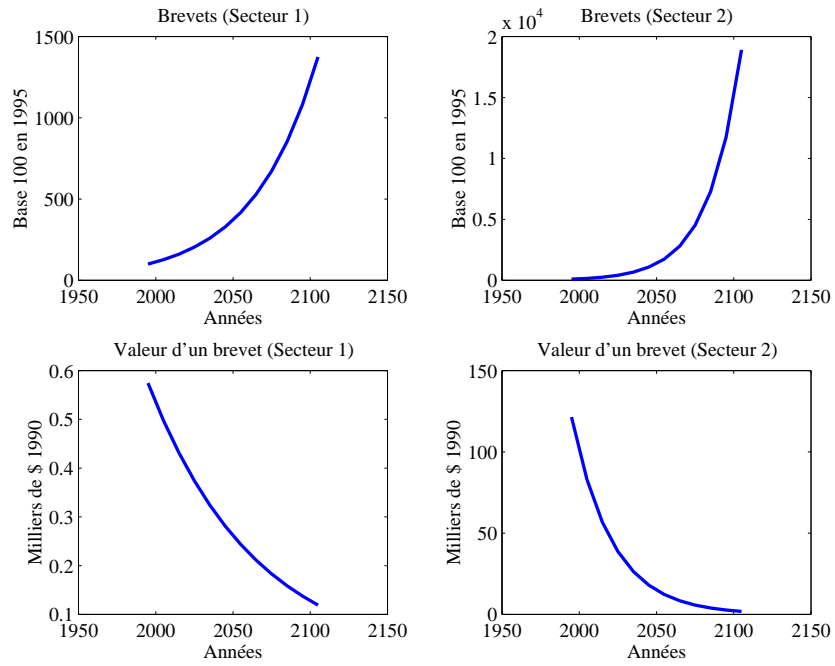


FIG. 6.6 – Proportion de chercheurs dans le secteur 1

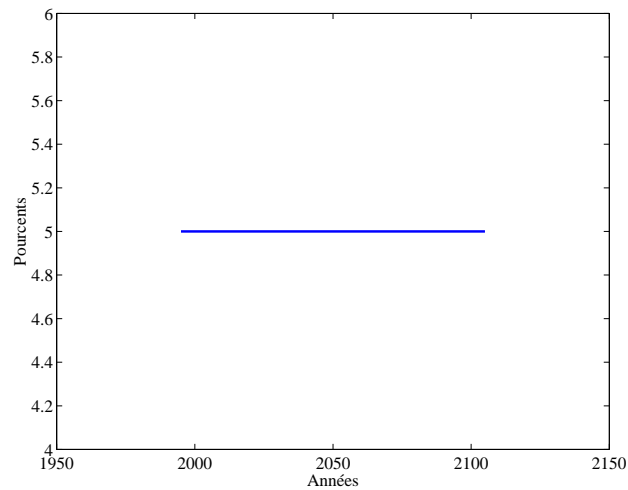


FIG. 6.7 – Ratio CO₂/Energie

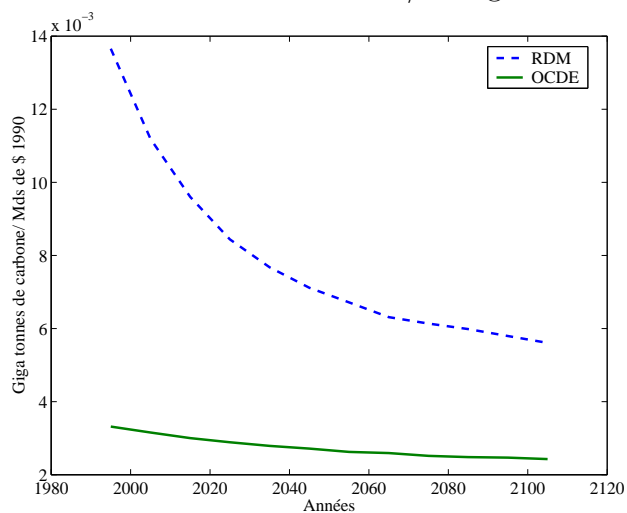
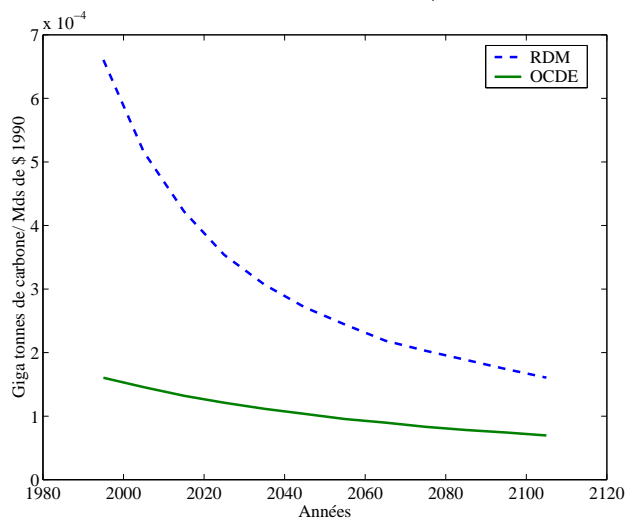


FIG. 6.8 – Ratio CO₂/PIB



6.3 Compte central : variables physiques

Les émissions annuelles croissant le long du compte central, la température atmosphérique s'élève pour atteindre +2.5° Celsius au dessus de 1900 en 2105. Le reste des évolutions constatées correspond aux projections présentées dans le chapitre 2.

FIG. 6.9 – Émissions annuelles de CO₂

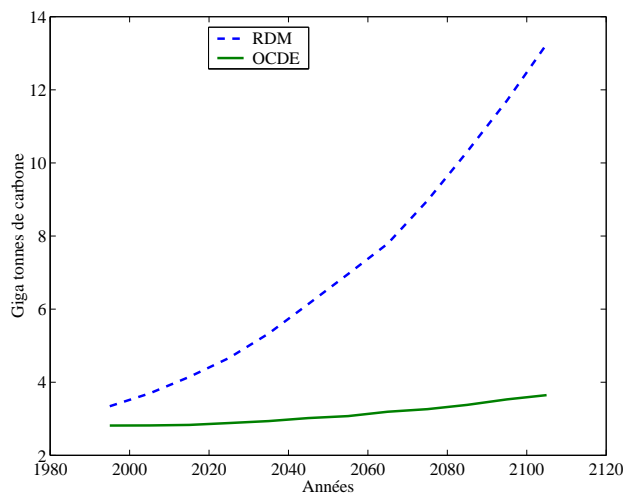


FIG. 6.10 – Émissions annuelles mondiales de CO₂

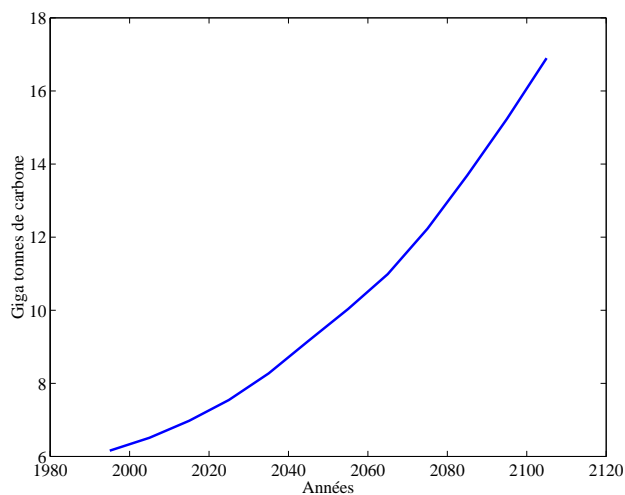


FIG. 6.11 – Concentration atmosphérique de CO₂

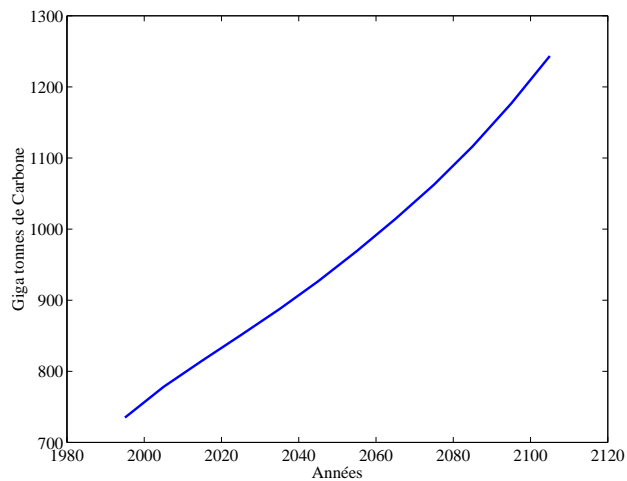


FIG. 6.12 – Température atmosphérique

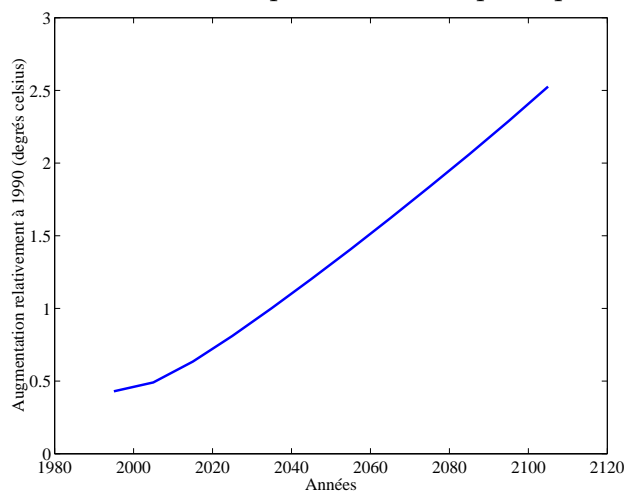
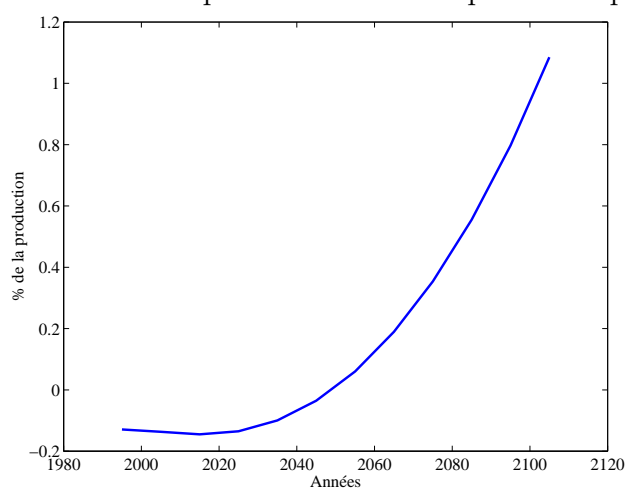


FIG. 6.13 – Perte de production induite par la température



Chapitre 7

Les mécanismes économiques propres au modèle

Ce chapitre propose une analyse des propriétés dynamiques du modèle. Cette dernière fournit donc une information essentielle à la compréhension du modèle, dans la mesure où elle permet d'étudier les mécanismes de transmission internes des politiques économiques que nous envisagerons dans le chapitre suivant. L'analyse de la dynamique du modèle est menée en étudiant les propriétés de dynamique de transition de l'économie considérée. Nous décrivons ainsi la façon dont l'économie rejoint son sentier de croissance de long terme lorsqu'elle en est écartée par une perturbation d'une des variables d'état du modèle. Les trois variables d'état du modèle — le stock de capital k , la “profondeur des puits”, z et la distribution des brevets x — sont successivement perturbées. A des fins de comparaison, la perturbation de chacune des variable est choisie de façon à ce qu'instantanément le produit intérieur brut de l'économie s'écarte de 3% au dessous du compte central. Ceci conduit à perturber

- le stock de capital (variable k) négativement de son sentier de croissance de long terme de 9.95%,
- la “profondeur des puits” (variable z) positivement en la multipliant par 4, ce qui implique une augmentation drastique (67%) du prix de l'énergie,
- la distribution des brevets (variable x) négativement de 4.5% ce qui implique une plus grande intensité de la recherche dans le secteur développant des biens intensifs en énergie.

Nous examinons successivement chacune de ces perturbations.

7.1 Dynamique de transition : Diminution du stock de capital physique initial

Nous analysons dans cette section le comportement dynamique d'une économie lorsque son stock de capital initial, K_0 , est artificiellement diminué de 9.95% relativement à son sentier de croissance équilibrée dès 1995. Les figures 7.3 à 7.7 reportent les dynamiques d'ajustement des grands agrégats macroéconomiques traditionnels tandis que les figures 7.9 à 7.12 permettent d'étudier les conséquences d'une telle perturbation sur l'environnement.

Les figures 7.2 et 7.3 permettent d'analyser les conséquences sur le marché des biens d'une diminution du stock de capital initial. La figure 7.2 fournit la déviation relative de la trajectoire perturbée relativement au compte central — la trajectoire suivie le long du sentier de croissance équilibrée — pour l'ensemble des périodes entre 1995 et 2105. Ainsi pour une variable générique Y , la déviation relative à la date τ , $\delta_{Y,\tau}^r$ est fournie par

$$\delta_{Y,\tau}^r = 100 \times \frac{Y_\tau - Y_\tau^*}{Y_\tau^*}$$

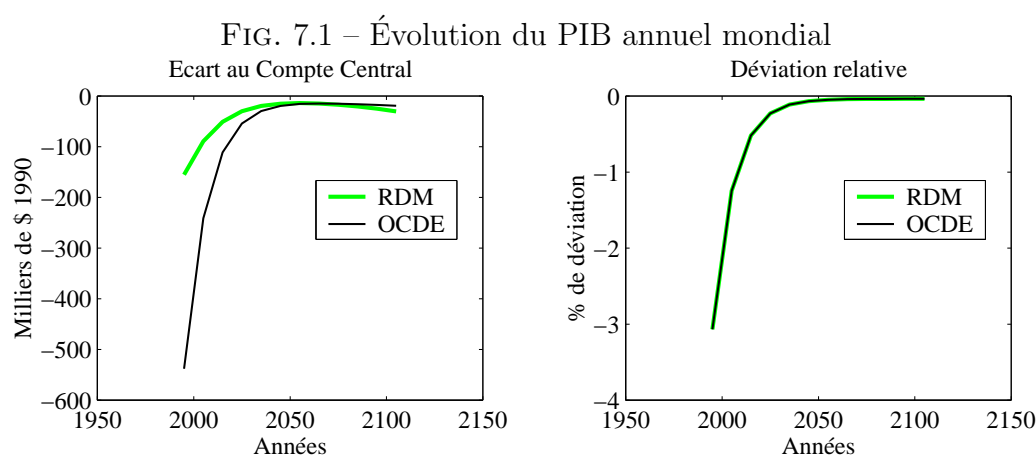
où Y_τ^* désigne la trajectoire de compte central pour la variable Y . Cette déviation relative s'exprime alors en pourcentage. La figure 7.3 reporte l'écart absolu au compte central $\delta_{Y,\tau}^a$

$$\delta_{Y,\tau}^a = Y_\tau - Y_\tau^*$$

exprimé en unité de compte, c'est-à-dire en milliers de dollars US en base 1990.

Comme le montre la figure 7.2, par construction de la perturbation, le produit intérieur brut (PIB par la suite) par tête de l'économie diminue de 3%, soit une perte de 600 dollars par tête comme l'indique la figure 7.2. Cette baisse du produit se retrouve au niveau mondial, ainsi le PIB de l'OCDE chute de 550 milliers de dollars 1990, tandis que le PIB du reste du monde chute de 150 milliers de dollars. La baisse du produit dans l'OCDE résulte directement de la baisse de la production finale F_t consécutive à la baisse

du stock de capital (rappelons que la fonction de production du bien final dépend positivement du niveau du stock de capital physique). Cette diminution du produit est soutenue par la baisse de la consommation et de l'investissement. Cette baisse des deux composantes de la demande résulte de la perte de richesse pour le consommateur que représente la diminution du stock de capital. Ainsi, la consommation baisse instantanément de 3.5%, soit environ une perte de 550 dollars par tête, et l'investissement diminue de 1.8% relativement au compte central, soit une perte de 90 dollars par tête.



Le lecteur familier avec le modèle de croissance optimale standard sera certainement surpris par la baisse concomitante de la consommation et de l'investissement. En effet, dans le modèle de croissance optimale standard, une diminution du stock de capital initial implique effectivement une baisse temporaire de la consommation, mais une augmentation de l'investissement afin de reconstituer le stock de capital. Il faut cependant noter que l'augmentation de l'investissement dans ce modèle correspond d'avantage à un effort d'accumulation plus marqué. Il importe en fait que l'investissement net ($I_t - \delta_k K_t$) soit positif afin de reconstituer le capital.

Dans le présent modèle, la diminution de l'investissement n'est pas incompatible avec la reconstitution du stock de capital, l'investissement net demeurant positif. De fait l'effort d'accumulation s'élève effectivement suite à la baisse du stock de capital initial. La part de la valeur ajoutée revenant à l'effort d'accumulation s'élève — le rapport I/Y augmente de 1.2% dès l'impact — suite à l'élévation du taux d'intérêt consécutive à la baisse du

FIG. 7.2 – Écart relatif au compte central (Le marché des biens)

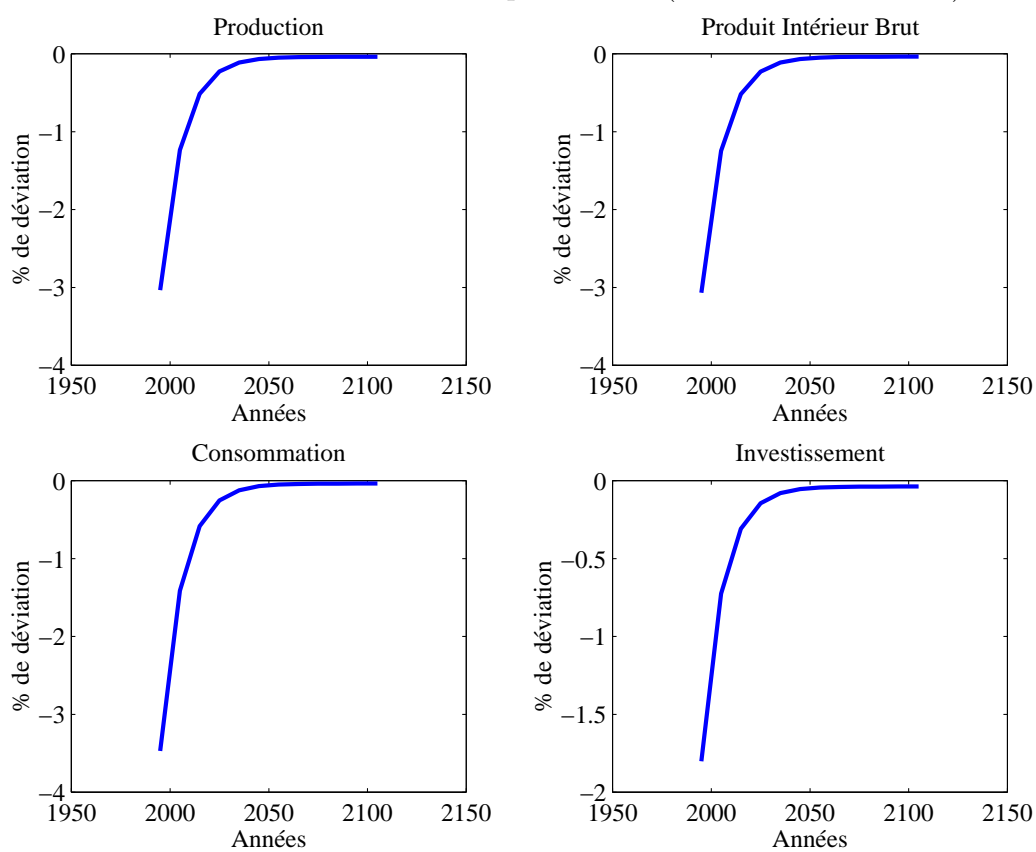
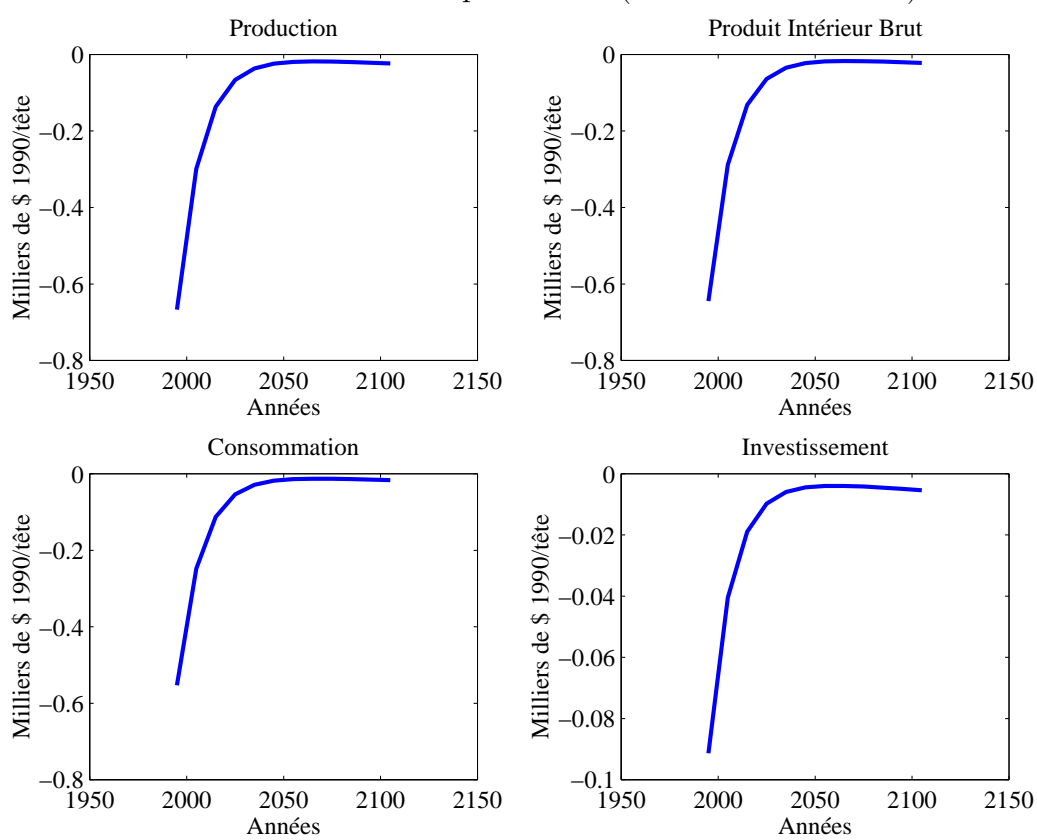


FIG. 7.3 – Écart au compte central (Le marché des biens)



stock de capital physique. Ce renforcement de l'effort d'accumulation permet alors de reconstituer le stock de capital, qui converge vers son niveau de long terme dans le modèle stationnaire. Le retour du stock de capital déflaté à son niveau de long terme correspond à une reconstitution de la richesse des agents leur permettant de revoir leur consommation et leur niveau d'investissement à la hausse. Ainsi, consommation et investissement retourne à leur niveau d'état stationnaire dans le modèle stationnaire.

Il convient de noter qu'à long terme, aucune variable ne retourne vers son sentier de croissance de long terme. Chacune converge vers un sentier de croissance équilibrée moins élevé que le sentier de croissance atteint dans l'économie non perturbée. La raison d'un tel phénomène est simple et renvoie au caractère endogène de la croissance. La baisse du stock de capital exerce, dans ce modèle, un effet négatif sur le taux de croissance de l'économie durant la transition (la raison d'un tel phénomène deviendra claire par la suite). L'économie croissant temporairement moins vite, elle ne peut atteindre le même sentier de croissance que l'économie sans choc. Elle est donc perpétuellement moins riche.

La modification du stock de capital affecte également la consommation d'énergie de l'économie. En effet, la baisse du capital entraînant une chute, toutes choses égales par ailleurs, dans la production de bien final, la demande de bien intermédiaire (Y) est également affectée. Ceci implique une diminution de la demande des deux types de biens intermédiaires, X_1 et X_2 . Ceci a une conséquence directe sur la demande d'énergie de l'économie dans la mesure où le bien X_1 est produit en utilisant de l'énergie. Dès lors, l'utilisation de l'énergie diminue de 1.5% (voir figure 7.4), correspondant à une diminution de 15 dollars par tête en 1995 (voir figure 7.5).

La baisse de la demande d'énergie entraîne alors une diminution du prix de l'énergie à l'équilibre. Cette diminution atteint instantanément 0.8%. La dynamique de la consommation et de l'investissement conduit à une reconstitution de la demande d'énergie. Celle-ci retourne donc à son état stationnaire initial dans l'économie déflatée. Il convient toutefois de noter que le contenu énergétique de la croissance augmente relativement suite à une baisse du stock de capital physique, comme le montre la figure 7.6 qui reporte la dynamique de transition de l'intensité énergétique (E/PIB) et de la part de la

FIG. 7.4 – Écart relatif au compte central (Énergie)

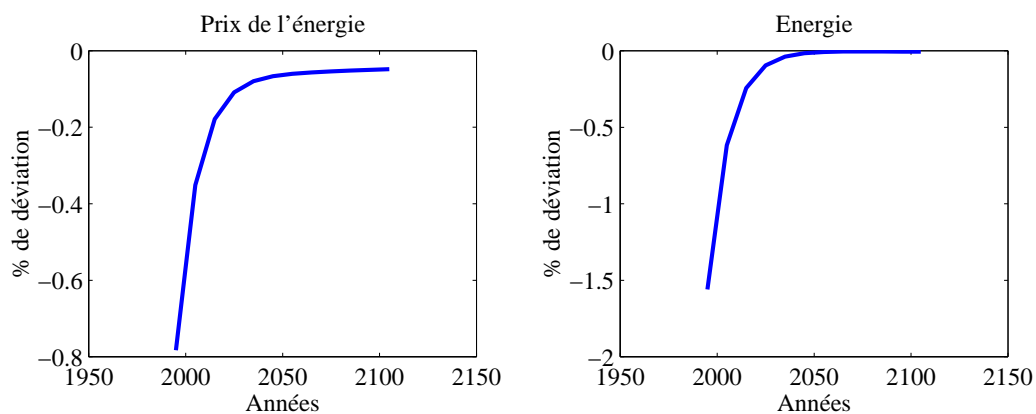
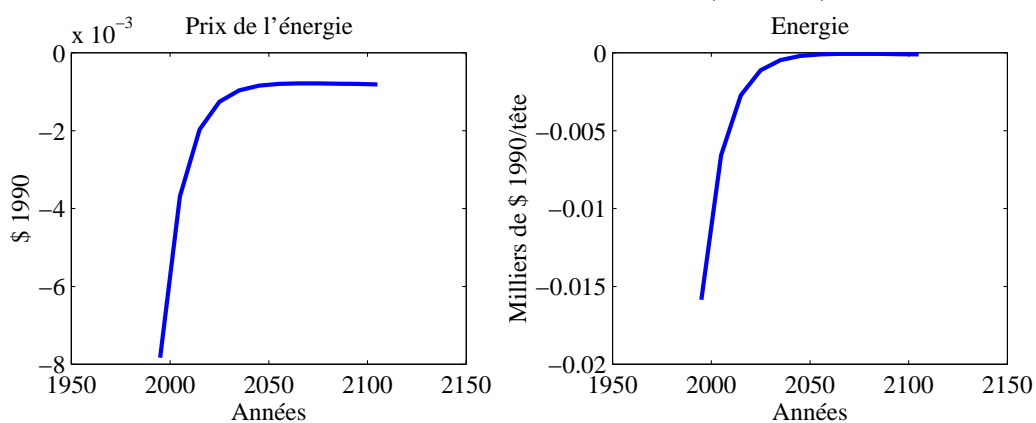
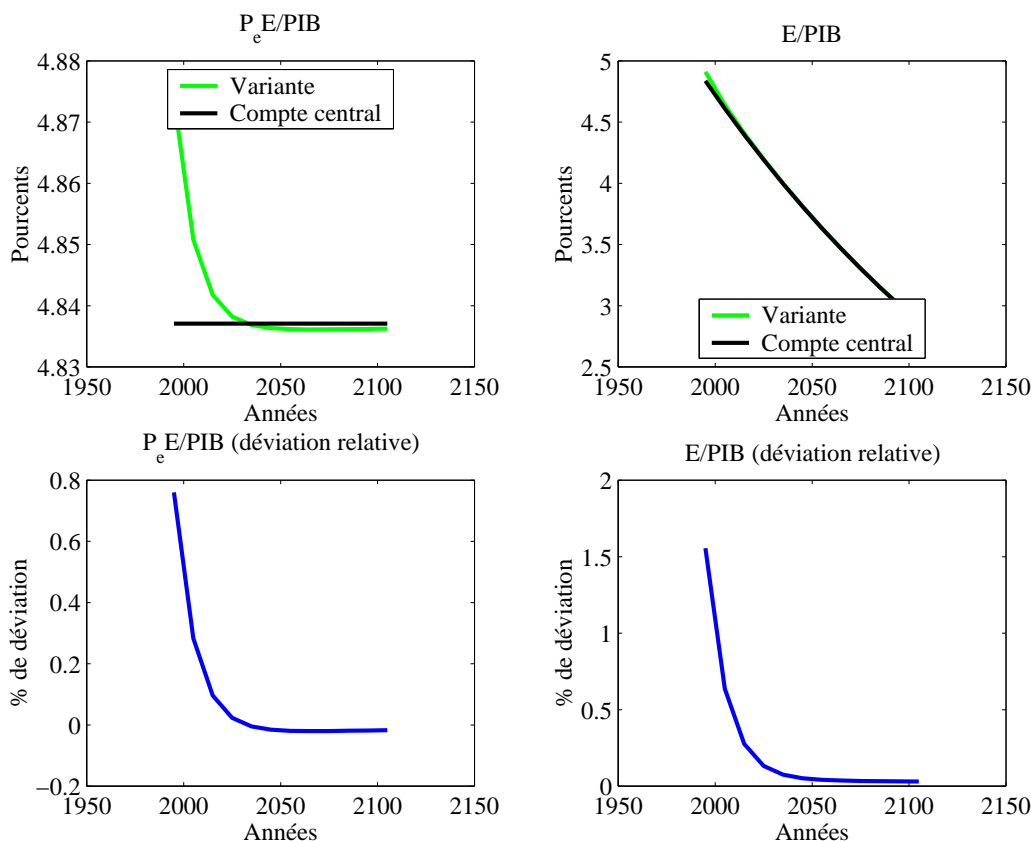


FIG. 7.5 – Écart au compte central (Énergie)



dépense d'énergie dans la valeur ajoutée ($P_E E/PIB$) suite à une baisse initial du stock de capital physique. En effet, si l'énergie diminue effectivement

FIG. 7.6 – Energie/PIB (déviatiion absolue)

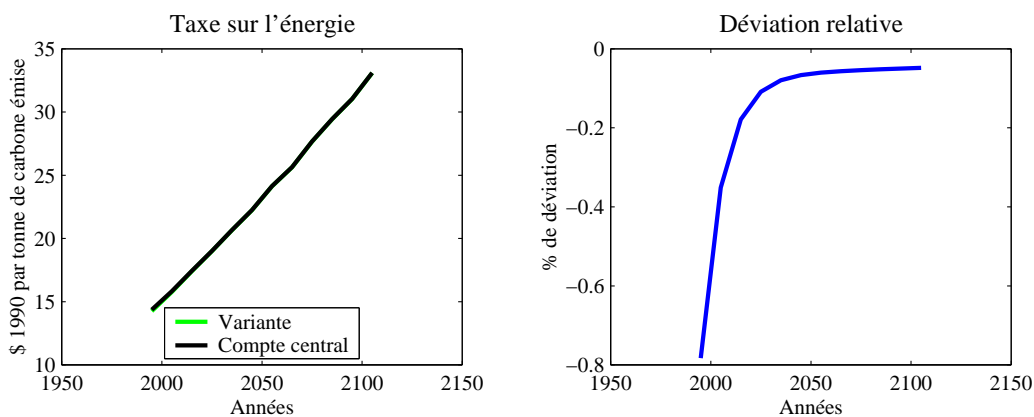


en niveau suite à la baisse effective de la demande de bien intermédiaire, l'intensité énergétique s'élève. La baisse de l'énergie est moins prononcée que la baisse du PIB. Ce résultat est lié à un mécanisme de substitution entre les facteurs dans la production de bien final. En effet, la baisse du capital est plus importante que la baisse de la production, traduisant ainsi que si la production de bien final diminue, elle réagit moins que le stock de capital, les entrepreneurs substituant partiellement du bien intermédiaire au capital. Ainsi la baisse de la demande de bien intermédiaire, et en particulier de l'énergie, est moins prononcée que la baisse du capital physique et de la production. En d'autres termes, l'intensité énergétique s'élève initialement de 1.5% (voir le quadrant sud-est de la figure 7.6) pour atteindre 4.95%. Ce phénomène se retrouve alors dans la part de la valeur ajoutée allouée à l'énergie, qui s'élève

instantanément de 0.75% pour se porter à 4.875% de la valeur ajoutée. Il doit être clair que la moindre augmentation de cette part relativement à l'intensité énergétique révèle la baisse relative du prix de l'énergie. Au fur et à mesure que l'économie rejoint un sentier de croissance équilibrée la part de l'énergie dans la valeur ajoutée (P_{EE}/PIB) rejoint son niveau stationnaire. En revanche, l'intensité énergétique décroît, conformément aux faits, dans la mesure où l'énergie croît moins vite que la valeur ajoutée dans le modèle.

La dynamique de l'énergie a une implication directe, quoique limitée suite à une baisse du stock de capital physique, sur la taxe sur l'énergie. La figure 7.7 reporte ainsi la dynamique de transition du niveau, exprimé en dollar 1990, de la taxe payée par tonne de carbone émise. Comme le long d'un sentier

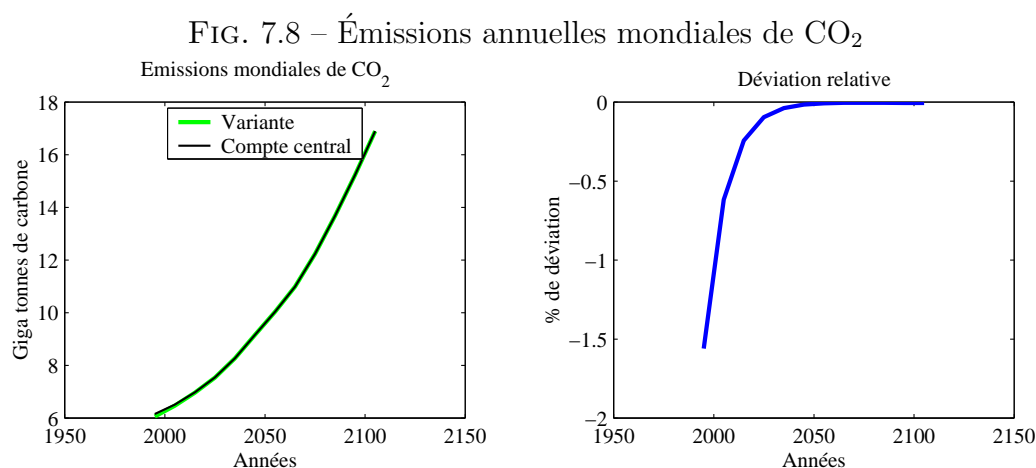
FIG. 7.7 – Taxe sur l'énergie



de croissance équilibrée la taxe sur l'énergie s'accroît après une diminution du stock de capital. La taxe sur l'énergie n'est en fait que marginalement affectée par la baisse du capital physique initial. En effet, comme le montre le panneau droit de la figure, la taxe ne diminue instantanément que de 0.8% et rejoint son nouveau niveau de long terme en 50 ans, plus bas de moins de 0.1% que son niveau dans l'économie non perturbée. La faiblesse de cet effet est en fait liée au fait que (i) le taux de taxe, exogène dans cette expérience, sur l'énergie demeure inchangé, et (ii) à la relative faiblesse de l'impact d'une variation du stock de capital sur à la fois le prix de l'énergie et l'utilisation de l'énergie. La faiblesse de cet effet se retrouve d'ailleurs dans les conséquences sur l'environnement d'une diminution du stock de capital initial, que nous examinons maintenant.

Les figures 7.8 à 7.11 reportent les conséquences sur, respectivement, les émissions mondiales de CO₂, le rapport CO₂/PIB, la concentration atmosphérique de CO₂ et la température atmosphérique de la baisse du capital physique en 1995. Il convient de noter que la modélisation du bloc environnement est déconnectée du reste du modèle économique. Ses propriétés dynamiques ne sont donc pas affectée par les hypothèses faites sur la modélisation de la croissance. En revanche, ce bloc est nourri par le PIB et l'énergie générés par le modèle.

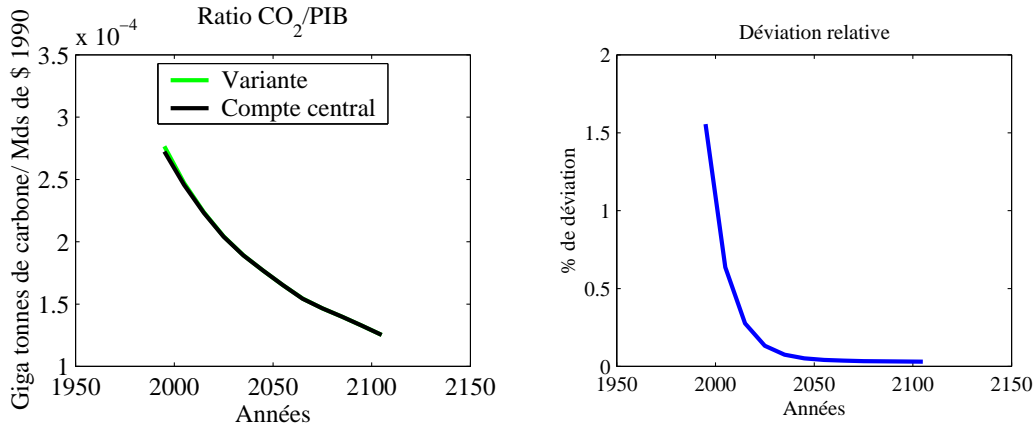
Comme le montre la figure 7.8, la diminution du stock de capital de la zone industrialisée exerce un effet limité sur les émissions mondiales de CO₂, qui reflètent essentiellement la diminution de l'utilisation de l'énergie dans la zone industrialisée. Ainsi, instantanément, les émissions mondiales diminuent



de 1.5%, mais rejoignent rapidement (à l'horizon de 2050) leur sentier de croissance équilibrée. Nous retrouvons ainsi essentiellement la dynamique de l'énergie.¹ En revanche, le ratio CO₂/PIB s'élève de 1.5%. En d'autres termes, une baisse du stock de capital entraîne, toutes choses égales par ailleurs, une émission de CO₂ plus importante par unité produite. En effet, la diminution du PIB mondial est plus importante que la baisse des émissions mondiales de CO₂. Nous retrouvons ainsi un phénomène proche de celui constaté lors de l'examen de la dynamique de l'intensité énergétique, dans la mesure où le

¹Ceci ne doit en aucune façon surprendre le lecteur dans la mesure où les émissions de CO₂ sont essentiellement proportionnelles à l'énergie : $CO_2 = \Psi_t E_t$ où Ψ_t est une séquence exogène.

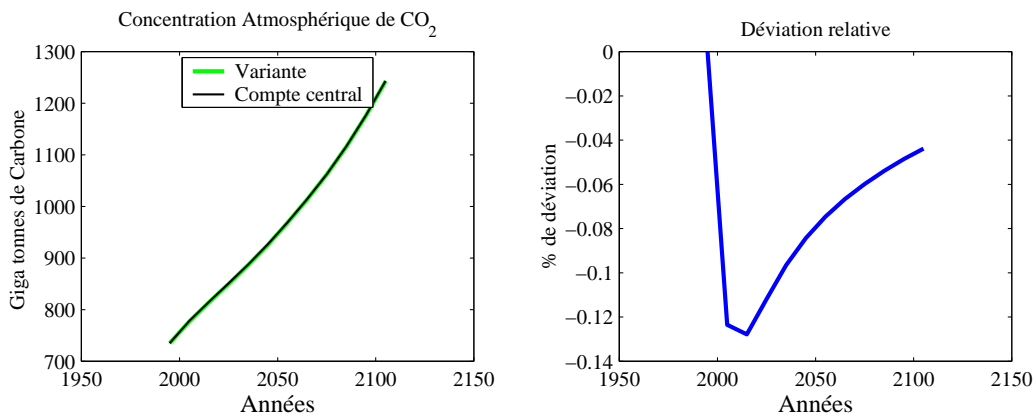
FIG. 7.9 – Ratio CO_2/PIB



rapport CO_2/PIB résulte directement de l'intensité énergétique.

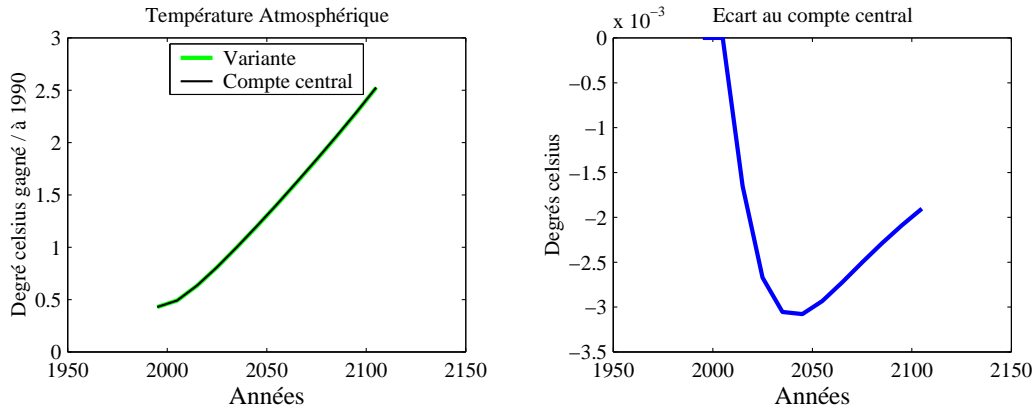
L'évolution des émissions mondiales de CO_2 exerce un effet direct sur la concentration atmosphérique de CO_2 . Cependant, cet effet est relativement marginal dans la mesure où l'effet maximal obtenu est une diminution de 0.125% de cette concentration vers 2015. Ceci n'est en fait que très peu

FIG. 7.10 – Concentration atmosphérique de CO_2



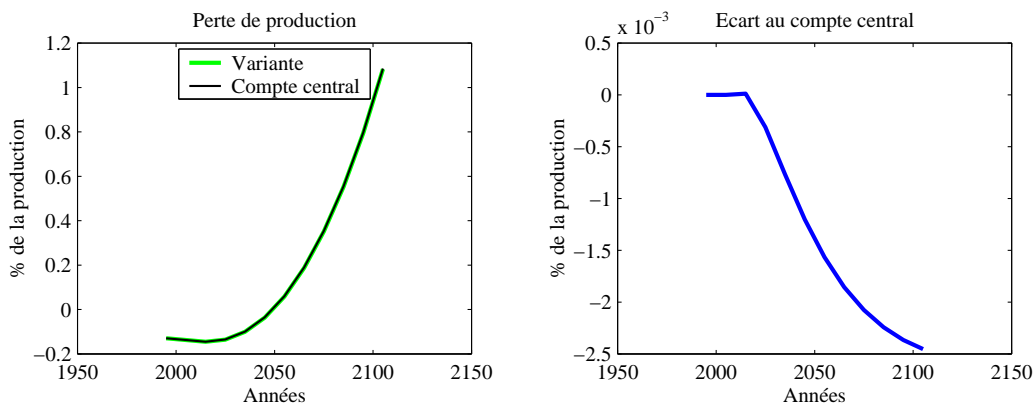
surprenant étant donné l'inertie du système climatique, une variation des émissions n'exerce qu'un effet à la fois retardé et faible sur la concentration atmosphérique, le système climatique absorbant partiellement les émissions. La faiblesse de cet effet se retrouve sur l'évolution de la température, reportée à la figure 7.11. Étant donnée l'inertie du bloc température du système climatique, l'augmentation de température relativement à 1990 n'est que très

FIG. 7.11 – Température atmosphérique



marginale affectée par la modification du stock de capital initial. L'effet maximal sur la température n'est atteint qu'autour de l'année 2050 et n'atteint que 0.03° celsius. Ce gain en termes de température entraîne, toutes choses égales par ailleurs, une diminution de la perte de production liée à l'augmentation de température (effet Ω de Nordhaus), comme le montre la figure 7.12. Cependant, cet effet est très marginal dans la mesure où l'effet sur la température est lui-même très faible.

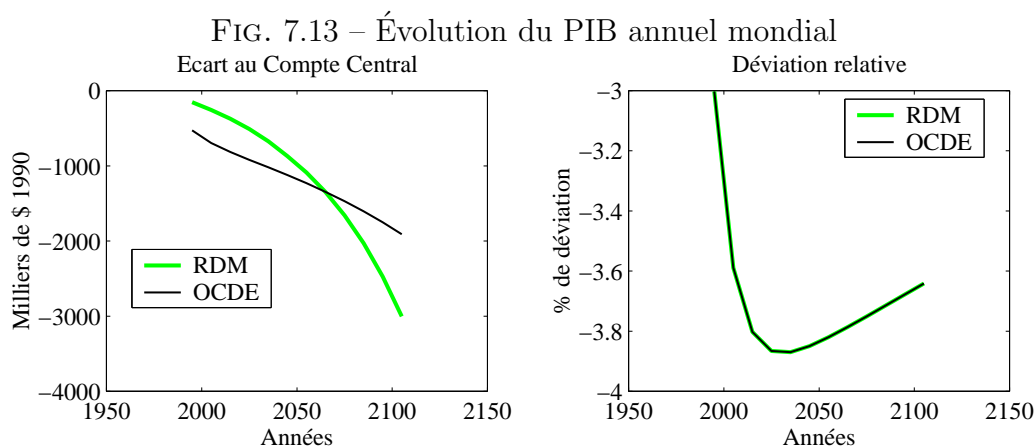
FIG. 7.12 – Perte de production induite par la température



7.2 Dynamique de transition : Augmentation de la “profondeur des puits”

Cette section propose une analyse du comportement dynamique de l'économie lorsque la “profondeur des puits” à la date initiale, Z_0 , est artificiellement multipliée par 4 relativement à son sentier de croissance équilibrée dès 1995. Comme précédemment, les figures 7.15 à 7.19 reportent les dynamiques d'ajustement des grands agrégats macroéconomiques traditionnels tandis que les figures 7.23 à 7.26 proposent une analyse des implications sur l'environnement d'une telle perturbation.

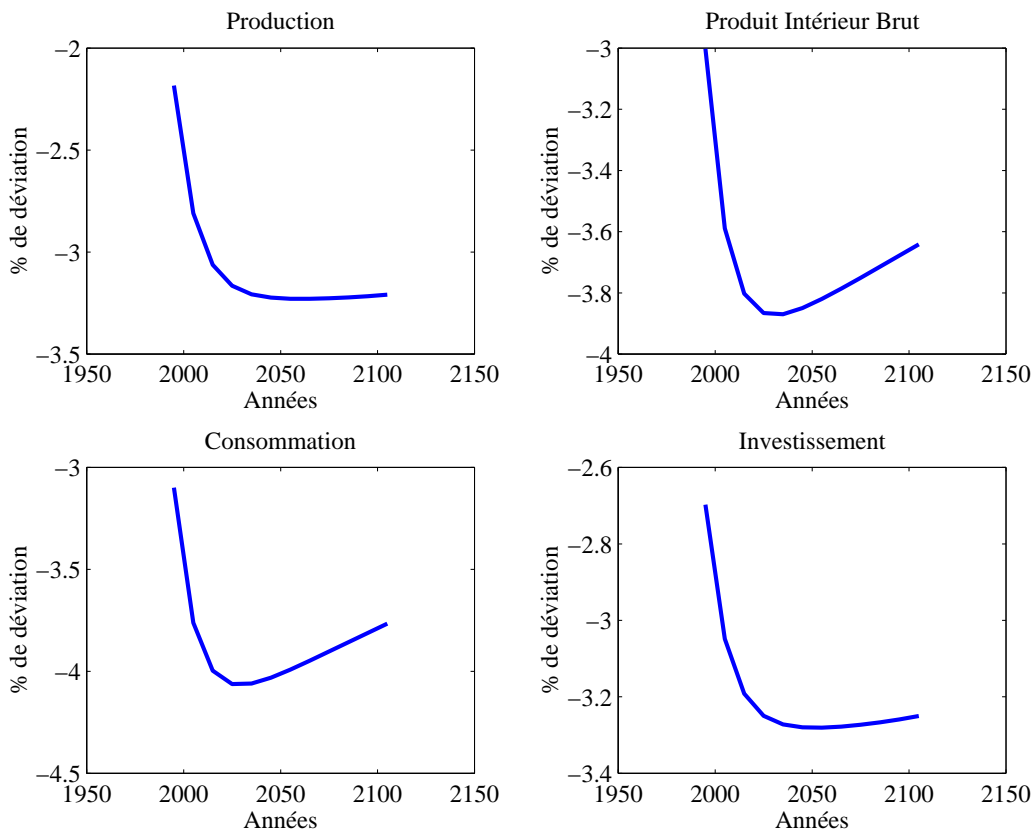
Par construction de la perturbation, le PIB par tête de l'économie diminue instantanément de 3%, soit une perte de 600 dollars par tête comme l'indique la figure 7.14. Cette baisse du produit se retrouve, comme précédemment, au niveau mondial (voir figure 7.13). Ainsi, comme dans le cas d'une baisse du stock de capital, le PIB de l'OCDE chute de 550 milliers de dollars 1990 et le PIB du reste du monde chute de 150 milliers de dollars à la date initiale. La baisse du produit par tête dans l'OCDE résulte directement de l'impact



de l'augmentation de la “profondeur des puits” sur l'équilibre sur le marché de l'énergie. L'accroissement de la “profondeur des puits” accroît le coût d'extraction d'une unité d'énergie supplémentaire — *i.e.* le coût marginal d'extraction s'élève. Ceci correspond à un déplacement vers la gauche de la courbe d'offre d'énergie, nécessitant, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du prix de l'énergie pour rétablir l'équilibre sur le marché.

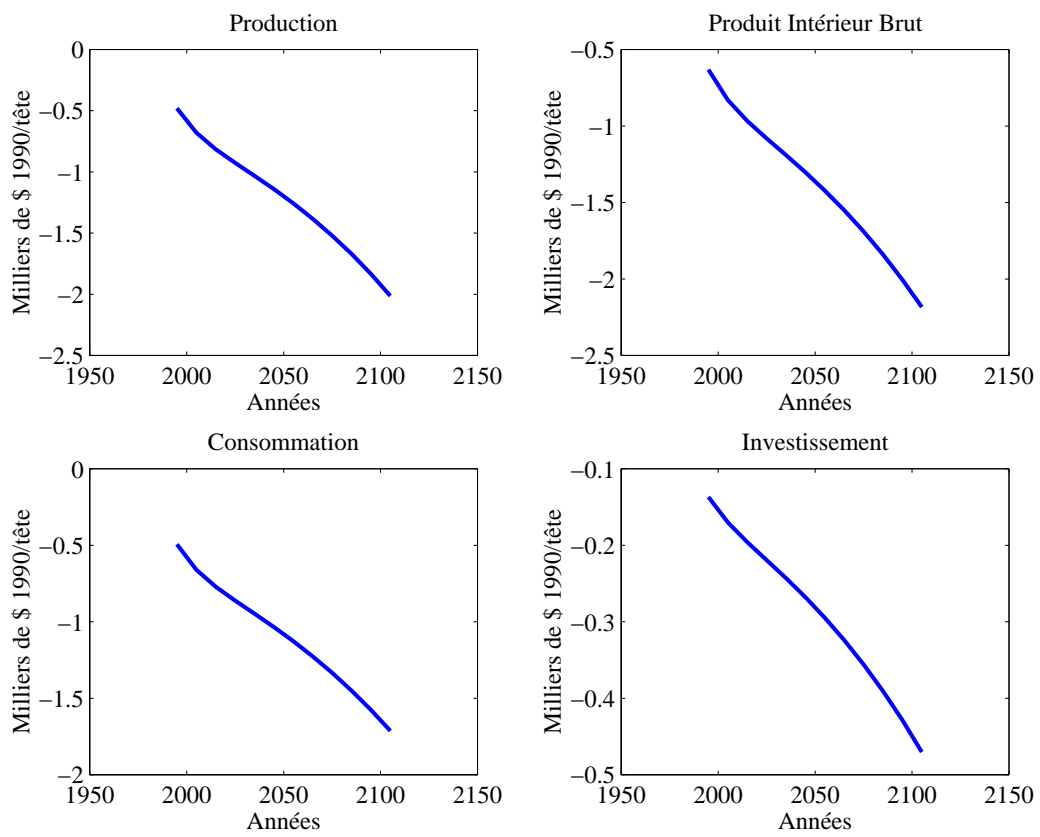
Ainsi, comme le montre la figure 7.17, le prix de l'énergie s'élève instantanément de 67%. Ainsi, la consommation d'énergie à l'équilibre diminue de 30.5% dès 1995, soit une baisse de 300 dollars 1990 par tête (voir figure 7.16). Cette baisse de l'énergie à l'équilibre correspond à une baisse de la production du bien intermédiaire de type 1 (X_1). Ainsi, le bien intermédiaire, Y , est produit en moindre quantité, ce qui exerce, toutes choses égales par ailleurs, un effet dépressif sur la production de bien final. En d'autres termes, une augmentation de la "profondeur des puits" s'apparente à un choc d'offre négatif sur la production de bien final de 2.2%, soit 500 dollars.

FIG. 7.14 – Écart relatif au compte central (Le marché des biens)



La chute de la production exerce un effet revenu négatif sur la consommation et l'épargne des ménage. Ainsi, la consommation diminue instantanément de 3.1%, soit une baisse de 500 dollars par tête, tandis que l'investissement baisse de 2.7%, représentant ainsi une perte de 125 dollars par tête relativement au compte central. La baisse de la consommation et de l'invest-

FIG. 7.15 – Écart au compte central (Le marché des biens)



tissement se prolonge au delà de l'année 2025, où elle atteint respectivement 4.1% (1700 dollars) et 3.3% (475 dollars). La persistance de cette chute des agrégats macroéconomique se comprend à la lumière de la dynamique de l'énergie, reportée aux figures 7.16 à 7.18.

FIG. 7.16 – Écart relatif au compte central (Énergie)

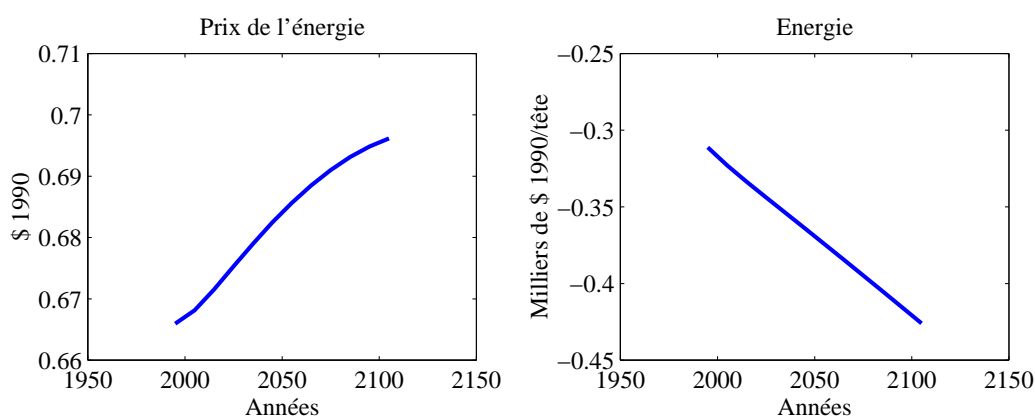
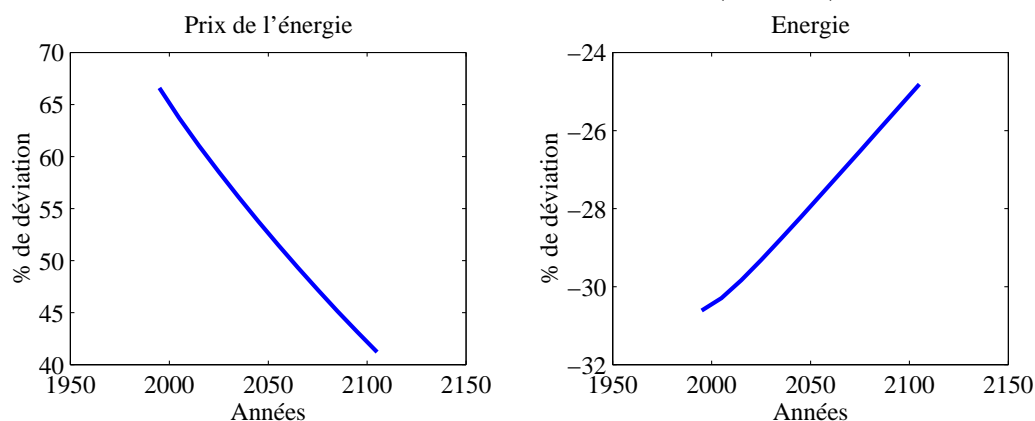


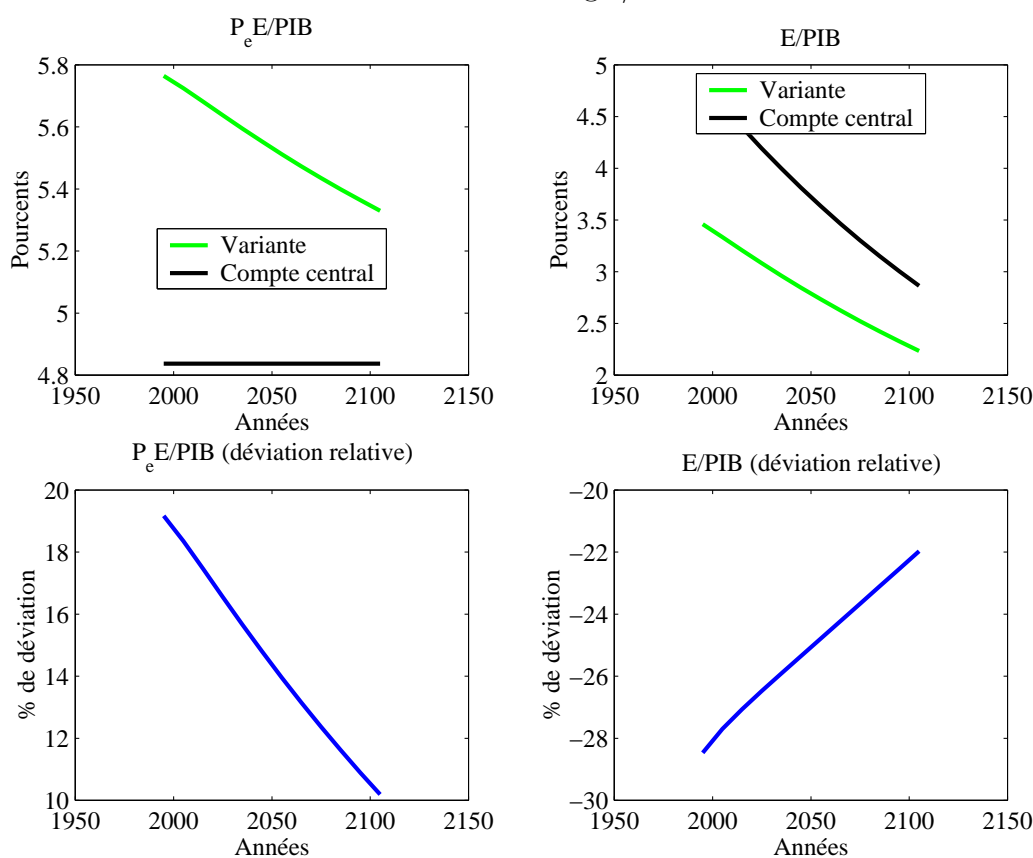
FIG. 7.17 – Écart au compte central (Énergie)



Instantanément, comme mentionné précédemment, la consommation d'énergie de 30.5% diminue en raison de la hausse de son prix (67%). Il importe de noter que la hausse du prix de l'énergie est telle que la part de la valeur ajoutée allouée à la consommation d'énergie ($P_E E / PIB$) s'élève de 19% pour atteindre 5.8% contre 4.83% au compte central. Une conséquence directe de la montée massive des prix de l'énergie est la forte hausse de la

taxe sur l'énergie exprimée en dollar (rappelons que le taux de taxe demeure constant) qui s'élève de 67% instantanément pour atteindre 24 dollars par tonne de carbone émise (voir figure 7.19). En revanche l'intensité énergétique (E/PIB) diminue de 28%, pour atteindre 3.5% contre 4.8% dans l'économie non perturbée, dans la mesure où la chute massive de la consommation d'énergie fait plus que compenser la baisse concomitante du produit. La chute de la consommation d'énergie permet de limiter l'augmentation de

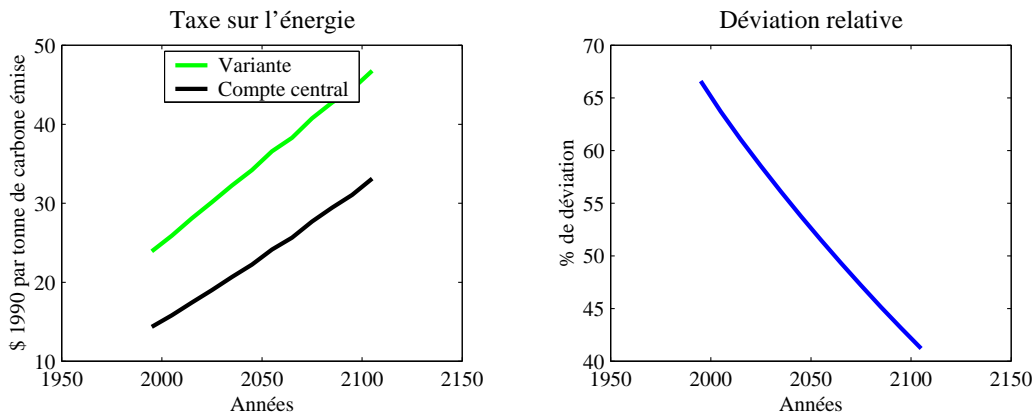
FIG. 7.18 – Energie/PIB



la “profondeur des puits”. Cependant, la forte augmentation initiale de la “profondeur des puits” nécessaire pour engendrer une récession de 3% (rappelons que z a été multiplié par 4) implique que la baisse de la consommation d'énergie à la première période, malgré son ampleur, ne permet pas de ramener l'économie rapidement sur un sentier de croissance équilibrée. Le prix de l'énergie demeure donc supérieur à son niveau de long terme de façon per-

sistante. Ainsi, en 2105 il demeure 40% plus élevé que dans l'économie sans choc. En conséquence, la taxe sur l'énergie se maintient à un niveau de 40% supérieur au niveau de compte central en 2105, soit une taxe de 48 dollars par tonne de carbone émise (rappelons que la taxe s'élevait à 24 dollars en 1995). Le niveau du prix de l'énergie implique que l'énergie demeure 25% en deçà de son niveau dans l'économie non perturbée, de sorte que 5.3% de la valeur ajoutée sont encore consacrés aux dépenses en énergie. L'effet amplificateur de l'extraction sur le prix de l'énergie, et ainsi l'effet dépressif sur la consommation d'énergie, persiste. En d'autres termes, l'offre de bien intermédiaire, et l'offre de bien final, demeure sous son niveau de compte central. Aussi, l'effet de revenu négatif ainsi créé maintient la consommation et l'investissement sous leur niveau de compte central en 2105 (respectivement une perte de 1700 et 480 dollars).

FIG. 7.19 – Taxe sur l'énergie



Il importe de noter que la hausse du prix de l'énergie, et plus généralement de la valeur de la consommation d'énergie ($P_E E$) conduit à une élévation des profits du secteur 1 dans l'économie perturbée². La valeur d'un brevet dans la recherche développant des biens intensif en énergie étant déterminée par la somme actualisée des profits engendrés dans le secteur 1, cette valeur s'élève

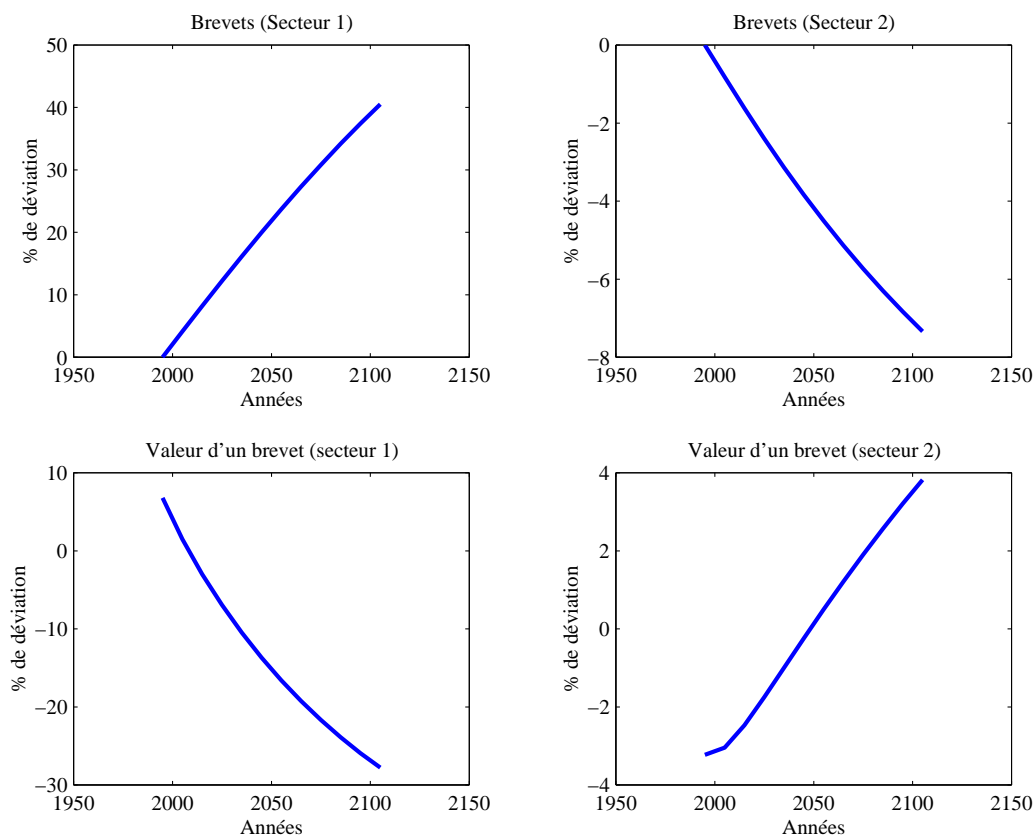
²En effet, les profits dans le secteur 1 sont donnés par

$$\Pi_{1t} = \frac{P_{1t} X_{1t}}{\sigma_1 N_{1t}} = \frac{P_{Et} E_t}{\sigma_1 N_{1t}}$$

dès lors la hausse de la dépense énergétique conduit, toutes choses égales par ailleurs, à une élévation des profits dans le secteur.

de 8% comme le montre la figure 7.20.

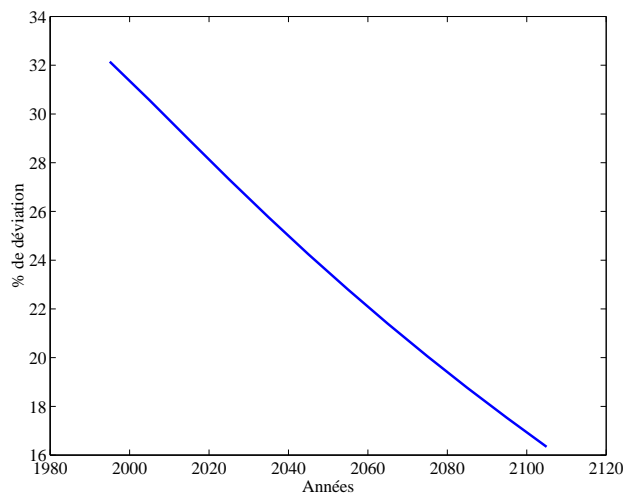
FIG. 7.20 – R&D (déviatiion relative)



Il devient donc plus profitable d'allouer les ressources en faveur de la recherche développant des brevets dans le secteur 1. Ainsi, comme le montre la figure 7.21, la part des chercheurs allouée au secteur 1, μ_t , s'élève de 32%. Le nombre de brevets développés dans le secteur 1 s'accroît donc. Dès lors, les profits individuels diminuent dans le secteur 1, et la valeur d'un brevet tend à diminuer. Moins de ressources sont allouées à la recherche dans le secteur 1 (μ_t diminue) et rejoint son état stationnaire à long terme. En revanche de plus en plus de brevets sont développés (par effet d'accumulation). Le nombre de brevet développés dans le secteur 1 est alors 40% supérieur à celui de l'économie non perturbée en 2105.

Les figures 7.22 à 7.25 proposent une évaluation quantitative des conséquences de l'augmentation de la "profondeur des puits" d'extraction en 1995 sur

FIG. 7.21 – Allocation des chercheurs (déviation relative)



les principales variables environnementales du modèle (respectivement, les émissions mondiales de CO₂, le rapport CO₂/PIB, la concentration atmosphérique de CO₂ et la température atmosphérique). La diminution des émissions de CO₂ se retrouve directement dans la concentration de CO₂ dans l’atmosphère. Il convient de noter que la modélisation du bloc environnement est déconnectée du reste du modèle économique. Ses propriétés dynamiques ne sont donc pas affectée par les hypothèses faites sur la modélisation de la croissance. En revanche, ce bloc est nourri par le PIB et l’énergie générés par le modèle.

La figure 7.22 illustre l’importance de l’augmentation de la “profondeur des puits” dans la zone industrialisée sur les émissions mondiales de CO₂. Ceci résulte essentiellement de la diminution de l’utilisation de l’énergie dans la zone industrialisée. Instantanément, les émissions mondiales diminuent de 31% soit une baisse de 2 giga tonnes de carbones émises par an, et se maintiennent de façon persistante sous leur niveau de l’économie non perturbée. Plus précisément, les émissions mondiales de CO₂ sont encore 25% moins importantes que dans l’économie non perturbée en 2105. Là encore, nous retrouvons essentiellement la dynamique de l’énergie. De la même façon, le ratio CO₂/PIB diminue instantanément de façon drastique, 28%, comme le montre la figure 7.23). En effet, la diminution du PIB mondial est plus importante que la baisse des émissions mondiales de CO₂. Nous retrouvons ainsi un phénomène proche de celui constaté lors de l’examen de la dynamique de l’intensité énergétique, dans la mesure où le rapport CO₂/PIB résulte

FIG. 7.22 – Émissions annuelles mondiales de CO₂

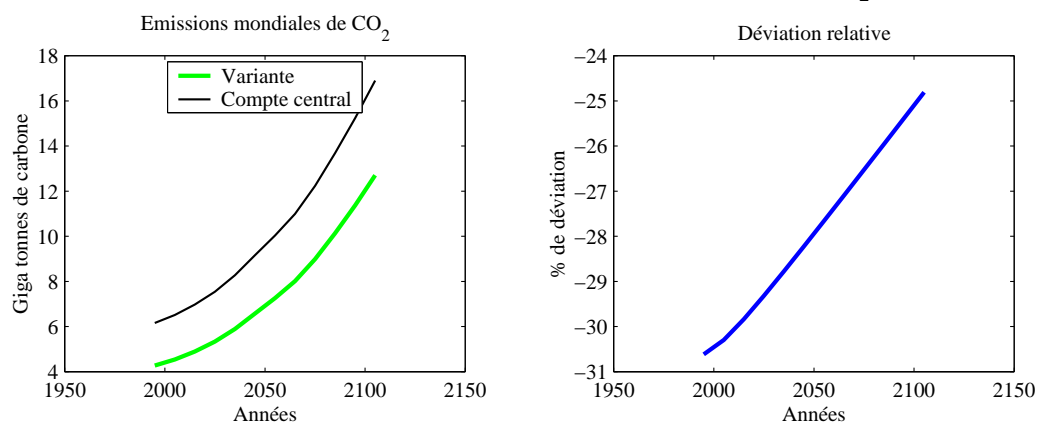
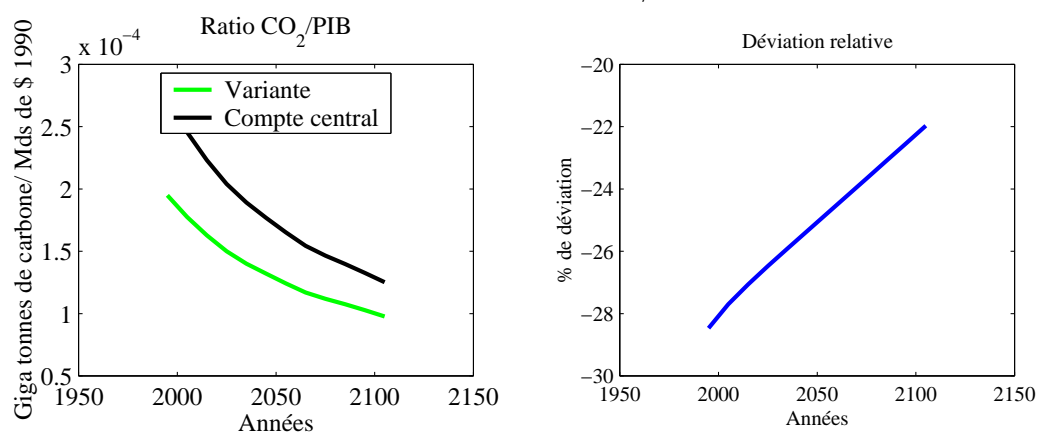


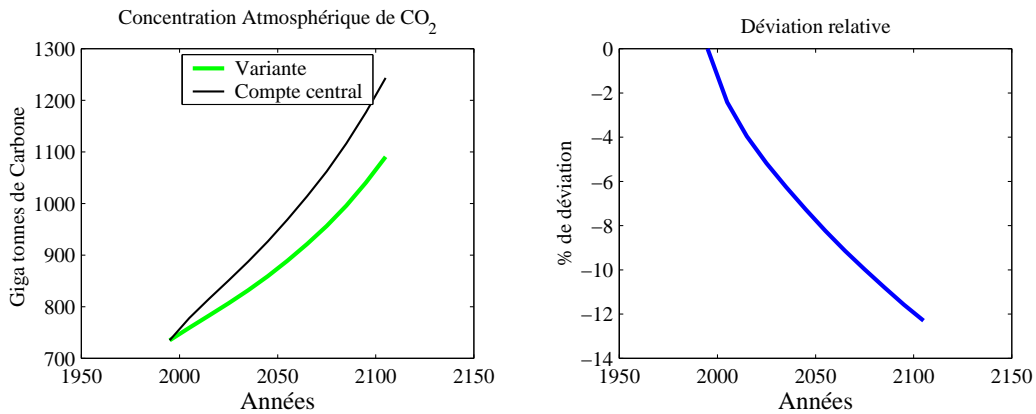
FIG. 7.23 – Ratio CO₂/PIB



directement de l'intensité énergétique.

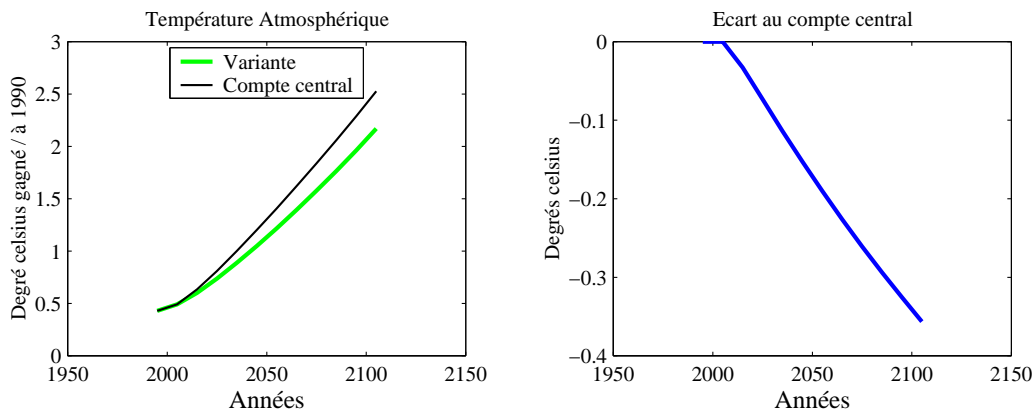
La concentration atmosphérique de CO₂ étant directement reliée à l'évolution des émissions mondiales, celle-ci diminue. Contrairement à ce qu'engendre une diminution du stock de capital (compatible avec une récession de 3%), l'effet de la hausse de la "profondeur des puits" n'est pas marginale. Ainsi à l'horizon de 2050, la concentration de CO₂ est plus faible de 8% relativement au compte central. Cette baisse de la concentration atmosphérique de CO₂ atteint 12% en 2105. Cette ampleur de l'effet de la "profondeur des

FIG. 7.24 – Concentration atmosphérique de CO₂



puits" d'extraction sur la concentration atmosphérique se retrouve, de façon non surprenante, sur l'évolution de la température (voir figure 7.25). Ainsi, à

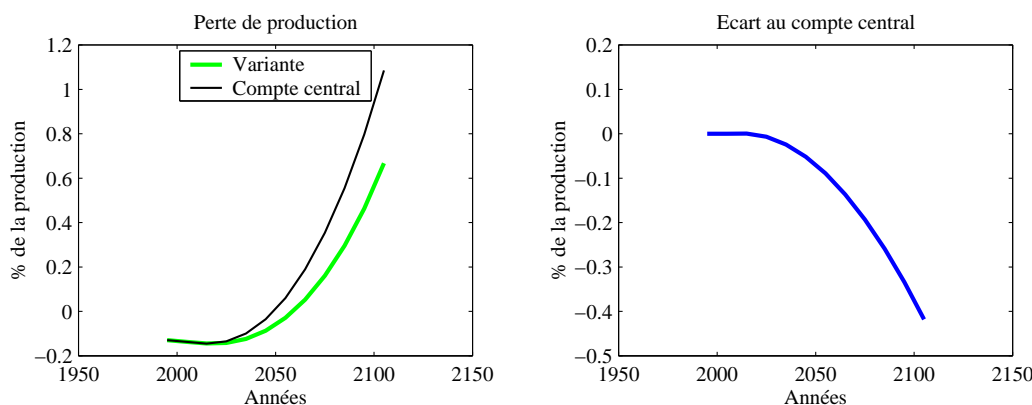
FIG. 7.25 – Température atmosphérique



l'horizon de 2105, la température atmosphérique dans l'économie perturbée

est inférieure de 0.35° Celsius relativement à l'économie non perturbée. Plus particulièrement, le modèle engendre, à cette même période, une élévation de la température relativement à 1990 de 2.15° Celsius contre 2.5° Celsius dans le modèle non perturbé. Ce gain en termes de température entraîne, toutes choses égales par ailleurs, une diminution de la perte de production liée à l'augmentation de température (effet Ω de Nordhaus), comme le montre la figure 7.26. En 2105, la perte de production liée à l'élévation de la température n'est plus que de 0.65% contre 1.1% dans le modèle non perturbé.

FIG. 7.26 – Perte de production induite par la température



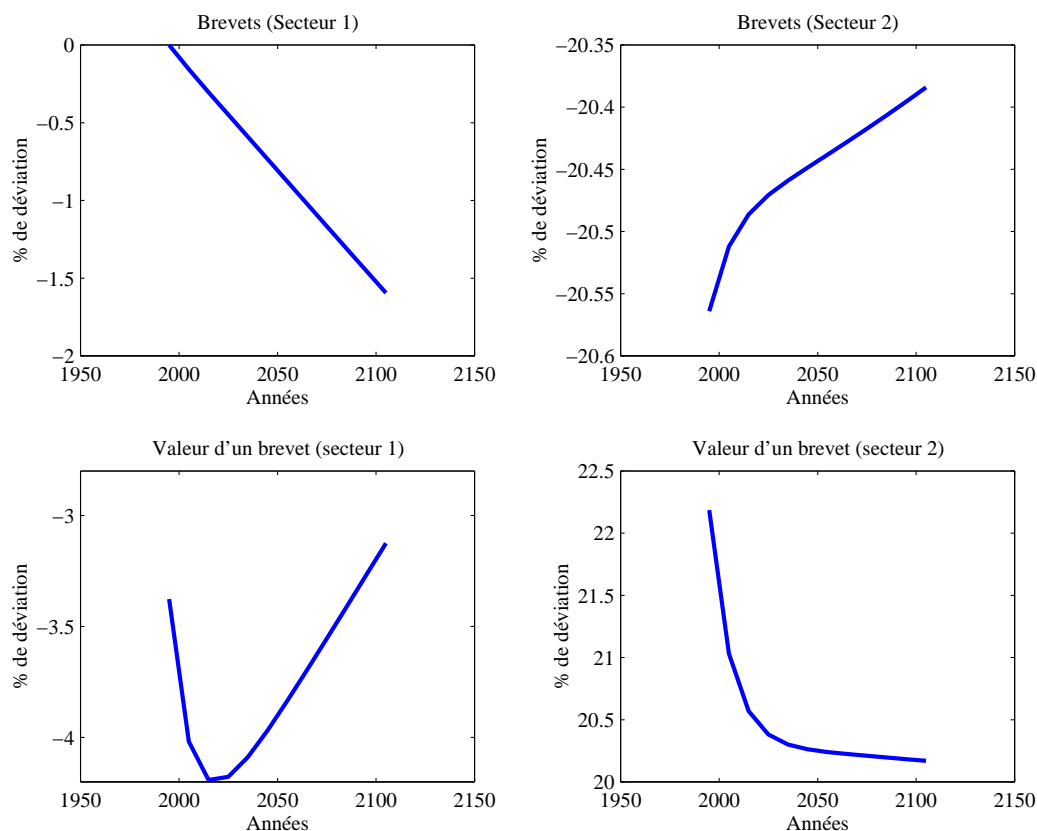
7.3 Choc sur la répartition des brevets

Cette section analyse la dynamique de transition de l'économie lorsque la répartition des brevets à la date initiale, X_0 , est artificiellement diminuée de 4.5% relativement à son sentier de croissance équilibrée dès 1995. Ceci correspond à une diminution instantanée du nombre de brevets de type 2 (intensifs en travail). Les figures 7.27 à 7.31 reportent les dynamiques d'ajustement des grands agrégats macroéconomiques traditionnels tandis que les figures 7.37 à 7.40 proposent une analyse des implications sur l'environnement d'une telle perturbation de l'équilibre.

Comme nous l'avons souligné, la diminution de la variable transformée X correspond à une baisse relative du nombre des brevets de type 2 dans l'économie. Cette diminution atteint instantanément 20.55% relativement à l'économie non perturbée et est encore de 20.4% en 2105. La diminution des

brevets dans le secteur des biens intensifs en travail conduit à une augmentation des profits individuels dans ce secteur dans la mesure où à l'équilibre les profits totaux du secteur sont partagés entre moins d'entreprises.

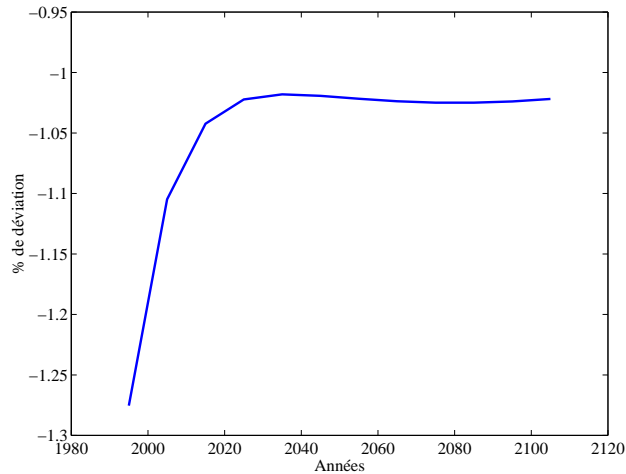
FIG. 7.27 – R&D (déviation relative)



Dès lors, la valeur d'un brevet — donnée par la somme actualisée des profits futurs — s'élève de 22.25%. Il devient alors profitable d'allouer les chercheurs dans ce secteur. En conséquence, comme le montre le graphique 7.28, μ_t , la part des chercheurs allouée au secteur 1 diminue instantanément de 1.27% et demeure inférieure de 1% à celle obtenue dans l'économie non perturbée en 2105. Ceci entraîne alors une diminution du nombre des brevets dans le secteur 1 par rapport au compte central atteignant 1.8% en 2105.

Cette modification du comportement dynamique de la R&D dans les secteurs 1 et 2 entraîne une baisse de la quantité d'énergie utilisée dans l'économie de 2.6% à l'impact. En effet, la diminution relative du nombre de

FIG. 7.28 – Allocation des chercheurs (déviaton relative)



brevets sur le marché des biens intensifs en travail conduit à une raréfaction relative de ces biens. Ainsi toutes choses égales par ailleurs, la production de biens intermédiaires diminue. Ceci entraîne alors, *ceteris paribus*, une baisse de la demande de bien de type 1 — c'est-à-dire d'énergie. L'offre de ce bien devient alors excédentaire, impliquant une baisse du prix de l'énergie. Ainsi, comme le montrent les figures 7.29 et 7.30, la quantité d'énergie utilisée dans l'économie diminue instantanément de 2.65% relativement à l'économie sans choc, soit une baisse annuelle de 27 dollars par tête. Dans le même temps, le prix de l'énergie subit une baisse de 1.45%.

FIG. 7.29 – Écart relatif au compte central (Énergie)

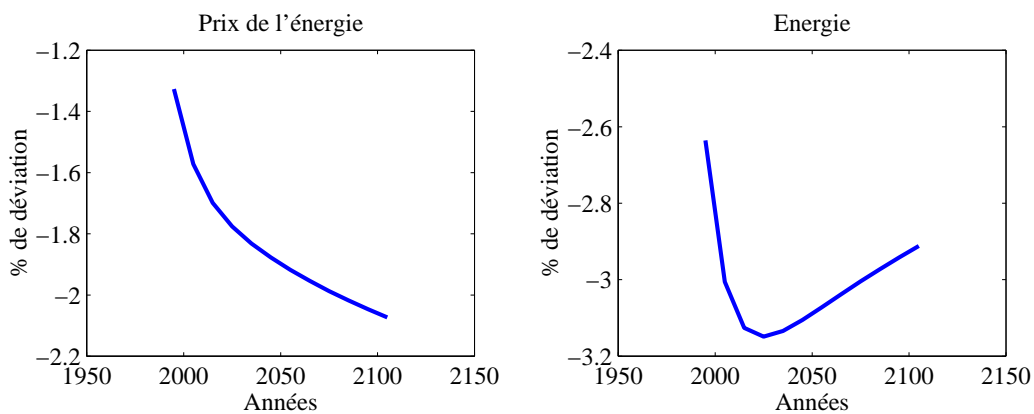
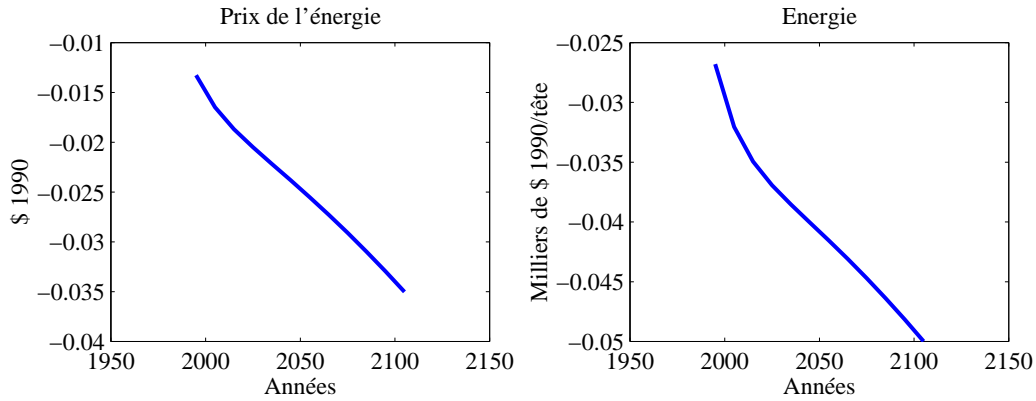


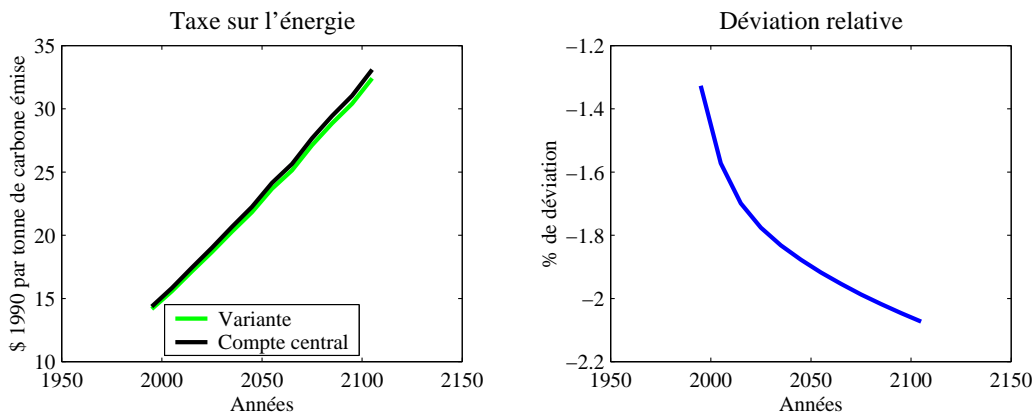
FIG. 7.30 – Écart au compte central (Énergie)



L'écart relatif maximal entre les deux économies (perturbée et non perturbée) est atteint en 2025, l'écart relatif est alors de 3.18%. Il s'établit à 2.9% en 2105 — soit un écart annuel de 50 dollars.

La diminution des prix et des quantités d'énergie consommés conduisent à une diminution relative de la taxe sur l'énergie exprimée en dollar de 1.35% à l'impact. La diminution de la taxe persiste, au moins jusqu'en 2050, pour s'établir à 2%. La baisse du prix de l'énergie et de sa quantité consommée

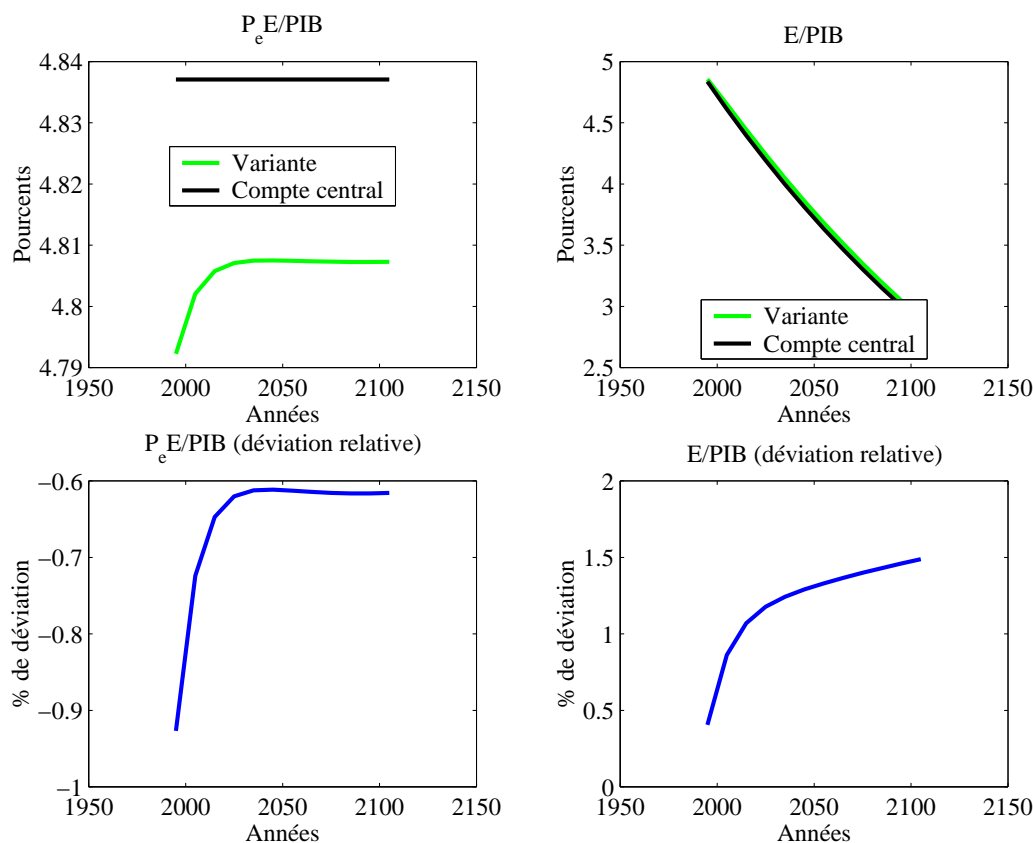
FIG. 7.31 – Taxe sur l'énergie



est telle que la part de la valeur ajoutée allouée à la consommation d'énergie ($P_E E / PIB$) diminue de 0.9% et s'établit à 4.79% contre 4.83% au compte central. En revanche l'intensité énergétique (E / PIB) augmente de 0.5% traduisant ainsi la plus faible réactivité de l'énergie consommée relativement au

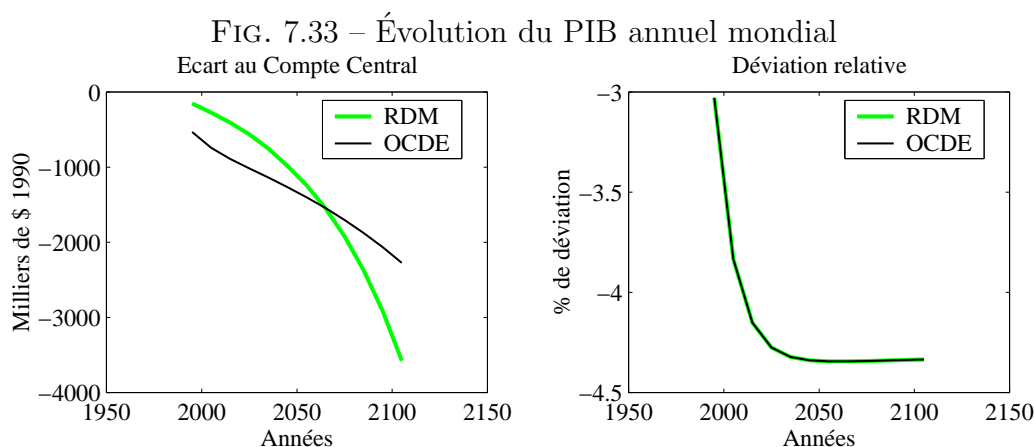
PIB. La chute de la consommation d'énergie permet de limiter la "profon-

FIG. 7.32 – Energie/PIB



deur des puits". Une conséquence directe de ce phénomène est d'entretenir la baisse du prix de l'énergie. Ceci incite alors les entreprises à substituer du bien de type 1 (intensif en énergie) au bien de type 2 (intensif en travail). Ceci limite donc la baisse de la consommation d'énergie. Comme décrit précédemment, la quantité d'énergie consommée augmente à partir de 2025, expliquant ainsi l'augmentation de la part de la dépense énergétique dans la valeur ajoutée dès cette période.

Comme dans les expériences précédentes, la construction de la perturbation engendre une récession de 3%, soit une perte de 600 dollars par tête, qui se retrouve sur l'évolution du PIB mondial (voir figure 7.33). Ainsi, le PIB de l'OCDE chute de 550 milliers de dollars 1990 et le PIB du reste du monde chute de 150 milliers de dollars à la date initiale. La baisse du produit par tête dans la zone résulte directement de la diminution de la production des



biens intermédiaires précédemment décrite. En effet, la baisse de la production du bien intermédiaire Y conduit, toutes choses égales par ailleurs, à une diminution de la production de bien final, s'établissant à 3.05% à l'instant de la perturbation.

Il en résulte une diminution du revenu des agents les incitant à réduire leur consommation d'une part et leur investissement d'autre part. De plus, la diminution de la production de bien intermédiaire, en affectant négativement la productivité marginale du capital, entraîne une diminution du rendement de l'investissement renforçant la chute de ce dernier. Ainsi, au moment de la perturbation — en 1995 — l'investissement chute de 3.65%, soit une baisse annuelle de 200 dollars par tête. En revanche, ceci crée, de façon standard, une incitation à consommer d'avantage qui limite la chute de la consommation à 2.8%, soit 475 dollars par tête. L'écart entre les trajectoires des grands agrégats macroéconomiques dans les économies perturbée et non perturbée s'accroît avec le temps pour atteindre 4.4% en 2105. Ainsi, la perte annuelle de consommation dans l'économie perturbée (relativement au compte central) atteint 2000 dollars par tête en 2105, tandis que l'investissement est plus faible d'un montant de 600 dollars. Cette persistance s'explique essentiellement par la persistance de la baisse de l'énergie qui pèse alors sur le prix de l'énergie, notamment au travers de son effet sur la "profondeur des puits" (voir section précédente).

Les figures 7.36 à 7.39 reportent la réponse des variables d'environnement à une perturbation de la répartition des brevets. Comme précédemment, les émissions de CO_2 suivent la consommation d'énergie. Celles-ci diminuent

FIG. 7.34 – Écart relatif au compte central (Le marché des biens)

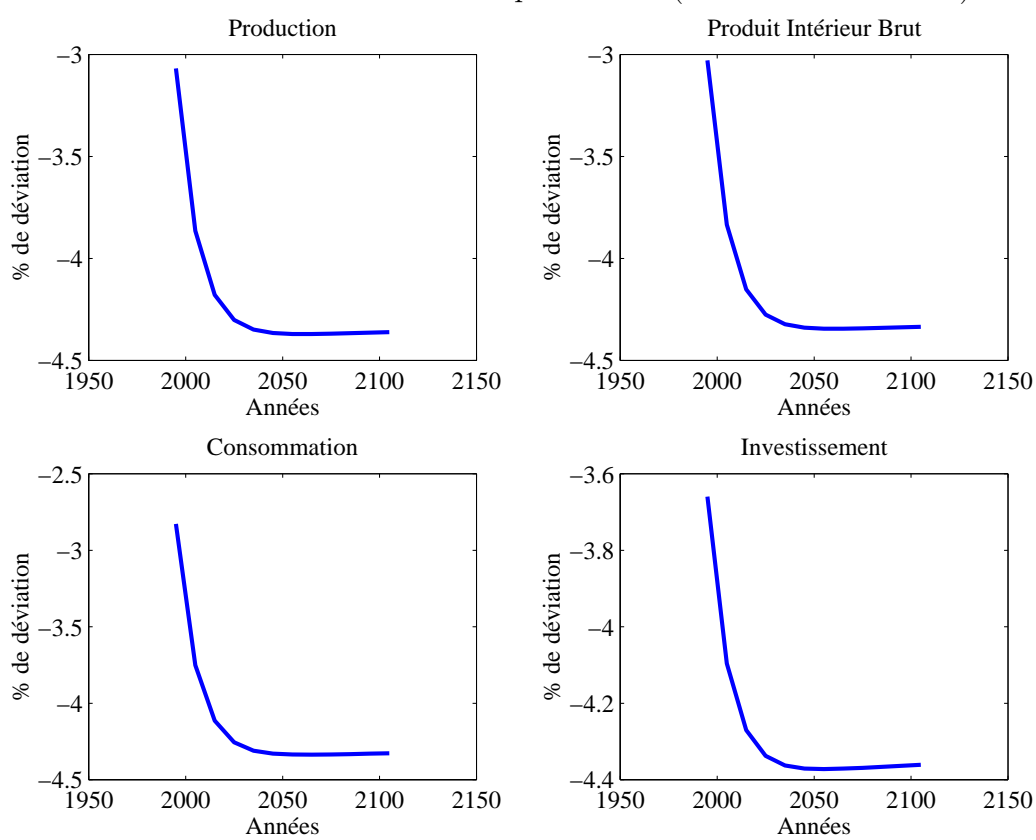
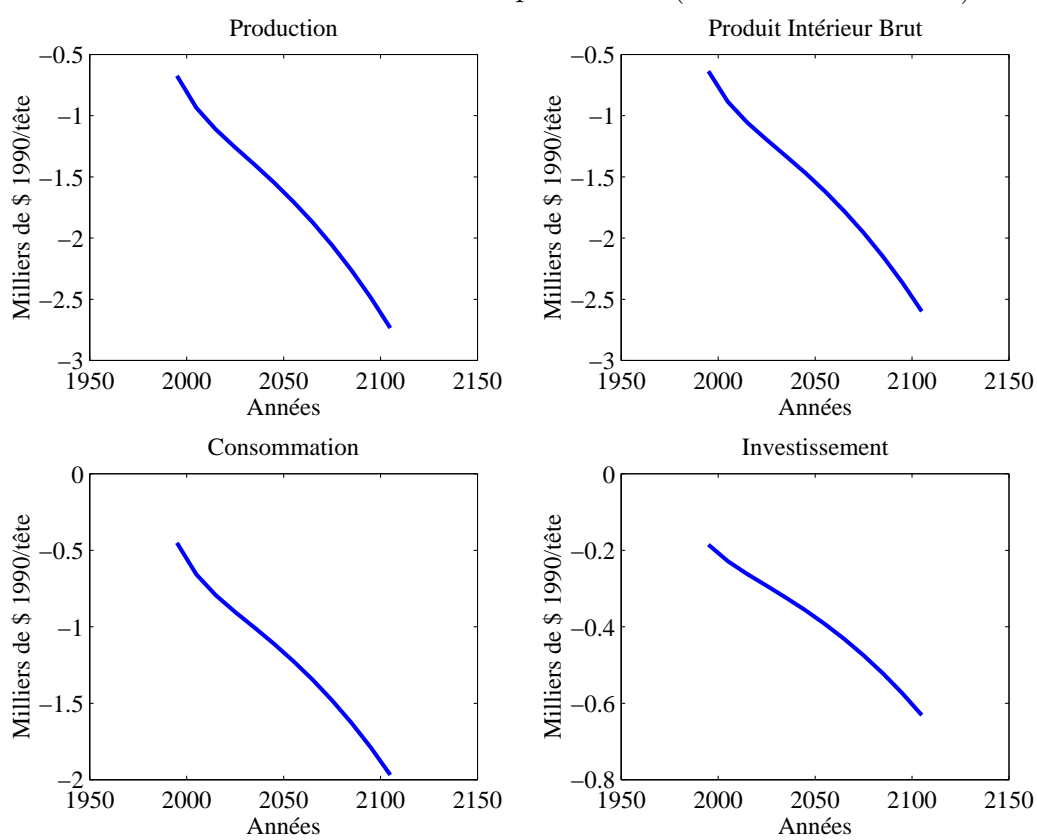
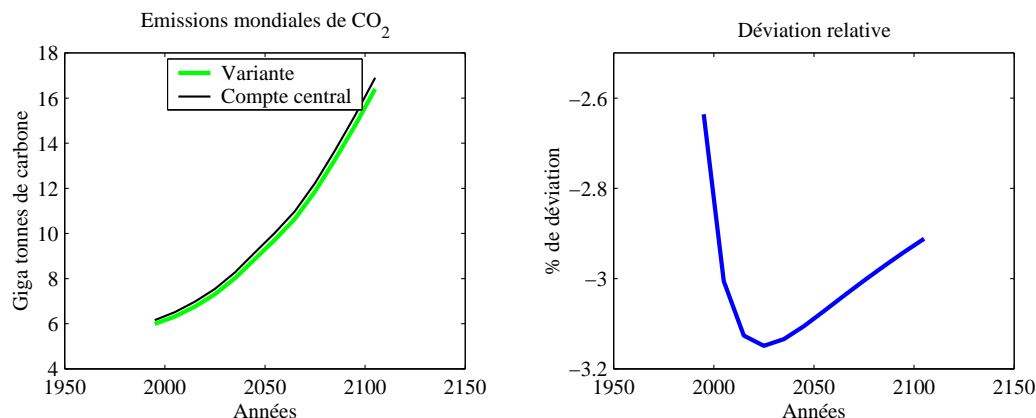


FIG. 7.35 – Écart relatif au compte central (Le marché des biens)



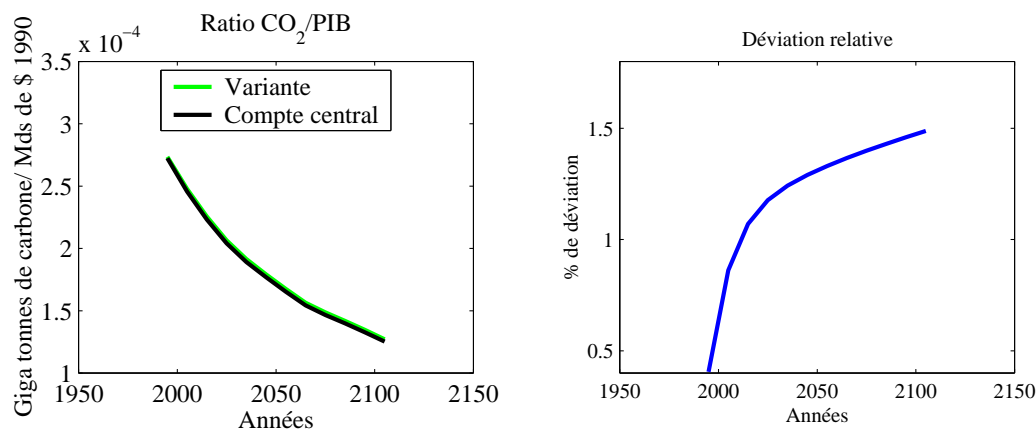
donc de 2.65% à l'impact, et amorcent une reprise dès 2025. De la même

FIG. 7.36 – Émissions annuelles mondiales de CO₂



façon, le ratio CO₂/PIB reflète l'évolution de l'intensité énergétique. Il augmente donc instantanément, l'écart au compte central atteint 1.5% en 2105, comme l'indique la figure 7.37). En effet, la diminution du PIB mondial est

FIG. 7.37 – Ratio CO₂/PIB

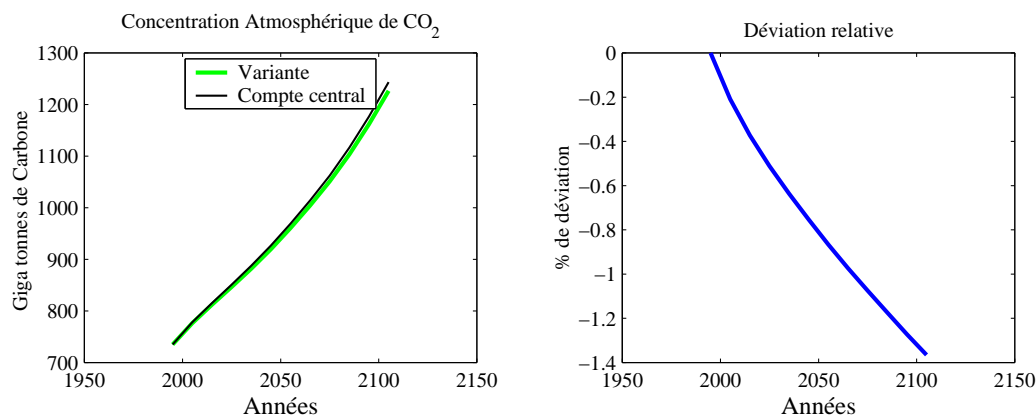


plus importante que la baisse des émissions mondiales de CO₂.

La concentration atmosphérique de CO₂ est directement liée à l'évolution des émissions mondiales, celle-ci diminue donc. Ainsi à l'horizon de 2050, la concentration de CO₂ est plus faible de 0.8% relativement au compte central. Cette baisse de la concentration atmosphérique de CO₂ atteint 1.38% en

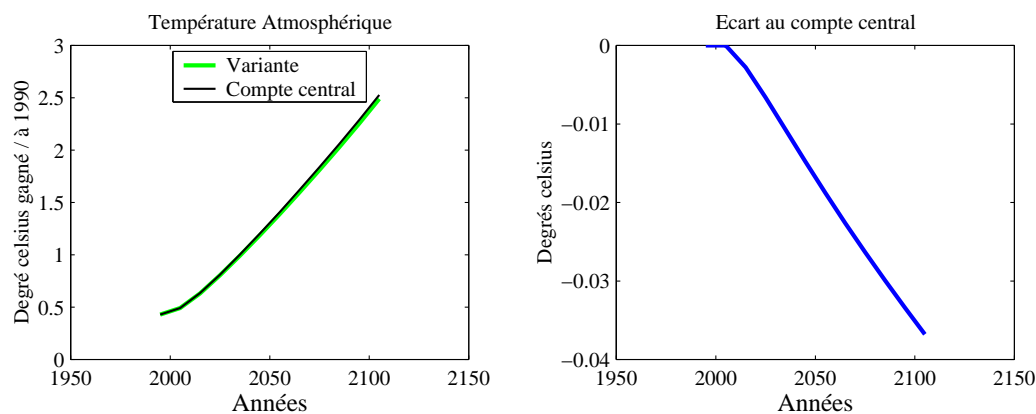
2105. Cette faible ampleur de la réponse de la concentration atmosphérique

FIG. 7.38 – Concentration atmosphérique de CO₂



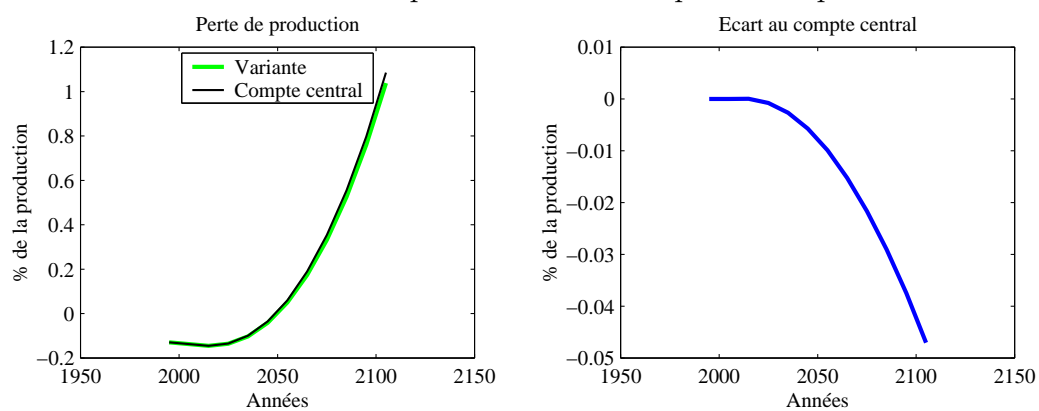
se retrouve sur l'évolution de la température (voir figure 7.39). Ainsi, à l'ho-

FIG. 7.39 – Température atmosphérique



uzion de 2105, la température atmosphérique dans l'économie perturbée est inférieure de 0.038° Celsius relativement à l'économie non perturbée. Le faible gain en température, relativement au compte central, explique la perte limitée en termes de production reportée à la figure 7.40.

FIG. 7.40 – Perte de production induite par la température



Chapitre 8

Impact des politique fiscales de taxation du carbone et de subvention de la R&D

8.1 Taxes et/ou Subventions ?

Nous examinons maintenant l'impact d'une taxe proportionnelle constante sur le prix du carbone et/ou d'une subvention à la R&D verte. Tant pour la taxe que pour la subvention, leur montant initial en 1995 est fixé de façon à représenter environ 1/3 de point de PIB.

Pour chaque graphique, nous reportons les effets quantitatifs (en niveau et en déviations par rapport au compte central) de trois politiques économiques alternatives :

1. une taxe sur le carbone (τ^E)
2. une subvention à la R&D verte (τ^R)
3. une subvention à la R&D verte financée par une taxe sur le carbone (τ^E, τ^R)

Le graphique 8.1 reporte la “taille” relative de l'intervention publique pour les deux types de politique économique. Cette taille relative est exprimée comme le montant de la taxe (respectivement de la subvention) rapporté au PIB pour tout l'horizon de la simulation. Les deux politiques ont la même taille à l'impact (en 1995). En revanche, la taille de la politique de taxation de l'énergie croît avec l'horizon, tandis que celle de la subvention reste constante.

FIG. 8.1 – Taille relative de l'intervention publique

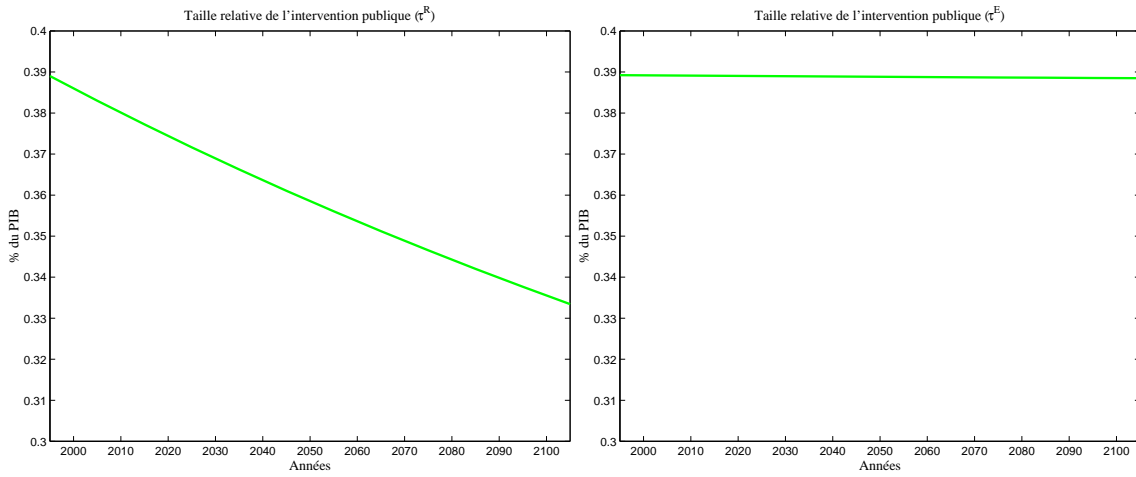
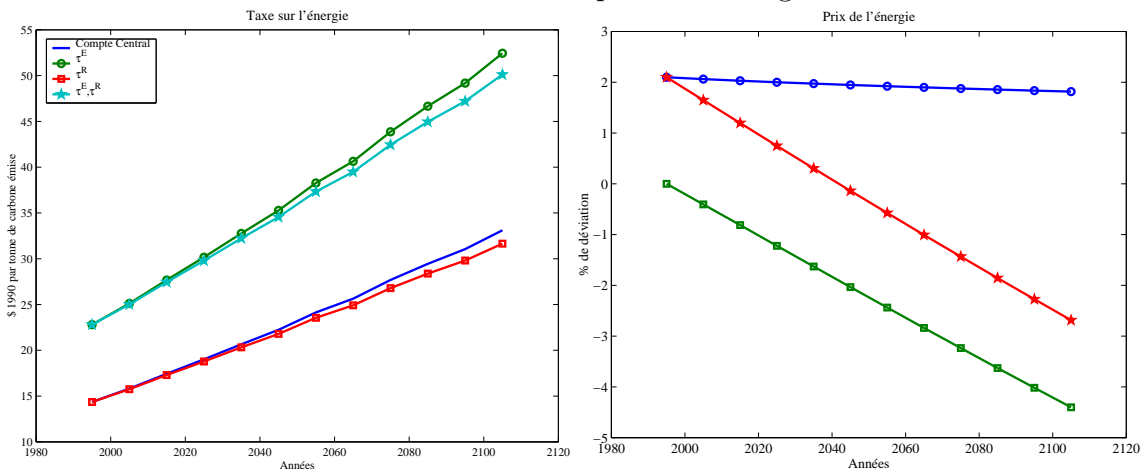
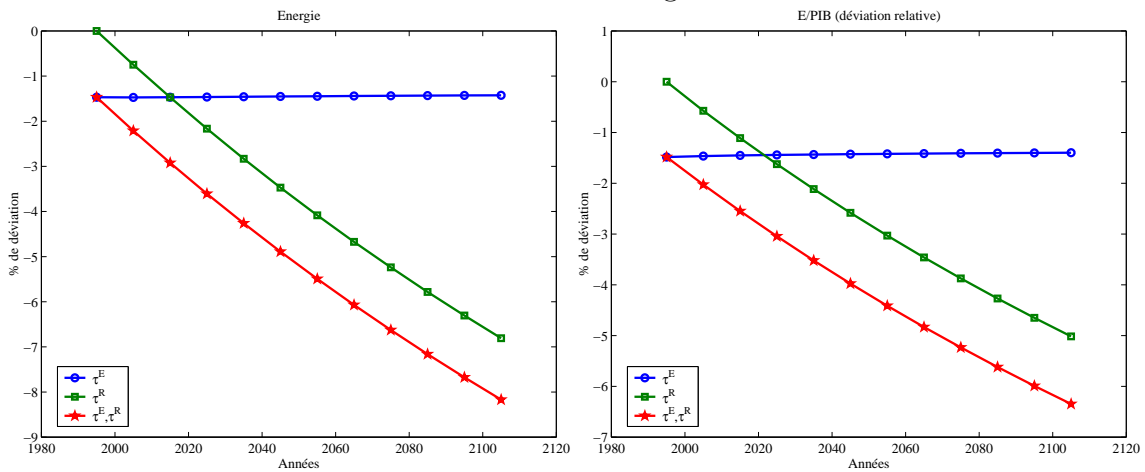


FIG. 8.2 – Taxe et prix de l'énergie



Le graphique 8.2 reporte l'effet des politiques sur le montant total de la taxe sur l'énergie (graphique de gauche) et sur les prix de l'énergie (graphique de droite). La politique de taxe sur les émissions provoque une forte progression instantanée des taxes dans la mesure où la baisse de la quantité d'énergie consommée ne compense pas la hausse des coûts de l'énergie (hausse du prix incluant la taxe).

FIG. 8.3 – Energie



La consommation d'énergie (voir le graphique 8.3 à gauche) diminue instantanément suite à la hausse permanente des taxes. L'effet de cette politique reste alors constant tout au long de l'horizon de la simulation puisque la consommation d'énergie se situe autour de -1.5% de celle du compte central entre 1995 et 2105. Il faut noter que la politique de subvention n'a pas d'effet immédiat sur la consommation d'énergie mais que son effet ne cesse de croître sur la période de simulation. Ainsi, dès 2020, l'effet d'une politique de subvention à la R&D verte domine celui d'une politique de taxation et devient nettement plus important au bout d'un siècle. On retrouve un effet similaire lorsque l'on regarde la ratio énergie sur PIB (voir le graphique 8.3 à droite), indiquant que la politique de subvention permet d'augmenter fortement l'efficacité énergétique, même si, à très court terme, son impact apparaît négligeable. Il faut finalement noter l'effet important tant à court terme qu'à long terme, d'une politique de subvention à la R&D verte financée par une taxe sur l'énergie. La consommation d'énergie baisse instantanément suite à la hausse permanente des taxes et l'effet sur la baisse de la consom-

mation d'énergie reste croissant et persistant tout au long de l'horizon de la simulation.

FIG. 8.4 – Ratio CO₂/PIB

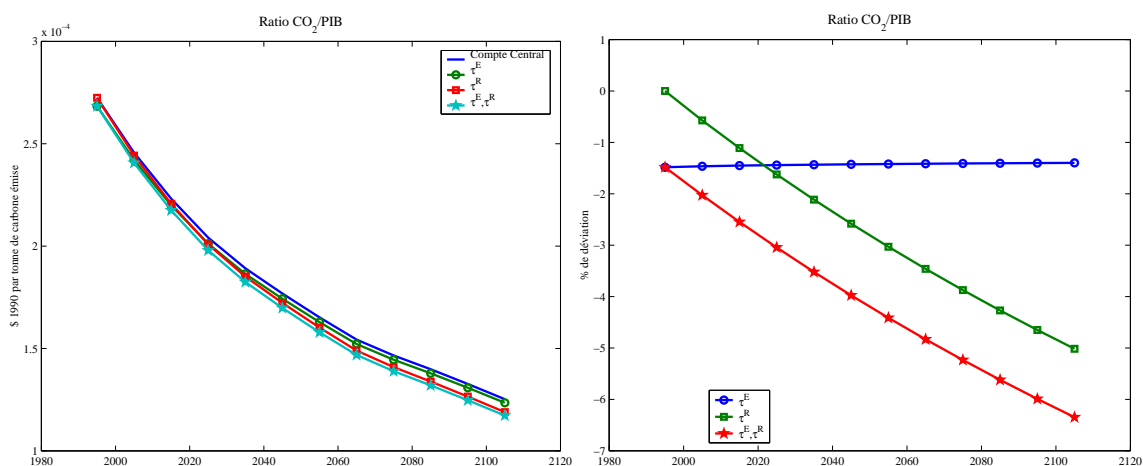
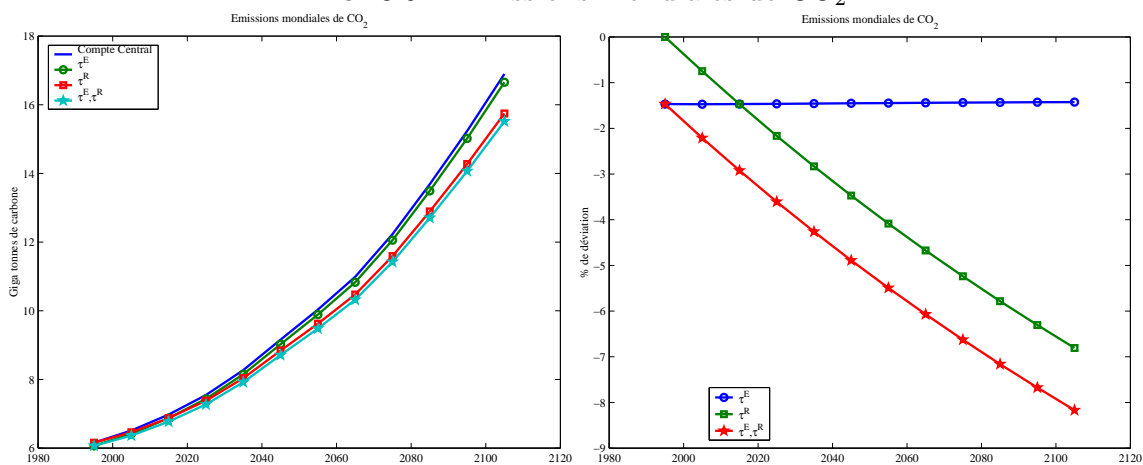


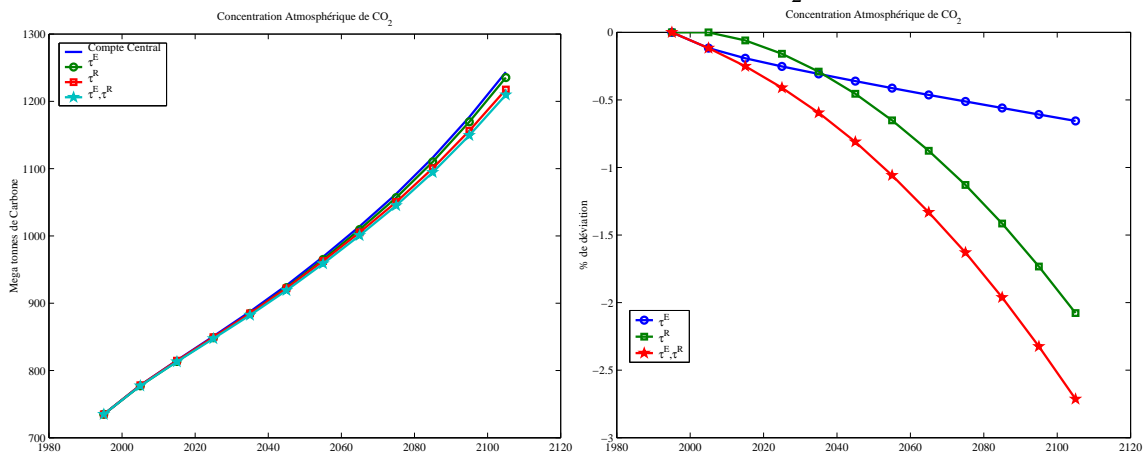
FIG. 8.5 – Emissions mondiales de CO₂



Les effets sur la consommation d'énergie des différentes politiques économiques se retrouvent sur l'émission de CO₂ (voir les graphiques 8.4 et 8.5).

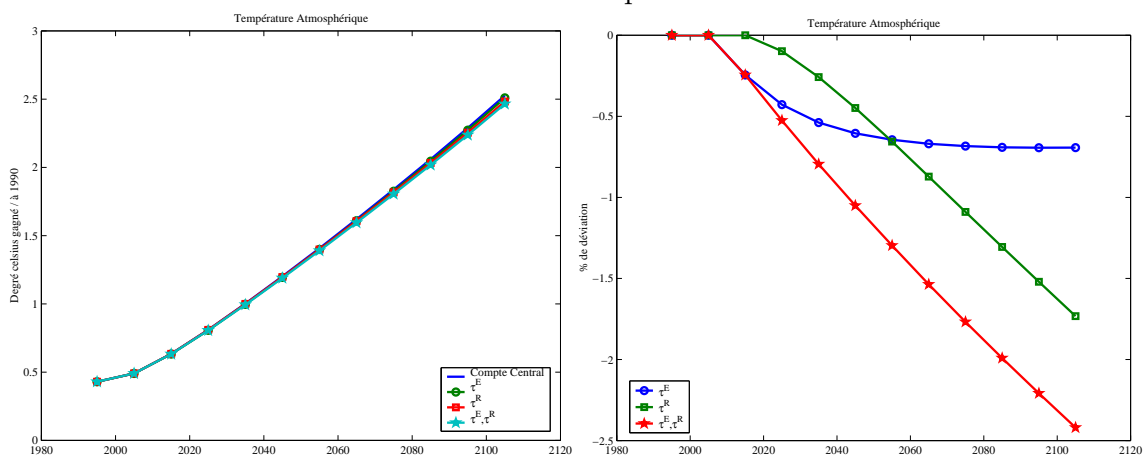
De même, la concentration atmosphérique de CO₂ diminue instantanément suite à la hausse des taxes, mais l'effet de cette politique demeure moins important à terme que celui d'une hausse des subventions. Il faut cependant noter que l'inertie des émissions retarde l'efficacité d'une politique de subvention à la recherche dans la mesure où celle-ci ne conduit à une diminution

FIG. 8.6 – Concentration de CO₂



des émissions plus importante qu'une politique de taxation de l'énergie qu'à partir de 2040.

FIG. 8.7 – Température

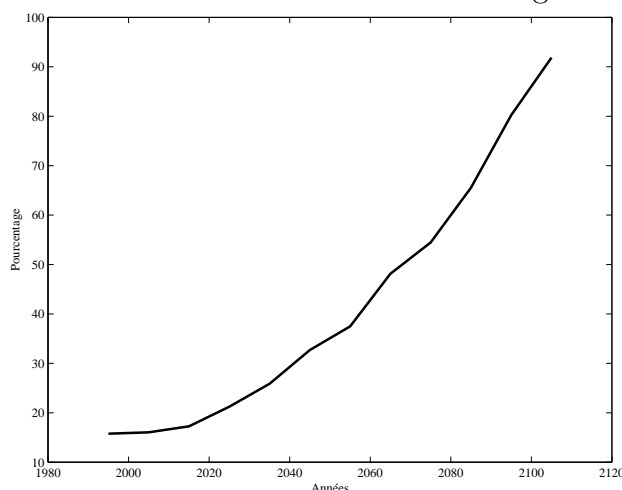


La réponse de la température à ces différentes politiques présente des caractéristiques similaires à celles déjà observées pour les variables d'émission. Cependant, étant donné l'inertie du bloc climatique, l'effet d'une politique de subvention à la R&D est encore retardée. Ainsi, il faut attendre 2060 pour que la politique de subvention conduise à une réduction de la température plus importante qu'une la politique de taxation.

8.2 Vers un contrôle des émissions

Dans cette section nous analysons une politique visant à diminuer (et maintenir par la suite) les émissions de CO₂ de l'OCDE de 5% relativement à leur niveau de 1990. Cet objectif¹ correspond ainsi au protocole de Kyoto de 1997. Le taux de taxe sur l'énergie est l'instrument utilisé. La figure 8.8 reporte le profil temporel du taux de taxe sur l'énergie, τ^E , permettant de remplir l'objectif d'émissions. Il apparaît clairement que le taux doit croître

FIG. 8.8 – Taux de taxe sur l'énergie



plus fortement que dans l'expérience précédente de façon à compenser les différents facteurs de croissance économiques et démographiques. Ainsi, τ^E s'élève de 5% en 1995 à 92% en 2105. L'élévation du taux de taxe se traduit alors par une augmentation régulière du prix de l'énergie, atteignant 45% relativement au compte central à l'horizon 2105. La consommation d'énergie diminue instantanément de 5% et baisse progressivement de façon à maintenir constantes les émissions de CO₂ au cours du siècle. En 2105, la consommation d'énergie a diminué de 27% relativement à la situation de référence — soit une baisse annuelle de 470 dollars par tête. Comme précédemment, le montant de la taxe sur l'énergie croît fortement. Ainsi, Le montant de la taxe s'établit instantanément à 44.13 dollars par tonne de carbone émise en 1995 (contre 14.35 dollars dans l'expérience précédente). En 2105, la taxe est alors de 507

¹Une version assouplie du protocole a également fait l'objet d'une évaluation quantitative.

FIG. 8.9 – Écart relatif au compte central (Énergie)

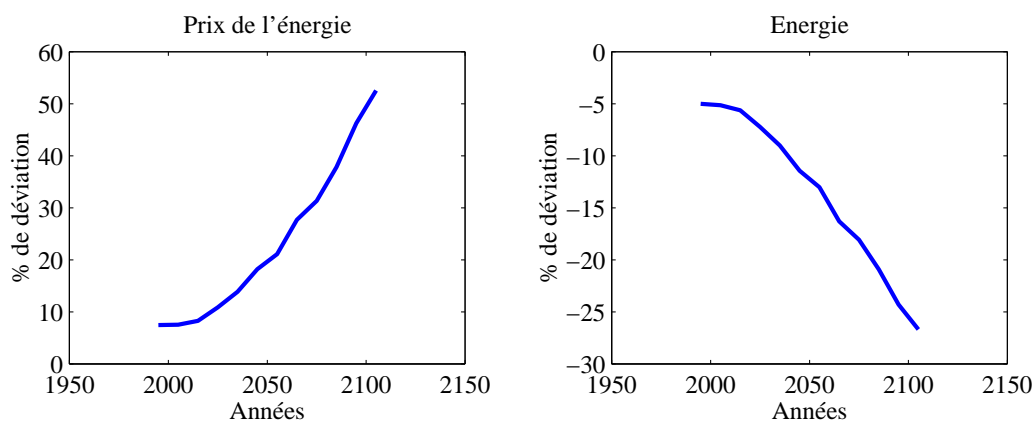
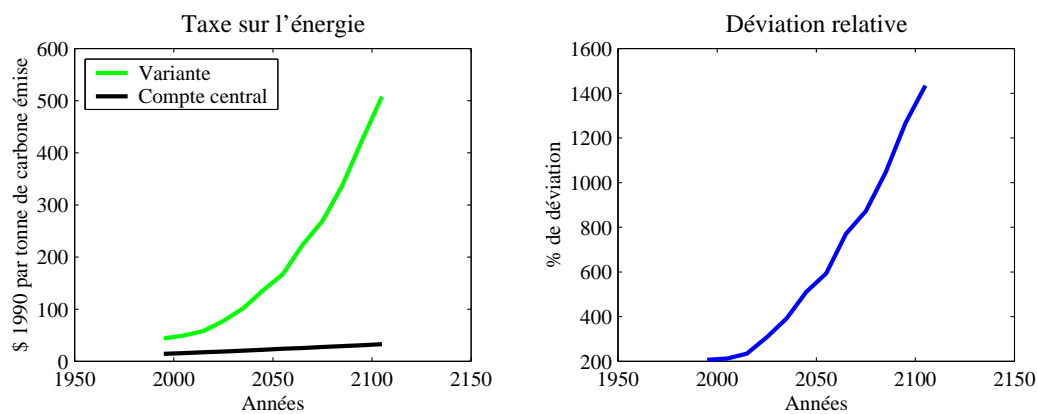


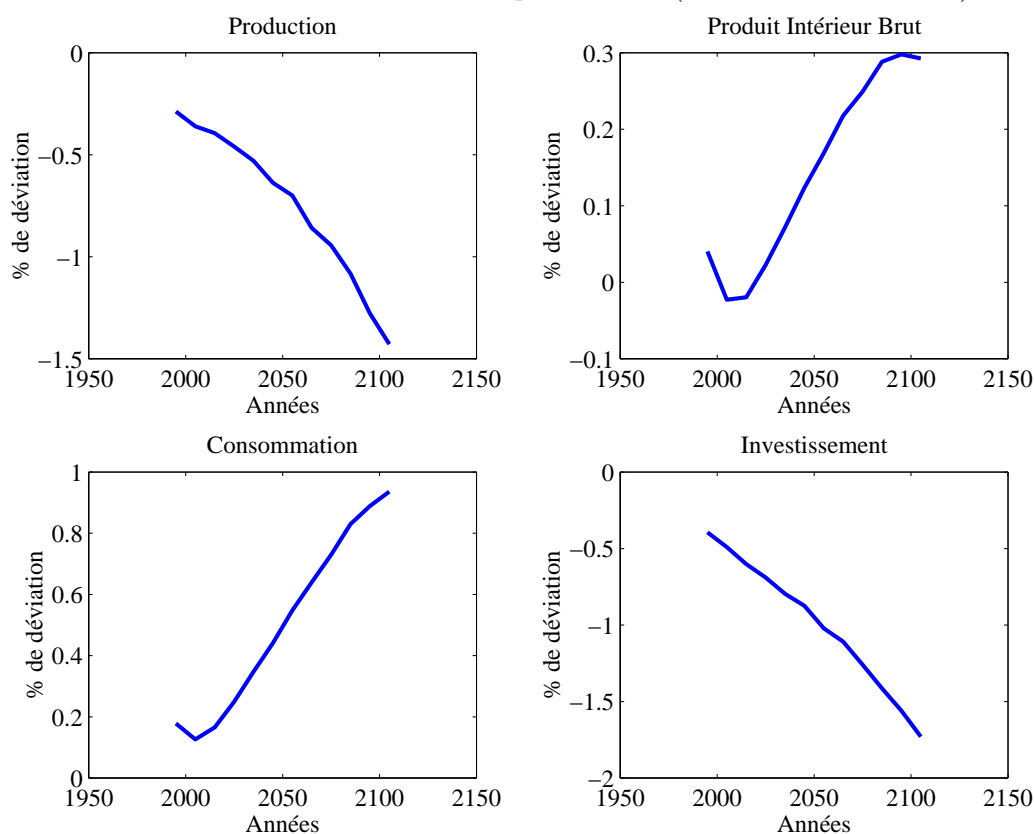
FIG. 8.10 – Taxe sur l'énergie



dollars, soit un accroissement du niveau de la taxe par rapport au compte central de 1400% en 2105.

La figure 8.11 reporte l'évolution, relativement au compte central, des agrégats macroéconomiques. Il convient de noter ici qu'au delà de la simple réforme fiscale précédemment analysée, vient se greffer la baisse instantanée de la consommation d'énergie, renforçant l'effet de la taxe. La baisse de la consommation d'énergie induit une diminution de la production des biens intermédiaires et de l'efficacité marginale du capital. Ainsi, les consommateurs

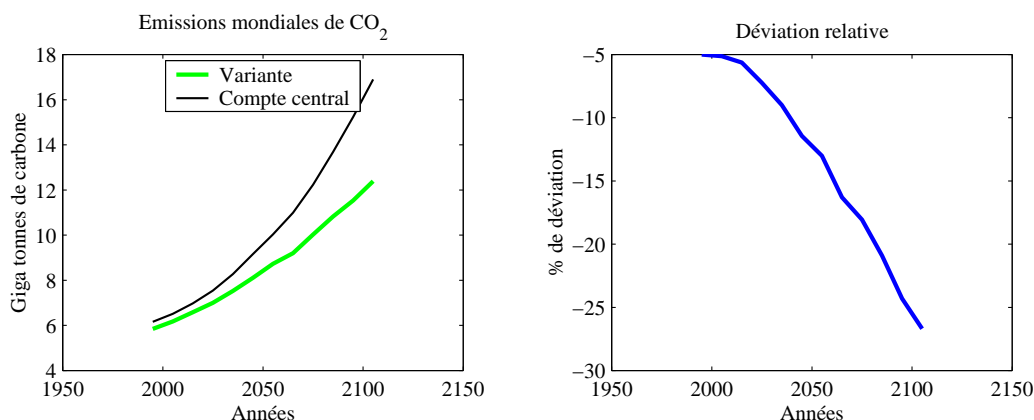
FIG. 8.11 – Écart relatif au compte central (Le marché des biens)



se détournent de l'épargne et consomment d'avantage. Ainsi, la consommation s'élève instantanément de 0.2% relativement au compte central, cette augmentation atteignant 0.95% en 2105. L'investissement diminue dès la mise en œuvre de la politique de 0.5% et baisse régulièrement entre 1995 et 2105. Au total, le PIB s'élève au dessus de sa trajectoire de référence de 0.3% en 2105.

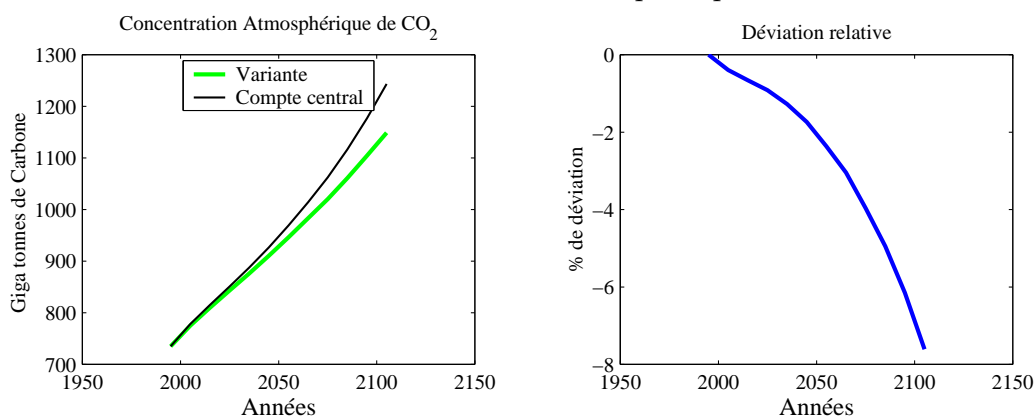
La figure 8.12 reporte l'évolution des émissions mondiales. Comme dans l'expérience précédente, les émissions progressent régulièrement puisque le protocole de Kyoto ne contraint pas les émissions de CO₂ du reste du monde. Ainsi dès 2050, les émissions mondiales sont réduites de 12.5%, soit environ 2

FIG. 8.12 – Émissions mondiales de CO₂



giga tonnes de carbone. L'écart augmente alors et s'établit à 27% en 2105, soit 5 giga tonnes de carbone. La concentration atmosphérique de CO₂ diminue de 8% en un siècle (voir figure 8.13). La température diminue alors sensiblement

FIG. 8.13 – Concentration atmosphérique de CO₂



(-0.16° Celsius) en un siècle (voir figure 8.14). La perte de production induite diminue donc, comme l'indique la figure 8.15 de 0.13 points en 2105.

FIG. 8.14 – Température atmosphérique

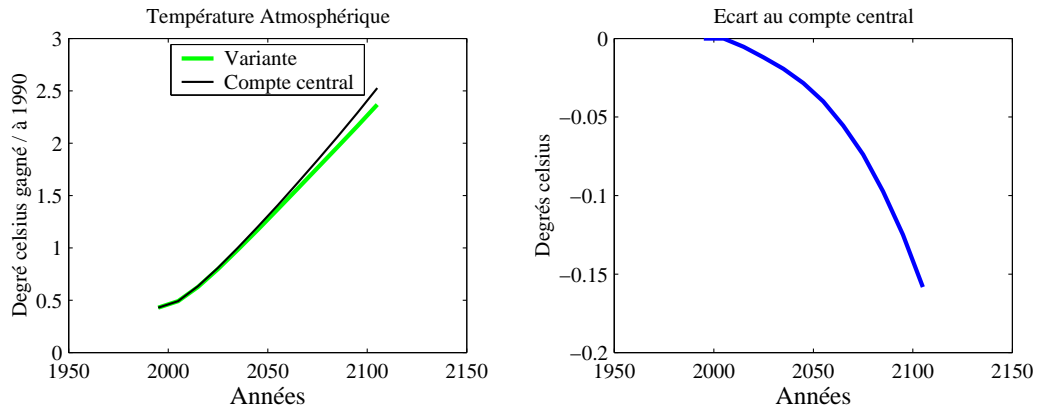
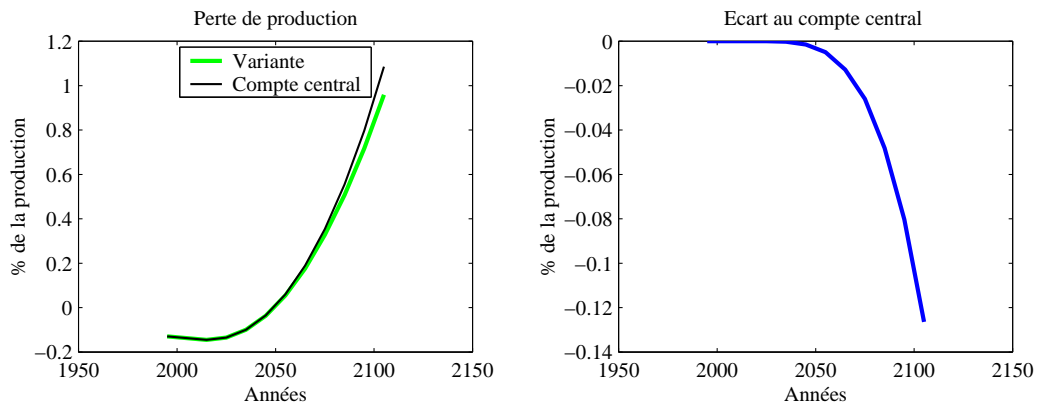


FIG. 8.15 – Perte de production induite par la température



Chapitre 9

Conclusion

Ce rapport a exposé le contenu et les résultats d'un modèle quantitatif visant à évaluer les politiques fiscales de lutte contre le réchauffement global de la planète. Notre approche se veut à la fois théorique et quantitative. Il s'agit tout d'abord de proposer un modèle original et à la pointe de la recherche économique. Il s'agit aussi de délivrer des prédictions chiffrées sur l'efficacité relative des politiques économiques (politique fiscale et/ou de subvention) afin de limiter les émissions. Nos résultats quantitatifs suggèrent :

- Un effet relativement important des subventions à la R & D "verte" sur les émissions de CO₂ à moyen terme.
- Un effet relativement faible de ces mêmes subventions dans le court terme
- Un effet relativement faible des taxes sur la consommation d'énergie sur les émissions de CO₂ à moyen terme.
- Un effet relativement important de ces mêmes taxes dans le court terme

Ces résultats suggèrent la possibilité d'une combinaison optimale de ces deux politiques économiques. Ils remettent surtout en cause une position de type "*laissez-faire*" suggérée par Nordhaus. Ce travail contribue ainsi significativement au débat et à l'analyse économique du réchauffement climatique. Bien entendu, ce travail ouvre de nouvelles perspectives de modélisation : prise en compte de différentes énergies, analyse détaillée de différentes zones géographiques, effet de retour du climat sur le fonctionnement de l'économie, analyse du bien-être... Ces différents éléments devrait faire l'objet de recherches futures.

Bibliographie

Bentolila, S. et Saint-Paul, G., Will EMU increase Eurosclerosis ?, à paraître dans Charles Wyplosz, editor, EMU : Impact on Europe and the World, WIDER, Oxford U. Press

Boyer, J. et Nordhaus, W. (2000) Warming the world. Economic models of global warming, MIT press, Cambridge, Mass.

Blanchard, O. et Kahn, C., The Solution of Linear Difference Models under Rational Expectations, *Econometrica*, 1980, 48 (5), pp. 1305–1311.

Boucekkine, R., An Alternative Methodology for Solving Non-Linear Forward-Looking Models, *Journal of Economic Dynamics et Control*, 1995, 19(4), pp.711–734.

Burnside, C., Eichenbaum, M. et Rebelo, S., Labor Hoarding and the Business Cycle, *Journal of Political Economy*, 1993, 101 (2), pp. 245–273.

Christiano, L. et Eichenbaum, M., Current Real Business Cycle Theories and Aggregate Labor Market Fluctuations, *American Economic Review*, 1992, 82(3), 430–450.

Cooley, T. et Prescott, E., *Frontiers of Business Cycle Research*, 1995, Princeton University Press.

Goolsbee, A. (1998) Does government R&D policy mainly benefit scientists and engineers ?, University of Chicago, GSB, American Bar Foundation, and National Bureau of Economic Research.

Hansen, L.P. et Singleton, K.J., Generalized Instrumental Variables Estimation of Nonlinear Rational Expectations Models, 1982, *Econometrica*, 50(5), pp. 1269-1286.

Judd, K.L., *Numerical methods in economics*, 1998, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Juillard, M., DYNARE : A Program for the Resolution and Simulation of Dynamic Models with Forward Variables through the Use of Relaxation Algorithm, WP 9602, Cepremap, 1996.

Kydland, F. et Prescott, E., Hours and Employment Variations in Business Cycle Theory, *Economic Theory* 1, 1991, 63–82.

Laffargue, J.P., Résolution d'un Modèle Macroéconomique avec anticipations Rationnelles, *Annales d'Economie et de Statistiques*, 1990, 17, pp. 97–119.

Mulkay, B., Hall, B. et Mairesse, J. (2000), Firm level investment and R&D in France and the United States : A comparison, NBER, working paper 8038

NSF (1995), *Science and Engineering Indicators 1995*, National Science Foundation.

Oliveira-Martins, J., Scarpetta, S. et Pilat, D., Mark-up ratios in manufacturing industries - Estimates for 14 OECD countries, 1996, OECD Economics Department working papers 162.

Nordhaus, W., An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases, 1992, *Science*, 258, pp. 1315–1319.

Nordhaus, W. et Yang, Z., A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies, *American Economic Review*, 1996, 86(4), pp. 741–765.