

CROISSANCE ÉCONOMIQUE, ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT: UNE ÉTUDE THÉORIQUE ET EMPIRIQUE

Projet de recherche (n°29)

Institut Français de l'Énergie (IFE)
Bureau d'Économie Théorique et Appliquée
(BETA, UMR 7522 CNRS)

Projet de rapport final

Août 2005

Equipe de recherche

1. Théophile AZOMAHOU, Maître de conférences, ULP, BETA
2. Raouf BOUCEKKINE, Professeur, UCL, IRES-CORE
3. Jean Alain HERAUD, Professeur, ULP, BETA
4. François LAISNEY, Professeur, ULP, BETA
5. Phu NGUYEN VAN, Chargé de recherche au CNRS, THEMA, Cergy Pontoise

Responsable scientifique: Théophile AZOMAHOU

Correspondant IFE: Jean-Eudes MONCOMBLE, Directeur général du CFE

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 3 |
| 1.1 | Objectifs scientifiques | 3 |
| 1.2 | Contexte et problématique | 4 |
| 2 | Étude empirique | 6 |
| 2.1 | Données | 7 |
| 2.2 | Efficacité énergétique | 7 |
| 2.3 | Productivité du capital | 14 |
| 3 | Modélisation | 14 |
| 3.1 | Structure du modèle | 17 |
| 3.2 | Politiques économiques | 20 |
| 3.2.1 | Conséquences d'une restriction d'offre d'énergie | 20 |
| 3.2.2 | Offre d'énergie et subvention | 21 |
| 3.3 | Simulation | 21 |
| 4 | Conclusion | 23 |

1 Introduction

1.1 Objectifs scientifiques

Le partenariat entre le Bureau d'Économie Théorique et Appliquée (BETA), laboratoire de recherche de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, et l'Institut Français de l'Énergie (IFE) établit les conditions de la réalisation du projet de recherche portant sur la problématique des effets sur la croissance économique d'une régulation environnementale, se traduisant par des normes énergétiques. L'équipe de recherche s'est proposé de mener des travaux bien ancrés aux développements scientifiques les plus récents permettant d'établir certains liens entre la croissance économique, l'énergie et l'environnement. On envisage de développer un nouveau cadre théorique et de tester la validité des nouveaux modèles théoriques concernant l'adaptation du stock de capital d'une économie aux contraintes de rareté des ressources naturelles et/ou de politique environnementale, en présence du progrès technique endogène. Ce projet comporte un volet théorique et un volet empirique qui sont étroitement liés. Il vise à évaluer l'efficacité des instruments politiques existants et à donner des recommandations en matière de politiques technologiques et environnementales. Cette recherche a souligné certaines questions importantes :

- Tester empiriquement la validité des théories de l'adaptation du stock de capital d'une économie aux contraintes imposées par la rareté des ressources naturelles.
- Modéliser théoriquement le lien entre croissance économique et normes énergétiques au travers des modèles à générations de capital, avec remplacement endogène des biens d'équipement et progrès technique endogène, notamment en ce qui concerne l'efficacité énergétique.

Ce cadre d'analyse est plus adapté à l'étude de l'industrie énergétique que l'hypothèse de capital homogène retenue par les études existantes. Cependant, la prise en compte d'un changement technique endogène dans les modèles à générations de capital est intrinsèquement complexe et, de ce fait, serait originale.

- Considérer la direction du changement technique au niveau intra-sectoriel, c'est-à-dire visant l'efficacité énergétique des machines exploitant des ressources naturelles différents, renouvelables ou non.

Il s'agit d'exploiter les conditions nécessaires à l'émergence de multiples trajectoires d'équilibre. Cette analyse devrait permettre de réconcilier l'analyse économique néo-classique avec la thèse évolutionniste de dépendance au chemin technologique dans le développement de nouvelles technologies.

- Mettre en évidence le rôle joué par ces aspects dans la performance des simulations visant à prévoir les conséquences des politiques technologiques ainsi que le rôle de

la politique environnementale sur l'évolution du marché des sources d'énergie non polluantes.

Le présent rapport soumis au comité d'évaluation vient en complément du rapport intermédiaire d'Avril 2005. Ce rapport expose les données utilisées dans l'étude empirique, les résultats d'estimations économétriques, la modélisation théorique et les éléments de politique économique. L'équipe de recherche se tient à la disposition de l'IFE et de notre correspondant, Monsieur Jean-Eudes Moncomble pour tout complément d'informations et discussions relatives à ces travaux.

1.2 Contexte et problématique

La relation entre la croissance économique, le progrès technique et la consommation d'énergie constitue un élément central dans l'étude des politiques technologiques et environnementales, notamment dans la lutte contre le changement climatique. L'économie mondiale est de plus en plus consommatrice d'énergie. Une réduction de l'utilisation d'énergie affectera la production. Cependant, cet effet peut être atténué s'il est accompagné par le développement de nouvelles technologies économisant l'énergie.

Les prix du pétrole et ceux d'autres matières premières ont fortement augmentés ces dernières années, sous la pression d'une demande croissante émanant notamment des pays industriels et des pays émergents. Dans le même temps, les politiques énergétique et environnementale sont incitées à être revues et corrigées par la prise de conscience des dangers liés au changement climatique : concentration de plus en plus élevée des gaz à effet de serre (dont le dioxyde de carbone, CO_2) dans l'atmosphère, avec la menace de déstabiliser l'écosystème. Pour limiter ces risques, les pouvoirs publics mettent l'accent sur la réduction de la consommation d'énergie et la recherche fondamentale dans le domaine de l'énergie renouvelable (hydrogène, éolien, etc.)¹

L'*hypothèse de Porter* a suscité une grande discussion dans la littérature en économie de l'environnement (Porter [1991], Porter et van der Linde [1995]). Selon cette hypothèse, des normes environnementales strictes pourraient être bénéfiques à la fois à la compétitivité de l'entreprise et à la croissance économique (Porter [1991] et Porter et van der Linde [1995]). En effet, le potentiel d'innovation et de développement de nouvelles technologies induites par ces normes semble être à long terme un déterminant majeur de la compétitivité de l'entreprise et de la croissance économique.² Cette hypothèse contraste

1. Andris Piebalgs, commissaire à l'énergie, a établi le 13 avril 2005 la liste des priorités de l'UE, incluant celle d'orienter la R&D en faveur des sources d'énergie non polluantes en CO_2 , notamment l'hydrogène et les ressources renouvelables, ainsi que celle de maintenir l'expansion du secteur des sources renouvelables d'énergie au rythme de 20% par an.

2. Il existe deux versions de l'hypothèse de Porter. La version *forte* énonce que certains types de

avec la vision traditionnelle selon laquelle toute régulation environnementale entraîne une perte de compétitivité pour les entreprises. Au niveau macroéconomique, l'analogie de l'hypothèse de Porter est l'hypothèse de la courbe de Kuznets environnementale (CKE), qui représente l'interaction entre la dégradation environnementale et le développement économique par une relation en U inversé.³ Les critiques adressées à l'hypothèse de Porter (Oates et al. [1994], Palmer et al. [1995]), l'hypothèse de la CKE et les discussions sur leur validité théorique et empirique sont étroitement liées aux débats actuels portant sur de grandes questions environnementales. Le protocole de Kyoto est un exemple édifiant.⁴

Une question importante qui se pose alors est de savoir s'il est possible, et à quel coût, de satisfaire simultanément la demande croissante d'énergie et les normes environnementales restrictives permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre. La présente recherche propose des éléments de réponse à cette question en proposant une analyse du progrès technique permettant d'une part d'améliorer l'efficacité énergétique et, d'autre part de modifier la structure énergétique d'une économie. L'efficacité énergétique peut être améliorée par des innovations économisant la consommation de l'énergie. De l'autre côté, la structure énergétique d'une économie peut être modifiée par l'introduction de nouvelles technologies qui utilisent des énergies renouvelables.

La littérature en économie environnementale a également souligné l'importance du progrès technique dans la relation entre régulations environnementales et performance économique, notamment avec l'émergence des théories de la croissance endogène ces dernières années. Ces théories sont fondées sur des évidences empiriques du progrès technique endogène, autrement dit progrès technique déterminé par des variables socio-économiques dans les modèles (Grubb et Ulph [2002], Weyant et Olavson [1999]). Le rôle du progrès technique endogène est parfaitement résumé dans Löschel [2002]. Un large consensus s'est formé sur le fait que la prise en compte du progrès technique endogène dans l'étude de l'interaction entre le sphère économique, l'environnement et l'énergie (notamment dans les modèles d'équilibre général calculable) permet d'atténuer les coûts des politiques environnementales, d'accélérer l'effort de dépollution, voire de rendre la performance économique compatible avec une préservation de l'environnement.

régulation environnementale stimulent l'innovation, alors que la version *faible* implique que la régulation environnementale stimule certains types d'innovation.

3. La CKE énonce que la dégradation environnementale s'aggrave avec le revenu lorsque l'économie est encore au début de son développement mais commence à s'améliorer lorsque le revenu dépasse un certain seuil (appelé "point de retournement"). Ce retournement est attribué, par la plupart des économistes, à l'efficacité des politiques environnementales.

4. Une majorité de pays industriels se sont mis d'accord pour restreindre leurs émissions de CO₂, en espérant que ces mesures n'entraîneront pas de coûts significatifs pour leurs économies. Par contre, les États-Unis n'ont pas ratifié ce protocole en arguant que cela affectera sévèrement leur économie. L'issue du débat portant sur les coûts du protocole de Kyoto est loin d'être terminée.

Du point de vue de la croissance endogène, une réduction de l'utilisation des ressources (par exemple l'énergie) entraîne une réduction de la production. Cependant, la perte de production sera plus faible (voire plus que compensée par le gain lié à l'innovation) si le progrès technique endogène est pris en compte.⁵ Smulders et Bretschger [2000] ont montré que les changements technologiques induits par les politiques environnementales, modélisés par les changements dans les technologies à usage général (*general purpose technologies*), peuvent expliquer l'existence d'une Courbe Environnementale de Kuznets.

Selon Ruttan [1997], il existe généralement trois approches complémentaires quant au progrès technique : (i) c'est un processus induit par les variations dans la demande et les prix relatifs des facteurs de production (Hicks [1932]), (ii) c'est un processus évolutionniste à la Schumpeter (Schumpeter [1942], Nelson et Winter [1982]), et (iii) c'est un processus dépendant du chemin technologique (Arthur [1989, 1994], David [1985]). Notre projet comporte un volet théorique et un volet empirique qui sont étroitement liés. Les études empiriques ont besoin d'un fondement théorique mais fourniront aussi des vérifications empiriques des résultats théoriques obtenus. L'étude évalue également l'efficacité des instruments politiques existants et proposent des recommandations en matière de politiques technologiques et environnementales dans le contexte du changement climatique.

D'une part, nous mettons l'accent sur le progrès technique économisant l'énergie. D'autre part, nous étudions le progrès technique permettant de modifier la structure énergétique d'un pays. Une modélisation intégrée qui traite simultanément ces deux types de progrès technique dépasse le cadre de cette étude. La partie empirique fait appel à des outils économétriques pour pouvoir fournir, à partir des données réelles, des estimations des paramètres qui seront utiles dans des simulations numériques et pour tester la pertinence des résultats théoriques.

2 Étude empirique

Dans cette section, nous étudions l'efficacité énergétique et le lien entre la production et l'investissement actif. L'étude concerne trois grands pays industrialisés : la France, le Japon et les États-Unis.⁶ Rappelons que l'une des difficultés rencontrées dans la première phase du projet était la non disponibilité des données par secteur d'activité. Cette difficulté est maintenant levée. En particulier, pour chaque pays, on s'intéresse aux secteurs du transport et de l'industrie qui sont reconnus comme étant de gros consommateurs d'énergie.

5. Voir le numéro spécial de *Resource and Energy Economics* [2003] "Endogenous Technical Change in Environmental Macroeconomics" sur le lien entre le progrès technique endogène et l'environnement naturel.

6. L'Allemagne est exclu du fait de la réunification. Il en va de même pour la Russie.

2.1 Données

La production est mesurée par la valeur ajoutée aux prix de base (VA).⁷ Nous utilisons des séries sur la formation brute de capital fixe (GFCF) comme approximation du stock de capital fixe (ou investissement productive). L'intensité d'énergie est calculée pendant que le rapport entre la consommation totale d'énergie (en unité thermique britannique de milliers Qbtu⁸) et la valeur ajoutée. La consommation totale d'énergie inclut la consommation d'énergie primaire, les ventes au détail de l'électricité, et les déperditions d'énergie dans le système électrique. Nous pourrions utiliser la consommation d'énergie primaire au lieu de la consommation totale d'énergie mais ce dernier est essentiellement constituée de la consommation primaire, notamment la consommation des secteurs industriel et du transport.⁹

À l'exception des données de consommation totale d'énergie des États-Unis qui proviennent de la base "US Energy Information Administration (EIA)", les données portant sur la valeur ajoutée, la formation brute du capital fixe, puis celles portant sur la consommation d'énergie proviennent de la base (STAN database) de l'OCDE. Pour le Japon, on ne dispose que des données sur le secteur manufacturier.

Dans les tableaux 1, 2 et 3 présentent les statistiques de la valeur ajoutée, la formation brute du capital fixe et de la consommation totale d'énergie au niveau global (noté *Économie*) et par secteurs. Les observations portent sur la période allant de 1959 à 2000. Nous avons subdivisé cette période en deux sous-périodes: de 1959 à 1997, puis de 1998 à 2000. L'année 1997 correspond à la date de la signature du protocole de Kyoto, mais ce choix reste arbitraire.

2.2 Efficacité énergétique

Les graphiques 1 2 3 et 4 présentent l'évolution de l'intensité énergétique. Une baisse de l'intensité énergétique signifie une amélioration de l'efficacité énergétique. Ainsi, pour États-Unis, on observe que l'intensité énergétique a baissé en moyenne de 1,9% sur la période 1959-1997, et de 2,6% sur la période 1998-2000.

7. Certaines études empiriques utilisent le PIB comme proxy de la production. La valeur ajoutée fournit des indications plus précises sur la capacité productive.

8. Quadrillion

9. L'énergie primaire inclut le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'énergie nucléaire, l'énergie hydro-électrique, le bois, le combustible, l'énergie géothermique, solaire, vent, et les importations nettes de charbon et d'électricité.

TAB. 1 – *Statistiques descriptives : États-Unis*

| Secteur | variable | Jusqu'à 1997 | | Après 1997 | | Période entière d'observation |
|------------------|---------------------------|--------------|------------|------------|------------|----------------------------------|
| | | moy. | écart-type | moy. | écart-type | |
| Industrie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 1.05 | 0.476 | 2.091 | 0.124 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.143 | 0.065 | 0.3 | 0.017 | 1959-2000 |
| | Consommation d'énergie | 27.173 | 6.055 | 37.529 | 1.496 | 1959-2000 |
| | <i>g_{int}</i> | -0.055 | 0.039 | -0.028 | 0.024 | 1959-2000 |
| Transport | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.256 | 0.136 | 0.583 | 0.033 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.061 | 0.033 | 0.018 | 0.016 | 1959-2000 |
| | Consommation d'énergie | 16.428 | 5.343 | 26.113 | 0.648 | 1959-2000 |
| | <i>g_{int}</i> | -0.057 | 0.033 | -0.039 | 0.017 | 1959-2000 |
| Economie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 3.721 | 2.093 | 8.63 | 0.51 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.545 | 0.3 | 1.403 | 0.115 | 1959-2000 |
| | Consommation d'énergie | 65.286 | 18.864 | 96.65 | 1.953 | 1959-2000 |
| | <i>g_{int}</i> | -0.063 | 0.029 | -0.042 | 0.01 | 1959-2000 |

Notes : *Source*: OECD STAN database; *g_{int}* désigne le taux de croissance de l'intensité énergétique.

TAB. 2 – *Statistiques descriptives : France*

| Secteur | variable | Jusqu'à 1997 | | Après 1997 | | Période entière d'observation |
|------------------|---------------------------|--------------|------------|------------|------------|----------------------------------|
| | | moy. | écart-type | moy. | écart-type | |
| Industrie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.189 | 0.089 | 0.326 | 0.014 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.027 | 0.013 | 0.044 | 0.002 | 1959-2000 |
| Transport | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.039 | 0.023 | 0.081 | 0.004 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.012 | 0.006 | 0.024 | 0.006 | 1959-2000 |
| Economie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.61 | 0.357 | 1.273 | 0.067 | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.138 | 0.072 | 0.262 | 0.022 | 1959-2000 |

Notes : *Source*: OECD STAN database.

TAB. 3 – *Statistiques descriptives : Japon*

| Secteur | variable | Jusqu'à 1997 | | Après 1997 | | Période entière d'observation |
|------------------|---------------------------|--------------|------------|------------|------------|----------------------------------|
| | | moy. | écart-type | moy. | écart-type | |
| Industrie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.747 | 0.235 | 1.075 | – | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.618 | 0.228 | 1.002 | – | 1959-2000 |
| Transport | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.787 | 0.203 | 1.119 | – | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.611 | 0.384 | 1.28 | – | 1959-2000 |
| Economie | | | | | | |
| | Valeur ajoutée | 0.772 | 0.231 | 1.114 | – | 1959-2000 |
| | Formation brute cap. fixe | 0.631 | 0.261 | 1.002 | – | 1959-2000 |

Notes : *Source*: OECD STAN database.

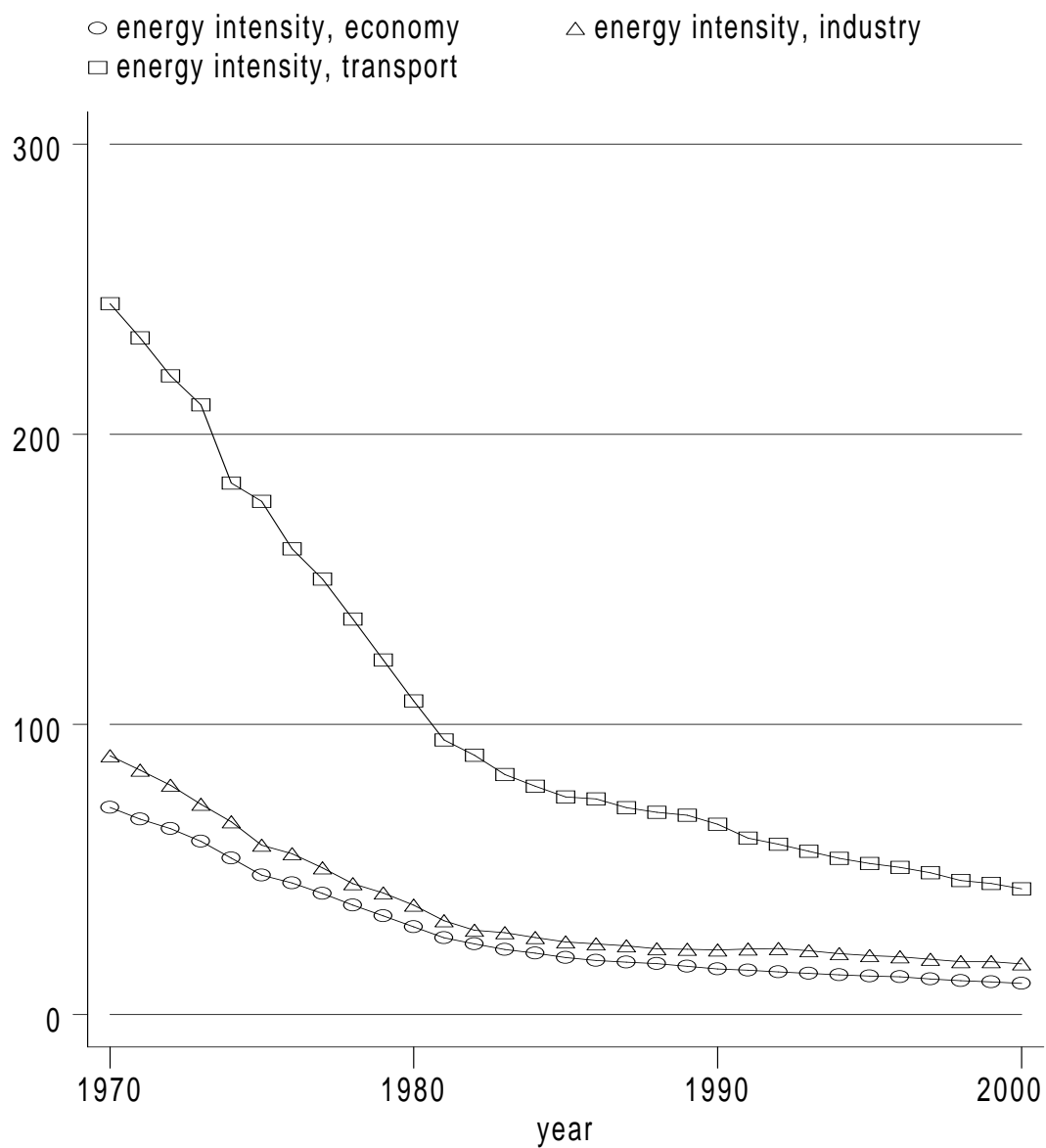


FIG. 1 – *Intensité énergétique, États-Unis.*

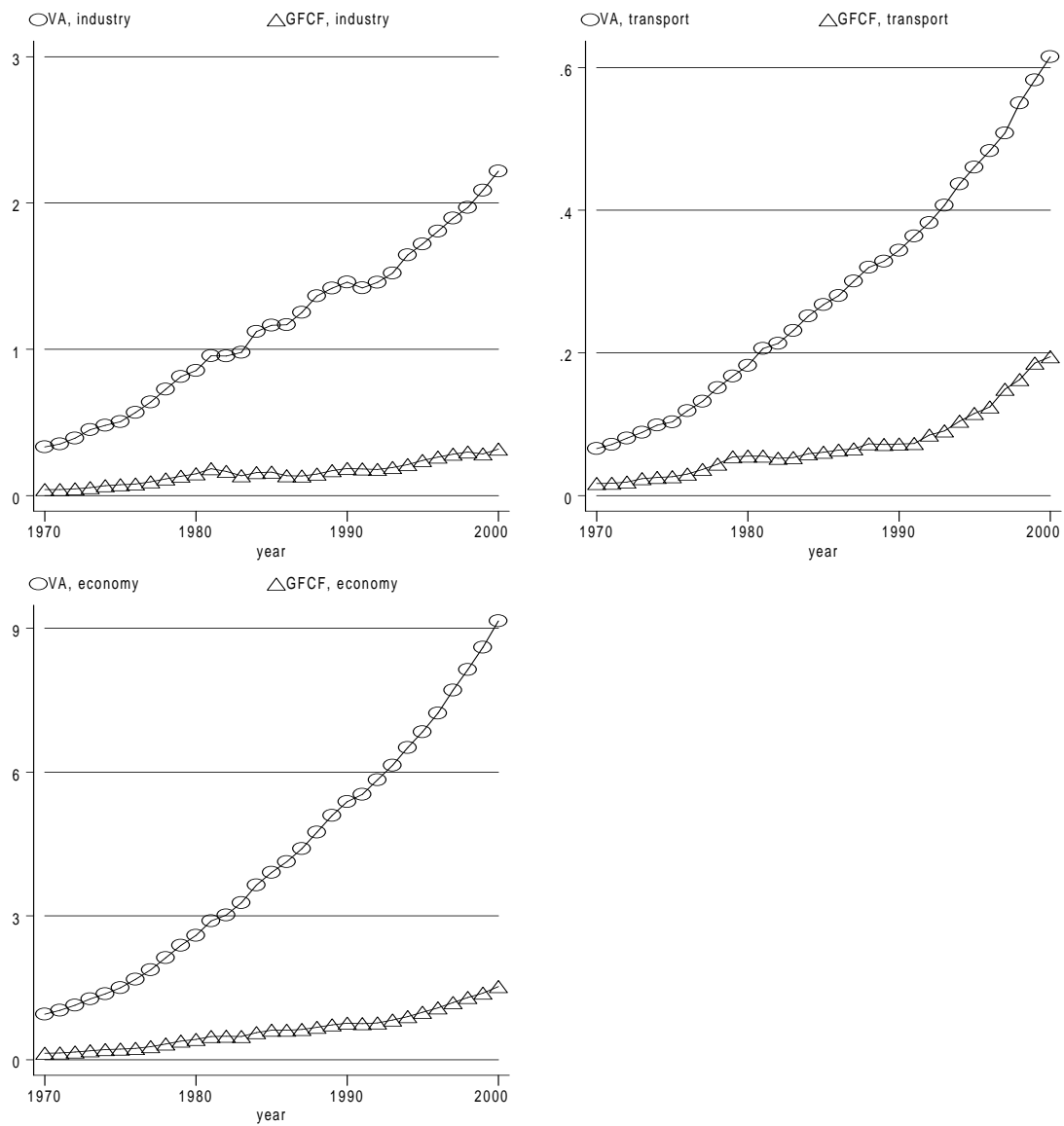


FIG. 2 – *Intensité énergétique, États-Unis.*

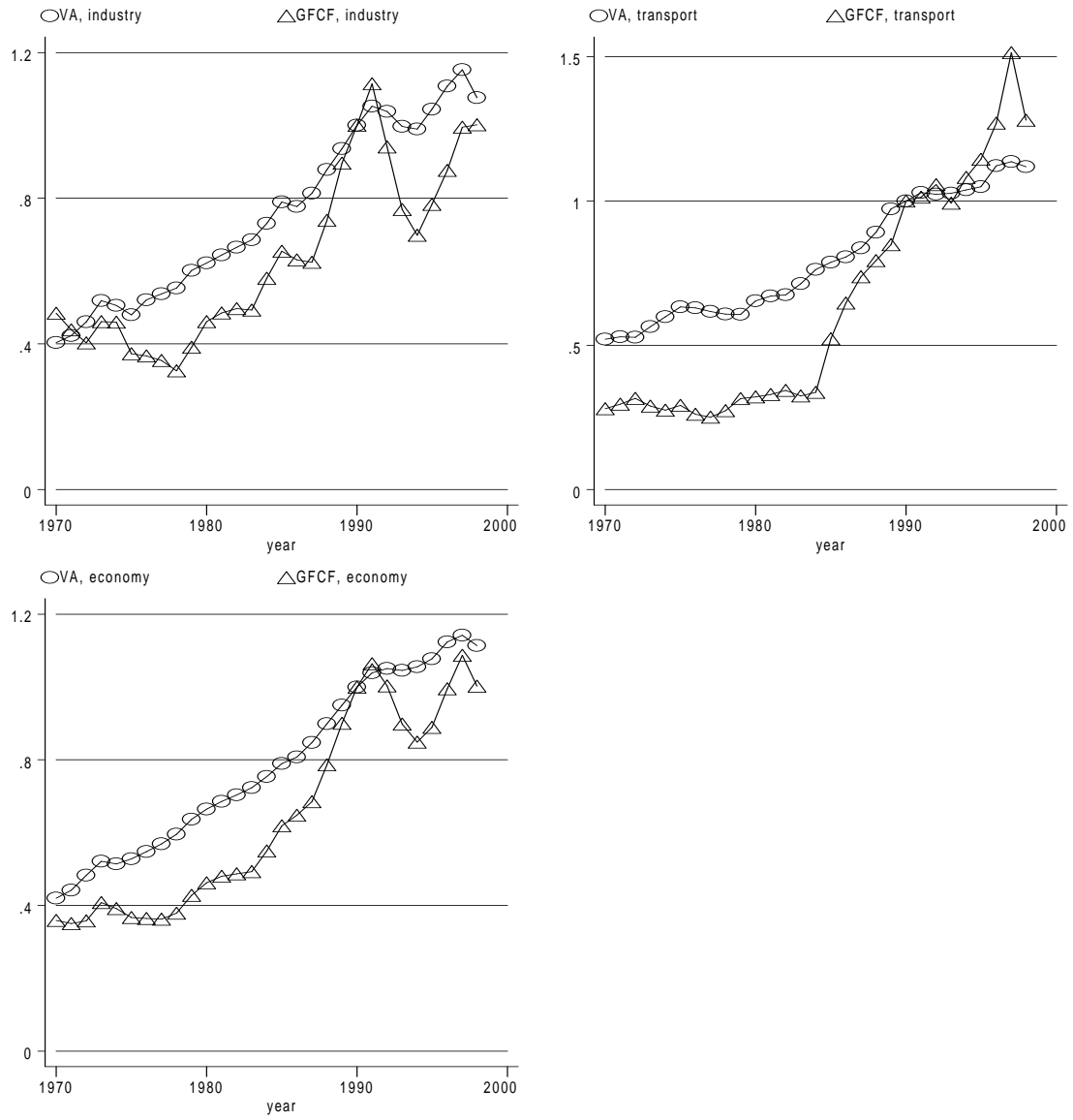


FIG. 3 – *Intensité énergétique, Japon.*

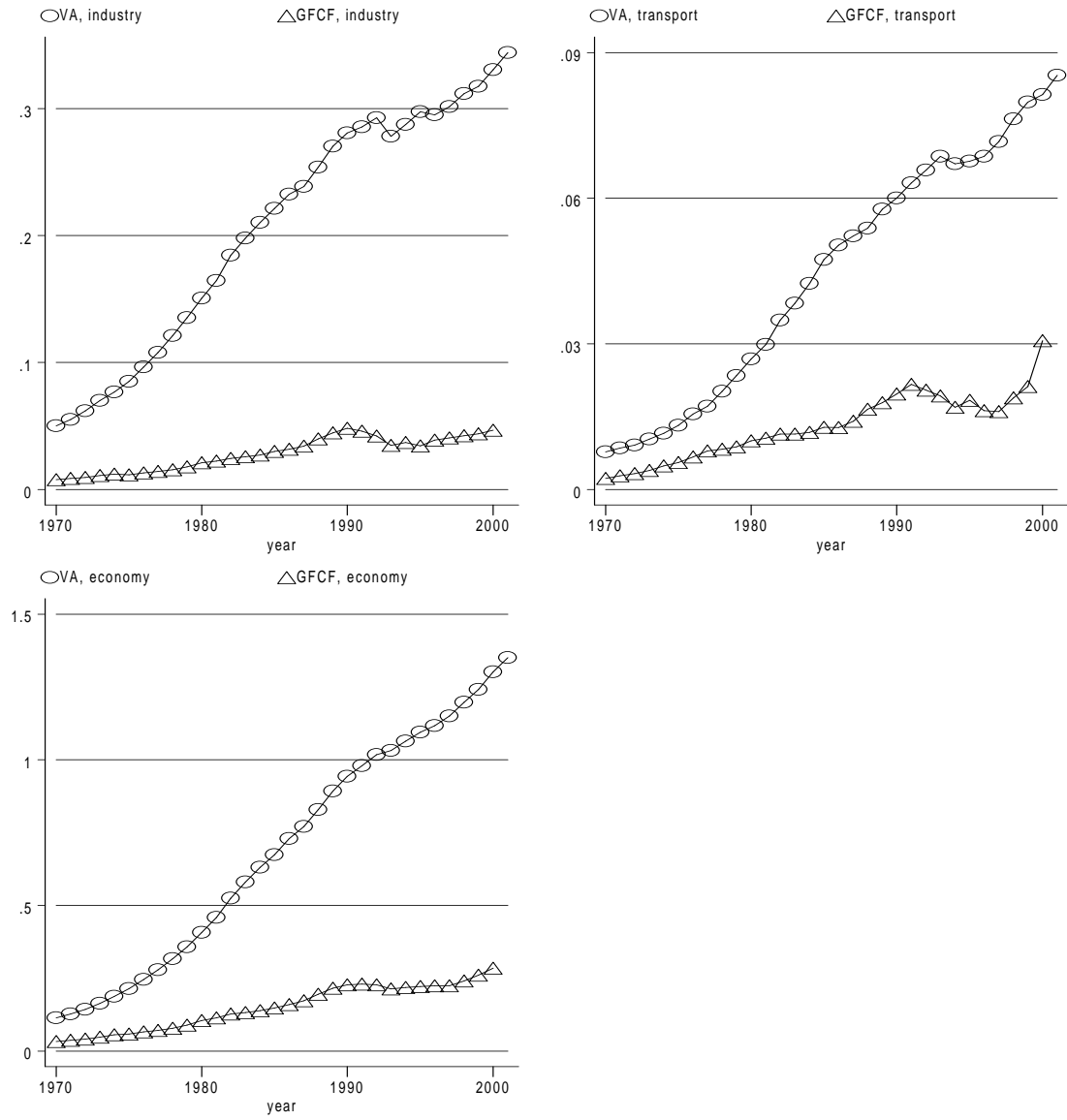


FIG. 4 – *Intensité énergétique, France.*

2.3 Productivité du capital

Nous étudions la relation de long terme entre la valeur ajoutée et la formation brute du capital fixe. Cette estimation permet d'évaluer les effets de générations de capital. Il faut noter que nous n'étudions pas ici les aspects dynamiques de la relation production-investissement, ainsi que l'évaluation du progrès technique incorporé (voir par exemple Sakellaris et Wilson [2003]). Le modèle de régression économique considéré ici est statique et n'incorpore pas l'endogénéité de l'investissement, des investissements réalisés dans le passé, l'impact du prix des équipements.¹⁰ En revanche, notre spécification a le mérite d'être considéré comme une relation de long terme entre la production et l'investissement en équipements, ce qui nous permet d'étudier la productivité de long terme et notamment l'existence d'un progrès technique autonome.

En utilisant le test de Dickey-Fuller augmenté et le test de Phillips-Perron, on observe que la valeur ajoutée et la formation du brute du capital fixe ont une racine unitaire $I(1)$. On obtient ainsi une relation de cointégration, c'est-à-dire une relation de long terme entre la valeur ajoutée et la formation du brute du capital fixe. Le vecteur de cointégration peut alors être estimé par la méthode des moindres carrés. Les résultats d'estimation sont présentés dans le tableau 4. Nous incorporons dans la spécification une variable de tendance pour prendre en compte les effets structurels. Ainsi, pour les États-Unis, on observe que la formation brute du capital fixe a un effet de long terme de 1.5 sur la production (valeur ajoutée). De plus, cet effet s'amplifie dans le temps.

Dans l'ensemble, l'analyse empirique montre que la production par habitant est globalement une fonction croissante de l'investissement en équipement par habitant. Cette relation a connu un changement structurel après 1997, traduisant ainsi l'impact du changement technique autonome sur la relation entre la production et l'investissement en équipement. Un tel changement structurel n'est pas mis en évidence pour la relation entre l'intensité énergétique et le taux d'investissement. L'intensité énergétique diminue en moyenne lorsque le taux d'investissement s'accroît. Dans le reste de cette étude, nous construisons un modèle théorique qui tient compte des canaux à travers lesquels l'investissement en équipement peut stimuler la production. Nous étudions l'effet d'une politique de réduction de la consommation d'énergie, puis nous simulons ces effets.

3 Modélisation

Les données réelles ont montré que, malgré une consommation croissante d'énergie ces dernières décennies, l'efficacité énergétique s'est améliorée dans la plupart des pays industriels, notamment depuis le premier choc pétrolier. Par exemple, on observe que

10. nous ne disposons malheureusement pas de données concernant les prix au niveau national.

TAB. 4 – Résultats d'estimation

| Secteur | variable | États-Unis | | France | | Japon ^(a) | |
|------------------|-------------|------------|------------|----------|------------|----------------------|------------|
| | | coef. | écart-type | coef. | écart-type | coef. | écart-type |
| Industrie | | | | | | | |
| | GFCF | 1.349** | 0.369 | 2.908** | 0.387 | 0.297** | 0.035 |
| | Trend | 0.049** | 0.003 | 0.006** | 0.001 | 0.021** | 0.001 |
| | Constante | 0.149** | 0.021 | 0.022** | 0.004 | 0.264** | 0.013 |
| | \bar{R}^2 | | 0.992 | 0.988 | | 0.991 | |
| | #obs. | | 31 | 31 | | 29 | |
| Transport | | | | | | | |
| | GFCF | 1.218** | 0.112 | 0.439* | 0.24 | 0.225** | 0.036 |
| | Trend | 0.118** | 0.001 | 0.002** | 0.000 | 0.014** | 0.002 |
| | Constante | 0.006 | 0.004 | -0.001 | 0.001 | 0.441** | 0.011 |
| | \bar{R}^2 | | 0.995 | 0.984 | | 0.981 | |
| | #obs. | | 31 | 31 | | 29 | |
| Economie | | | | | | | |
| | GFCF | 3.391** | 0.366 | 1.945** | 0.327 | 0.277** | 0.027 |
| | Trend | 0.13** | 0.015 | 0.026** | 0.003 | 0.019** | 0.001 |
| | Constante | -0.019 | 0.07 | -0.043** | 0.011 | 0.316** | 0.007 |
| | \bar{R}^2 | | 0.994 | 0.995 | | 0.997 | |
| | #obs. | | 31 | 31 | | 29 | |

Notes: ^(a) Pour le Japon, par manque de données, nous n'utilisons que le secteur manufacturier; ^(b) Formation brute de capital fixe; ^(c) Test de Dickey-Fuller augmenté pour la racine unitaire (le nombre de retards utilisés dans le test est 3); *significativité au niveau 5%; **significativité au niveau 1%. L'équation de régression est $VA_t = \alpha + \beta GFCF_t + \gamma Trend + \epsilon_t$. Il s'ensuit que le vecteur de cointégration est $[1, \beta]'$.

l'efficacité énergétique des États-Unis a augmenté de 2,2% par an, et en France d'environ 0,8%, durant la période 1980-1999. Ce fait stylisé reflète un progrès technique améliorant l'efficacité énergétique (Popp [2001]). Autrement dit, cette tendance souligne un progrès technique permettant de réaliser des économies dans la consommation d'énergie. Dans ce contexte empirique, les modèles à générations de capital (*vintage capital models*), initiés par Solow [1959] et développés ensuite, par exemple, par Solow et al. [1966], Malcomson [1975], Boucekkine et al. [1997, 1998], constituent un outil puissant pour la modélisation de l'interaction entre progrès technique, croissance économique et énergie. L'idée générale est que différentes générations de capital ont différents effets sur la production et sur la structure des inputs, en particulier l'utilisation de l'énergie dans la production. Ainsi, on peut supposer de manière plausible que les nouvelles générations de capital (par exemple, de nouveaux biens d'équipement) consomment moins d'énergie que les anciennes.

Dans les modèles néoclassiques à générations de capital, le progrès technique est exogène et non incorporé (Conrad [2001]). Le progrès technique non incorporé suppose que les biens d'équipement consomment de moins en moins d'énergie, quel que soit leur âge, ce qui s'avère plutôt restrictif et ne semble pas correspondre à la réalité. Les modèles à générations de capital plus récents ont relaxé cette hypothèse en utilisant le progrès technique incorporé (Boucekkine et Pommeret [2004], Azomahou, Boucekkine et Nguyen Van [2003]). Dans ces modèles, seules les nouveaux biens d'équipement incorporent les avancées technologiques les plus récentes, les rendant plus économes en énergie que les anciens. Ainsi, une augmentation du prix de l'énergie accélère le processus de remplacement des anciens biens d'équipement par des nouveaux consommant moins d'énergie. L'âge moyen du stock de capital se trouve diminué. C'est l'effet de modernisation mis en avant par Xepapadeas et de Zeeuw [1999] et démontré par Feichtinger et al. [2005]. La structure du capital en générations joue donc ici un rôle important dans les décisions d'accumulation, d'investissement et de remplacement de capital. Dans ces modèles, en dehors de la propriété économe en énergie, les nouveaux biens d'équipement sont plus productifs que les anciens grâce au progrès technique, qui a été cependant modélisé de façon exogène.

Ce projet propose de rendre le cadre d'analyse plus réaliste en endogénéisant le progrès technique. L'incorporation du progrès technique endogène dans l'étude de la relation entre croissance économique, environnement et consommation d'énergie est encore récente dans la littérature. Le numéro spécial de la revue *Resource and Energy Economics* [2003] résume le progrès obtenu avec les modèles de croissance endogène. Sur le plan théorique le survol de la littérature (Ricci [2004]) montre que la politique environnementale peut agir sur la dynamique de l'innovation, de l'investissement et la pollution par une variété de canaux. Notamment l'effet de modernisation à la Xepapadeas-de Zeeuw est rationalisé dans les modèles de croissance endogène avec R&D par Hart [2004]. Ces modèles font ce-

pendant abstraction du problème de remplacement des biens d'équipement, ce qui semble inapproprié à l'étude de l'industrie énergétique. Sur un plan quantitatif, les exercices simulations numériques les plus récents démontrent que la présence du progrès technique endogène permet de réduire significativement les coûts engendrés par la mise en places d'un plan de réduction de gaz à effet de serre.¹¹ Ce résultat est robuste à la modélisation du progrès technique comme phénomène dû à l'apprentissage par la pratique (learning-by-doing, Gerlagh et van der Zwaan [2003]) ou généré par la R&D (Buonanno et al. [2003]).¹²

Notre cadre d'analyse sera fondé sur le modèle de Azomahou, Boucekkine et Nguyen Van [2003]. Tandis que le modèle de Boucekkine et Pommeret [2004] est de type d'équilibre partiel et que le progrès technique est exogène dans Azomahou, Boucekkine et Nguyen Van [2003], le cadre théorique ici correspondra à un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique endogène. Nous utiliserons un mécanisme endogène de remplacement des équipements (*optimal scrapping rule*). La date de remplacement des biens d'équipement est déterminée par le comportement des investisseurs.¹³ Notre façon d'endogénéiser le progrès technique est intéressante dans la mesure où elle traite les décisions au niveau des firmes, mais elle implique un niveau endogène de productivité du stock global du capital. Notamment, une amélioration de la productivité de toutes les générations de capital amènera évidemment à une amélioration de la productivité du stock global du capital. Les entreprises ont un comportement maximisateur via les activités de R&D. Ce type de comportement correspond à l'hypothèse des innovations induites selon laquelle les innovations sont orientées de façon à répondre aux changements des prix relatifs, induits par exemple par la politique environnementale.

3.1 Structure du modèle

Sur la base des résultats empiriques, nous avons construit un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique économisant l'énergie. Nous ne présentons ici que les caractéristiques globales de la modélisation ainsi que les conclusions qui en découlent. Le modèle possède quelques caractéristiques importantes. Tout d'abord,

11. Les résultats de Goulder et Schneider [1999] indiquait au contraire que la prise en compte du progrès technique endogène peut aggraver le coût de la politique environnementale à cause d'un effet d'éviction sur la R&D des autres secteurs.

12. La distinction entre learning-by-doing et R&D est importante dans la détermination du calendrier optimal de la politique environnementale (Goulder et Mathai [2000]).

13. Notre cadre d'analyse est différent de celui de Mulder et al. [2003]. Ils utilisent un modèle à générations de capital pour étudier le processus de diffusion des technologies économisant l'énergie dans l'économie. Dans leur modèle, seul le progrès technique de l'ensemble des générations de capital existantes est endogène alors que le progrès technique au niveau de chaque génération de capital reste exogène.

la fonction de production est linéaire en capital, suivant la spécification traditionnelle de Solow et al. [1966]. Ensuite, pour garantir l'existence d'un sentier de croissance équilibrée, nous supposons que les générations successives de capital ne diffèrent que par leur consommation en énergie et non pas par leur productivité.

Nous considérons une économie où la population est constante. Il y a seulement un bien final (numéraire) qui peut être assigné à la consommation ou à l'investissement. Le bien final est produit sur un marché concurrentiel où la technologie, à rendement d'échelle constant, est définie sur continuum d'inputs. Une différence importante de ce modèle par rapport à Boucekine et al. (1996) est que, ici, les facteurs de production sont produites au moyen d'une technologie non linéaire. Cette technologie avec un structure à générations de capital. Le marché des facteurs de production monopolistique. En outre nous supposons que le marché du travail est concurrentiel et l'approvisionnement en énergie disponible exogène. Nous supposons que les ménages font face à un problème de maximisation intertemporel standard avec la fonction d'utilité instantanée avec aversion de risque relative constante (CRRA).

En développant ce modèle, nous souhaiterions de manière primordiale pouvoir répondre précisément aux questions suivantes : si nous réduisons la consommation d'énergie (par exemple selon le protocole de Kyoto), pouvons-nous penser que le progrès technique, avec sa vitesse actuelle, pourrait compenser la perte de production causée par cette réduction? La politique économique, en particulier la politique fiscale, pourrait-elle aider cette compensation?

Au cours de cette modélisation, nous avons déterminé les conditions nécessaires et suffisantes pour l'existence d'un sentier de croissance équilibrée. La valeur de l'investissement de long terme peut être immédiatement calculée, ce qui permet, à son tour, de calculer le revenu de long terme de l'économie. Nous avons démontré l'existence d'un âge optimal de remplacement des machines le long d'un sentier de croissance équilibrée. L'âge de remplacement devrait diminuer pour rester sur le sentier de croissance équilibrée. En termes économiques, ce résultat est assez intuitif. En effet, une amélioration de la productivité des machines rend optimale l'accélération du processus de remplacement des anciennes machines. Le même argument s'applique au progrès technique. Cependant, dans notre modèle, une hausse du progrès technique augmente aussi le taux d'intérêt d'équilibre, qui à son tour, réduit le rendement marginal de l'investissement. Cet effet négatif est plus que compensé par l'effet positif si la charge de la fiscalité est bornée durant la durée de vie des machines.

Concernant les variables de décision politique, on note par exemple qu'une augmentation de la subvention à l'investissement diminue le coût marginal de l'acquisition de nouvelles machines, ce qui accélère le remplacement et incite les nouveaux investisse-

ments. Une modification de l'offre d'énergie affecte le niveau optimal d'investissement mais pas sa durée de vie. Une hausse des taxes sur l'énergie influence uniquement le prix d'équilibre sur le marché de l'énergie. Cependant, une baisse des taxes sur l'énergie semble allonger la durée de vie des machines car le coût opérationnel diminue. Ce raisonnement est toutefois un argument d'équilibre partiel car il suppose que le prix de l'énergie reste inchangé. Si le coût opérationnel des machines diminue, il est probable que, par la règle d'investissement optimal, la demande pour l'investissement augmente également, ce qui augmente à son tour le prix d'équilibre pour une offre d'énergie fixée. Dans notre modèle, l'effet de prix d'équilibre général compense exactement l'effet d'équilibre partiel, et la profitabilité marginale de l'investissement s'avère insensible à des changements dans la taxation sur l'énergie.

Nous obtenons également des "rendements décroissants" du progrès technique et des effets de politique économique affectant la règle de remplacement et donc la distribution de l'âge des machines. Ceci a quelques implications immédiates. Ainsi, dans les pays où, par exemple, la productivité marginale de l'investissement est faible, le progrès technique et la politique fiscale peuvent être très efficaces pour le rajeunissement du capital et la relance de la production. Dans le cas opposé, le canal de remplacement semble faible et, en particulier, il est difficile pour la politique fiscale de compenser la baisse dans la production consécutive à une baisse de la consommation d'énergie. Nous discuterons ce point en détail dans la section suivante. Maintenant, nous analysons la production de long terme.

La réaction de la production n'est pas la même dans le cas d'un choc technologique et d'un choc créé par une politique économique. En effet, pour une valeur donnée du revenu de long terme, une hausse de la productivité de l'investissement a deux effets: un effet direct, et un effet indirect *via* le remplacement. Les machines plus productives permettent directement une relance de la production. Or, nous savons que l'accroissement de la productivité du capital accélère également le remplacement, ce qui accroît la production. De manière contrastée, une augmentation de la subvention à l'investissement n'a pas d'effet direct sur la production mais seulement un effet indirect (positif) *via* le remplacement. Cet aspect sera crucial dans les évaluations quantitatives (simulation) que nous avons réalisées. Nous constatons également qu'une réduction de la consommation d'énergie a évidemment un effet direct négatif sur la production de long terme du fait de la fonction de production Leontief. Cette dernière ne réagit pas à des changements de la taxe sur l'énergie.

Finalement, il est important de noter que le niveau de la production de long terme est une fonction décroissante du taux de progrès technique. Nous effectuons d'abord des analyses comparatives avec le taux de progrès technique fixé. Par la suite, dans la simulation,

nous prenons également un taux de progrès technique variable. Remarquons que, tandis que la production est une fonction décroissante de taux de progrès technique, le niveau d'investissement de long terme est croissant avec ce paramètre. Une des propositions de cette étude a consisté à démontrer que le taux d'investissement n'augmente pas lorsque le progrès technique économisant l'énergie s'accélère. Ces résultats sont cohérents avec les résultats trouvés dans notre analyse empirique.

3.2 Politiques économiques

Dans ce qui suit, nous supposons qu'il y a une réduction de la consommation d'énergie (du type protocole de Kyoto). Nous formalisons cette réduction sous la forme d'une baisse de l'offre d'énergie. La question est de savoir si le progrès technique et/ou la politique fiscale peut compenser l'effet négatif sur le revenu de long terme d'une telle réduction. Concernant le progrès technique, comme nous l'avons mentionné ci-dessus, nous fixons le taux du progrès technique économisant l'énergie. Nous nous concentrons sur la productivité marginale du capital. En ce qui concerne la politique économique, nous étudions le cas d'une subvention à l'investissement, ce qui a pour vertu d'augmenter la production *via* le remplacement des machines.

3.2.1 Conséquences d'une restriction d'offre d'énergie

Considérons par exemple que les termes d'un compromis international aboutit à une recommandation d'une réduction de l'offre d'énergie pour baisser la production de pétrole. Une telle réduction implique une baisse de la production. Supposons un accroissement régulier du progrès technique, comme justifié dans l'analyse empirique. D'après les résultats de la modélisation, nous savons qu'une telle modification diminue le temps de remplacement des machines, entraînant le rajeunissement du stock de capital, une productivité du capital supérieure et un revenu plus élevé. Une question immédiate est alors de savoir si l'évolution technologique est capable de compenser les pertes de production résultant de la réduction de la consommation d'énergie. Notre modèle nous permet de tirer des renseignements simples et utiles concernant cet aspect. Nous montrons que sous certaines conditions, une hausse du niveau technologique compense exactement les pertes du revenu entraîné par une réduction de l'offre d'énergie.

Une implication évidente est que la productivité marginale du capital ne devrait pas augmenter dans la même proportion que la baisse de la consommation d'énergie. Ce résultat est entièrement dû à l'effet indirect de remplacement. Le résultat final dépend de l'ampleur de l'effet indirect.

3.2.2 Offre d'énergie et subvention

Supposons maintenant que le gouvernement accorde des subventions à l'investissement à un taux donné pour alléger l'effet négatif de revenu suite à une réduction de la consommation d'énergie. Nous savons que le revenu augmente avec le taux de subvention *via* la variable d'âge de remplacement. Effectivement, le mécanisme est proche de celui décrit précédemment concernant l'accroissement du niveau technologique. Ici également, nous pouvons trouver l'accroissement du taux de subvention qui compense exactement la perte de revenu provoquée par une baisse de l'offre d'énergie.

Contrairement au cas précédent, nous ne pouvons rien dire sur l'ampleur relatif de l'accroissement de la subvention à l'investissement dont on a besoin pour compenser la réduction de la consommation d'énergie. Ceci signifie que la politique fiscale n'a qu'un effet indirect sur la production. Ici encore, cet effet vient du remplacement des machines. Par conséquent, comme dans le cas précédent, le résultat final dépendra de l'ampleur de cet effet.

3.3 Simulation

Nous étudions le cas d'un impôt supérieur à la dépense énergétique des entreprises. Bailey [2002] a observé que les impôts aux royaumes-unis représentent 81,5% des prix de carburant total. Sur la base de cet exemple, et conformément à l'objectif du protocole de Kyoto, nous nous situons dans la même fourchette. Les résultats de la simulation suggère qu'une augmentation de l'impôt sur les dépenses énergétiques augmente l'âge optimal de remplacement, et diminue l'investissement optimal et le niveau des prix de l'énergie. La relation inverse entre le niveau des prix de l'énergie et de l'impôt sur les dépenses énergétiques vient directement de l'hypothèse d'offre d'énergie de long terme exogène.

Si nous augmentons l'impôt, l'offre d'énergie n'est pas affectée parce qu'elle est exogène et décroît dans le temps. Cependant la demande énergétique est réduite puisque l'énergie est maintenant plus chère, pour un niveau fixe de production et d'âge de remplacement. En conséquence, le prix de l'énergie diminue. En ce qui concerne les autres signes, nous appliquons la relation négative entre le niveau des prix de l'énergie et l'impôt sur les dépenses énergétiques. De cette manière, nous pouvons identifier l'excédent positif et négatif d'effets l'âge de remplacement et l'investissement à long terme.

Quand l'impôt sur les dépenses énergétiques augmente, le coût d'opération de machines augmente. Les entreprise décident de remplacer plus tôt leur équipement (effet direct). Cependant cet effet est compensé par la réduction du niveau des prix de l'énergie qui est produit également par l'augmentation de l'impôt (effet indirect). Par conséquent, l'effet net d'une augmentation de l'excédent d'impôt sur l'énergie par rapport à l'âge de remplacement est positif. Notre résultat montre qu'une augmentation d'un impôt déjà

élevé sur les dépenses énergétiques n'induit pas un remplacement plus tôt des machines. Cela tient au fait que cet impôt modifie également le niveau des prix de l'énergie.

Par la suite, nous distinguons le cas anglo-saxon et le cas franco-japonais. La vitesse du progrès technique économisant l'énergie dans le premier cas est environ le double de celle du second cas (1,9% contre 0,8% approximativement). Remarquons également que la productivité marginale de l'investissement ne peut pas être interprétée comme le ratio de la production au capital. Notre modèle théorique ne recouvre aucun concept de capital agrégé et la fonction de production dépend d'un schéma de remplacement endogène du capital. Comme l'estimation repose précisément sur une spécification générale, nous pouvons extrapoler les changements structurels observés dans la dérivée première pour la productivité marginale de l'investissement. Dans cette simulation, nous prenons la productivité marginale de l'investissement comme variant sur un large intervalle, de 0,1 à 1,5.

Étudions d'abord une vitesse élevée du progrès technique économisant l'énergie, par exemple 0,019 comme dans le cas des États-Unis. Pour que la productivité marginale de l'investissement augmente de 0,3 à 1, le taux de variation de la productivité marginale de l'investissement nécessaire pour compenser une réduction de l'offre d'énergie de l'ordre de 1% est de 0,89% à 0,95%. L'efficacité décroissante observée de la productivité marginale de l'investissement couvre l'ampleur décroissante de l'effet indirect *via* le remplacement lorsque la productivité marginale de l'investissement devient plus grand. Néanmoins, nous pouvons tirer une conclusion plus positive du modèle. Si nous extrapolons le changement structurel dans la dérivée première de la production par habitant par rapport à l'investissement, alors ce changement structurel permet selon notre modèle de compenser la réduction de la consommation d'énergie de 21,05% à 22,47%, ce qui est plus que satisfaisant en termes du protocole de Kyoto.

La performance de la politique fiscale est beaucoup plus faible. Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où cette politique affecte seulement la production *via* le remplacement. On a montré que cet effet décroît rapidement avec la productivité marginale de l'investissement. En effet, pour une productivité marginale de l'investissement de 0,3, la subvention devrait augmenter de 0,47 pour compenser une réduction de l'offre d'énergie de 1%.¹⁴ Pour que la productivité marginale de l'investissement soit égal à 0,5, la subvention devrait augmenter de 1,21, ce qui n'a pas de sens.

La politique fiscale semble moins fiable dans le cas de faibles progrès techniques économisant l'énergie. Par exemple, lorsque la productivité marginale de l'investissement est de 0,3, la subvention devrait s'accroître de 1,27 pour compenser une réduction de l'offre

14. Ceci signifie que la subvention à l'investissement devrait être autour de $2/3$, comme elle est fixée à 0,2 sur le sentier de croissance équilibrée.

d'énergie de 1% (contre 0,47 dans le cas de progrès technique élevé). L'effet indirect *via* le remplacement paraît ici encore trop faible pour compenser entièrement la baisse de la consommation d'énergie. Si le progrès technique économisant l'énergie ralentit, la portée des subventions au remplacement des machines se réduira considérablement. L'inefficacité relative des subventions au remplacement des machines démontrée dans notre modèle est en accord avec les résultats empiriques obtenus par Lemiale et Zagamé [1998] qui ont remis en cause la supériorité des subventions aux investissements économisant l'énergie obtenue dans les études existantes.

Lorsque le progrès technique permettant d'économiser l'énergie est plus lent, les conclusions empirent. Par exemple dans le cas de la France et du Japon. Si par exemple, le progrès technique est de 1% et si nous autorisons la productivité marginale de l'investissement à varier de 0,3 à 1, alors le taux de variation de la productivité marginale de l'investissement nécessaire pour compenser la diminution de l'offre d'énergie de 1% est de 0,92% à 0,97%. Les valeurs sont plus faibles que dans le cas des États-Unis. Toutefois, elles fournissent des résultats relativement optimistes si nous extrapolons le changement structurel enregistré dans la dérivée première de la production par rapport à l'investissement en équipement par habitant dans le cas de la France ou le cas du Japon, qui sont comparables à ceux obtenus dans le cas des États-Unis ou le cas du Royaume-Uni. Dans le cas franco-japonais, la faible vitesse du progrès technique économisant l'énergie semble être compensée par le progrès technique dans le secteur du capital physique.

4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons fourni une évaluation empirique et une modélisation théorique du progrès technique permettant d'économiser l'énergie, en relation avec l'accumulation du capital et la productivité du capital. Nous avons construit et simulé un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique incorporé économisant l'énergie, et la complémentarité entre énergie et capital. Le modèle incorpore un mécanisme endogène de remplacement du capital que nous avons étudié dans un contexte de réduction de la consommation d'énergie. L'âge de remplacement baisse lorsque la production de long terme augmente. De plus, le gain de production issu du remplacement sera plus important si pendant ce temps la productivité marginale de l'investissement s'accroît. Nous avons analysé dans quelle mesure les subventions à l'investissement peuvent contrebalancer la perte de production induite par une réduction de la consommation d'énergie.

Deux enseignements principaux peuvent être tirés de cette analyse : premièrement, notre modèle n'engendre pas de la croissance à long terme. Ce comportement s'explique d'une part, par l'hypothèse des rendements d'échelles décroissant pour les biens de tech-

nologies intermédiaires; et d'autre part parce qu'ici, nous obtenons que l'âge optimal de remplacement et l'économie d'énergie provenant le progrès technologique ne sont pas assez forts pour inverser la tendance de rendements d'échelles décroissant. La raison est que nous avons considéré une fonction d'utilité instantanée. Par conséquent, le taux d'intérêt est constant à la longue. En accord avec les résultats de Terborgh [1949] et Smith [1961], l'âge optimal est également constant le long du sentier de croissance équilibré.

Si l'augmentation de la productivité marginale de l'investissement, détectée dans notre étude empirique était permanente, notre modèle aurait alors prédit que la perte de production due à une réduction de la consommation d'énergie est vraisemblablement compensée par cette tendance, même pour les pays ayant un faible progrès technique économisant l'énergie (par exemple la France). Les gains de production obtenus par l'accélération du remplacement *via* les subventions à l'investissement sont relativement faibles, en particulier dans les pays où les biens d'investissement sont moins productifs et où il y a un faible progrès technique économisant l'énergie.

En considérant la règle optimale d'investissement à long terme, le coût d'escompte est aussi constant parce que l'effet du progrès technologique économisant de l'énergie est compensé par l'approvisionnement en énergie disponible décroissant. Par conséquent, comme le coût marginal d'achat est constant, il en va de même pour l'investissement le long du sentier de croissance équilibré. Ce résultat n'est pas courant. Dans le cas des modèles néoclassiques, nous aurions de la croissance exogène. En outre, vu la technologie linéaire, Boucekine et al [1997,1998] ont développé deux modèles à génération de capital, avec progrès technologique exogène, générant de la croissance et pour lesquels l'âge optimal de remplacement reste constant le long du sentier de croissance équilibré. Au contraire, notre problème suppose une technologie non linéaire.

Même si le combustible fossile est un input essentiel dans toutes les économies modernes, les limites liées à sa disponibilité et la stabilisation des gaz à effet de serre requièrent une réduction de l'utilisation d'énergie de combustible fossile. Cette réduction entraîne un arbitrage entre la réduction d'énergie et la croissance économique. Cependant, si la conservation d'énergie est augmentée par des technologies générant des économies d'énergie, cet arbitrage pourrait être moins importante. En particulier, nous avons analysé un dispositif important de cette hypothèse : le recours à un impôt sur les dépenses énergétiques des entreprises pour financer des investissements dans les technologies d'économie d'énergie. Nous avons concentré notre analyse sur les conséquences de longue terme des modifications de l'impôt sur les dépenses énergétiques. En outre, nous avons réalisé des exercices de statique comparative : l'effet d'une variation du progrès technologique non incorporé dans l'offre d'énergie. Nous avons constaté que notre modèle est très riche pour capter les différents éléments qui affectent le comportement de long terme. En particulier,

nous précisons le sujet habituellement oublié du remplacement de la technologie, qui joue un rôle important dans les débats sur le changement technologique. Une conséquence importante de la prise en compte d'un tel effet de remplacement est qu'une augmentation d'un impôt déjà élevé sur les dépenses énergétiques n'induit pas un remplacement plus tôt des machines.

Évidemment, notre analyse a quelques limites. La restriction principale ici est l'acceptation de l'hypothèse d'offre l'énergie exogène améliorant le progrès technologique. Il est clair qu'un impôt sur les dépenses énergétiques des sociétés produit des effets au delà du progrès technologique. De plus, notre modèle n'a pas de croissance à long terme. Quelques études dans la littérature utilisant un progrès technologique endogène de ce type sont, par exemple, Buonnano, Carraro et Galeotti (2003). Comme nous avons utilisé un modèle d'équilibre général, une possibilité pour mettre en application cette idée est de considérer par exemple le secteur de R&D (voir le Loschel, 2002). Une autre extension intéressante pourrait être l'inclusion d'un secteur de raffinerie de pétrole. En effet, si l'offre d'énergie devient endogène, le comportement des prix de l'énergie serait plus réaliste, particulièrement le court terme. Ces deux prolongements amélioreraient notre modèle pour décrire la transition vers le sentier de croissance équilibré.

La dépendance des économies développées des sources d'énergies fossiles a été source d'inquiétude pendant les dernières décennies pour nombreux économistes. On observe que, depuis le premier choc pétrolier, la structure énergétique des économies, surtout dans les pays développés, a beaucoup changé. Des sources d'énergie comme le gaz naturel et l'électricité primaire ont été progressivement substituées au charbon et au pétrole. La relation autrefois étroite entre la croissance économique, la demande d'énergie et les effets sur l'environnement s'est considérablement modifiée dans l'ensemble des pays et l'on note que les évolutions de la consommation d'énergie sont différentes à la fois selon les pays et selon les secteurs d'activités (résidentiel, industriel, commercial et transport, etc.). Par exemple, Criqui [1994] a constaté que les trajectoires énergétiques des pays sont sensiblement différentes. Par ailleurs, la revue *Energy Journal* [1999], dans un numéro spécial, a montré que le découplage énergie-croissance économique supposé autrefois acquis pour les pays développés est aujourd'hui moins marqué. En fait, c'est sur la catégorie des combustibles pour l'utilisation stationnaire que l'on peut constater un découplage clair. Notons qu'un changement dans la structure de la consommation d'énergie a un effet important pour les émissions de polluants. Il est par conséquent intéressant de prendre en compte la structure énergétique dans l'étude de l'interaction entre croissance économique et énergie dans la perspective du changement climatique.

S'agissant de ressources non renouvelables, leur épuisement éventuel est certain. La théorie de la gestion efficace des ressources naturelles enseigne que l'offre de ces ressources

reflète les anticipations sur l'évolution future des déterminantes de la demande (croissance économique, prix de l'énergie d'origine alternative) et des conditions de la production (technologie déterminant les coûts d'extraction, de transport et de conversion, découvertes et mise en exploitation de gisements). Typiquement, un grand nombre d'études théoriques se concentrent sur les dynamiques d'exploitation des ressources disponibles en traitant le changement technique comme exogène (par exemple, Chakravorty et al. [1997, 2003]). D'autres analyses simplifient le modèle du côté de l'offre de ressources pour focaliser l'attention sur les déterminants de l'innovation et du progrès technique. Smulders et de Nooji [2003], par exemple, considèrent l'offre de ressource fossile comme constante et exogène, alors que Gerlagh [2003] suppose que cette offre se réduit inéluctablement, mais à un taux exogène. D'autres auteurs étudient les déterminants de l'investissement socialement optimal en R&D dans les sous-secteurs de l'industrie énergétique, soit d'origine fossile, soit non-polluant, conjointement à la détermination de l'offre de ressource fossile. Ces études se limitent à l'analyse normative dans un domaine (le changement technique) caractérisé par d'importantes externalités.

Références

- ARTHUR, B. (1989): “Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Small Events,” *Economic Journal*, 99, 116–131.
- AZOMAHOU, T., R. BOUCEKKINE, AND P. NGUYEN VAN (2003): “Energy Consumption, Technological Progress and Economic Policy,” IRES Discussion Paper 2003-25, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- BAILEY, A. (2002): “European environmental taxes and charges: economic theory and policy practice,” *Applied Geography*, 22, 235–251.
- BOUCEKKINE, R., M. GERMAIN, AND O. LICANDRO (1997): “Replacement Echoes in the Vintage Capital Growth Model,” *Journal of Economic Theory*, 74, 333–348.
- BOUCEKKINE, R., M. GERMAIN, O. LICANDRO, AND A. MAGNUS (1998): “Creative Destruction, Investment Volatility, and the Average Age of Capital,” *Journal of Economic Growth*, 3, 361–384.
- BOUCEKKINE, R., AND A. POMMERET (2004): “Energy-Saving Technical Progress and Optimal Capital Stock: The Role of Embodiment,” *Economic Modelling*, 21, 429–444.
- BUONANNO, P., C. CARRARO, AND M. GALEOTTI (2003): “Endogenous Induced Technical Change and the Costs of Kyoto,” *Resource and Energy Economics*, 25, 11–34.
- CHAKRAVORTY, U., B. MAGNÉ, AND M. MOREAUX (2003): “From Coal to Clean Energy: Hotelling with a Limit on the Stock of Externalities,” *IDEI working paper*, 229.
- CHAKRAVORTY, U., J. ROUMASSET, AND K. TSE (1994): “Endogenous Substitution among Energy Resources and Global Warming,” *Journal of Political Economy*, 105, 1201–1234.
- CONRAD, K. (2001): “Computable General Equilibrium Models in Environmental and Resource Economics,” Beiträge zur angewandten Wirtschaftsforschung 601-01. Institut für Volkswirtschaftslehre und Statistik, Mannheim University.
- CRQUI, P. (1994): “Energy Crises and Economic Crisis: A Long-Period Perspective,” *Energy Studies Review*, 6, 34–46.
- DAVID, P. (1985): “Clio and the Economics of QWERTY,” *American Economic Review*, 75, 332–337.
- FEICHTINGER, G., R. HARTL, P. KORT, AND V. VELIOV (2005): “Environmental policy, the Porter hypothesis and the composition of capital: effects of learning and technological progress,” à paraître dans *Journal of Environmental Economics and Management*.
- GERLAGH, R., B. VAN DER ZWAAN, M. HOFKES, AND G. KLAASSEN (2004): “Impacts of CO₂ Taxes When There Are Niche Markets and Learning by Doing,” *Environmental and Resource Economics*, 28, 337–394.

- GOULDER, L., AND K. MATHAI (2000): "Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change," *Journal of Environmental Economics and Management*, 39, 1–38.
- GOULDER, L., AND S. SCHNEIDER (1999): "Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies," *Resource and Energy Economics*, 21, 211–253.
- GRUBB, M., AND D. ULPH (2002): "Energy, the environment and innovation," *Oxford Review of Economic Policy*, 18, 92–106.
- HICKS, J. (1932): *The Theory of Wages*. Macmillan, London.
- LEMIALE, L., AND P. ZAGAMÉ (1998): "Taxation de l'énergie, efficience énergétique et nouvelles technologies: les effets macroéconomiques pour six pays de l'Union européenne," in *L'environnement: une nouvelle dimension de l'analyse économique*, ed. by K. Schubert, and P. Zagamé, chap. 11. Vuibert, Paris.
- LÖSCHEL, A. (2002): "Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey," *Ecological Economics*, 43, 105–126.
- MALCOMSON, J. (1975): "Replacement and the Rental Value of Capital Equipment Subject to Obsolescence," *Journal of Economic Theory*, 10, 24–41.
- MULDER, P., H. L. F. DE GROOT, AND M. W. HOFKES (2003): "Explaining Slow Diffusion of Energy-Saving Technologies; A Vintage Model with Returns to Diversity and Learning-by-Using," *Resource and Energy Economics*, 25, 105–126.
- NELSON, R., AND S. WINTER (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge.
- OATES, W. E., K. PALMER, AND P. R. PORTNEY (1993): "Environmental Regulation and International Competitiveness: Thinking about the Porter Hypothesis," *Discussion paper 94-02*.
- PALMER, K., W. E. OATES, AND P. R. PORTNEY (1995): "Tightening Environmental Standards: The Benefit-Cost or the No-Cost Paradigm?," *Journal of Economic Perspectives*, 9, 119–132.
- POPP, D. (2001): "The Effect of New Technology on Energy Consumption," *Resource and Energy Economics*, 23, 215–239.
- PORTER, M. E. (1991): "America's Green Strategy," *Scientific America*, 264, 168.
- PORTER, M. E., AND C. VAN DER LINDE (1995): "Toward a New Conception of the Environmental Competitiveness Relationship," *Journal of Economic Perspectives*, 9, 97–118.
- RESOURCE AND ENERGY ECONOMICS (2003): "Endogenous Technical Change in Environmental Macroeconomics," *numéro spécial*.
- RICCI, F. (2004): "Channels of transmission of environmental policy to economic growth: a survey of the theory," *Fondazione Mattei Working Paper n. 52-04*.

- RUTTAN, V. (1997): “Induced Innovation Evolutionary Theory and Path Dependence: Sources of Technical Change,” *Economic Journal*, 107, 1520–1529.
- SAKELLARIS, P., AND D. J. WILSON (2003): “Quantifying Embodied Technological Change,” *Review of Economic Dynamics*, à paraître.
- SCHUMPETER, J. (1942): *Capitalism, Socialism and Democracy*. Harper, New York.
- SMITH, V. (1961): *Investment and Production: A Study in the Theory of the Capital-Using Enterprise*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- SMULDERS, S., AND L. BRETSCHGER (2000): “Explaining Environmental Kuznets Curves: How Pollution Induces Policy and New Technologies,” Center for Economic Research working paper no. 2000–95.
- SMULDERS, S., AND M. NOOIJ (2003): “The Impact of Energy Conservation on Technology and Economic Growth,” *Resource and Energy Economics*, 25, 59–79.
- SOLOW, R. (1959): *Investment and Technological Progress*, in Arrow K., Karlin S., Suppes P. (eds.). *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Stanford University Press.
- SOLOW, R., J. TOBIN, C. VON WEIZSACKER, AND M. YAARI (1966): “Neoclassical Growth with Fixed Factor Proportions,” *Review of Economic Studies*, 33, 79–115.
- TERBORGH, G. (1949): *Dynamic Equipment Policy*. Machinery and Allied Products Institute, Washington D.C, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- WEYANT, J., AND T. OLAVSON (1999): “Issues in Modeling Induced Technological Change in Energy, Environment, and Climate Change,” *Environmental Modeling and Assessment*, 4, 67–85.
- XEPAPADEAS, A., AND A. DE ZEEUW (1999): “Environmental Policy and Competitiveness: The Porter Hypothesis and the Composition of Capital,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 37, 165–182.