

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

Projet de recherche

Institut Français de l'Énergie (IFE)  
Université Louis Pasteur, Strasbourg 1 (ULP)  
Bureau d'Économie Théorique et Appliquée  
(BETA, UMR 7522 CNRS)

Projet de rapport final

Février 2004

## **Equipe de recherche**

1. Théophile AZOMAHOU, Maître de conférences, BETA, ULP
2. Raouf BOUCEKKINE, Professeur, IRES et CORE, Université Catholique de Louvain
3. Jean Alain HERAUD, Professeur, BETA, ULP
4. François LAISNEY, Professeur, BETA, ULP; ZEW, Mannheim
5. Phu NGUYEN VAN, Post-doctorant, BETA, ULP

**Responsable scientifique:** Théophile AZOMAHOU

**Correspondant IFE:** Jean-Eudes MONCOMBLE, Directeur Général de l'IFE

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
1.1	Cadrage . . . . .	3
1.2	État des lieux et problématique . . . . .	5
1.3	Synthèse de la démarche . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Analyses empiriques</b>	<b>9</b>
2.1	Données . . . . .	10
2.2	Résultats d'estimation . . . . .	13
2.2.1	Test de stabilité structurelle . . . . .	14
2.2.2	Effet de générations de capital . . . . .	16
2.2.3	Intensité énergétique . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Modélisation théorique et simulation</b>	<b>22</b>
3.1	Éléments de modélisation théorique . . . . .	22
3.2	Politiques économiques: conséquences d'une réduction de la consommation d'énergie . . . . .	24
3.2.1	Réduction de l'offre d'énergie et hausse de la productivité . . . . .	24
3.2.2	Réduction de l'offre d'énergie et hausse de la subvention . . . . .	25
3.3	Simulation . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>Annexes: Retombées scientifiques</b>	<b>29</b>
5.1	Communications à des conférences . . . . .	29
5.2	Publications . . . . .	29

# 1 Introduction générale

## 1.1 Cadrage

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 en **deux phases** (qui s'étalent sur deux années) 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. Ce partenariat a pour objectif d'allier les compétences en économie de l'énergie et de l'environnement et en économétrie pour proposer des éléments de réponse aux questions suivantes :

1. Comment évaluer sur empiriquement les déterminants du lien entre la croissance économique et la consommation d'énergie?
2. Quelle modélisation économique peut-on proposer pour rendre compte au mieux de la complexité de la relation entre croissance économique, consommation d'énergie et progrès technique?
3. Les normes énergétiques pénalisent-elles l'activité économique? Le cas échéant, l'instrument fiscal est-il efficace pour compenser la perte de productivité induite?

Le présent rapport soumis au comité d'évaluation vient en complément du rapport intermédiaire de Septembre 2003. Dans ce cadre, il porte sur la **première phase** du projet de recherche visant à modéliser (un contexte de "croissance exogène") de manière théorique et empirique, le lien entre croissance économique, consommation d'énergie et normes environnementales.

La **deuxième phase** du projet pour laquelle un financement est maintenant demandée, concernera la modélisation théorique et empirique en situation de "croissance endogène". Cette deuxième phase abordera, dans un modèle de croissance endogène à *générations de capital*, deux questions importantes: (i) les effets sur la croissance économique du passage optimal d'un régime technologique à un autre, et (ii) le lien entre la consommation d'énergie, les émissions des gaz à effet de serre et la croissance économique. À ce stade, nous distinguerons deux types de progrès technique endogène: le progrès technique améliorant la productivité du capital et celui économisant l'énergie. Ainsi, la première question étudiera la dynamique de l'économie (trajectoire de la croissance économique et trajectoire énergétique) en présence des sauts technologiques endogènes stimulés par les normes environnementales. La deuxième question discutera

le problème d'économie d'énergie et de substitution entre différents types d'énergie (énergies fossiles, énergies renouvelables) dans un contexte de réduction de gaz à effet de serre (protocole de Kyoto). En effet, la quantité des émissions de gaz à effet de serre (en particulier le CO<sub>2</sub>) varie selon le type d'énergie utilisée. Par ailleurs, la réduction d'émissions de gaz à effet de serre peut se faire en économisant la consommation d'énergie.<sup>1</sup> Dans une étude récente (Azomahou *et alii* [2001]), nous avons montré que la relation entre émissions de CO<sub>2</sub> et PIB par habitant est monotone croissante. Ce résultat est statistiquement robuste et contredit plusieurs études existantes dans la littérature. Il serait alors intéressant d'étudier l'interaction entre la croissance économique, les émissions de CO<sub>2</sub> et les aspects liés à la consommation d'énergie (substitution entre différents types d'énergies, économie d'énergie) pour pouvoir dégager des conclusions claires et les plus générales possibles sur la possibilité de réduction de gaz à effet de serre.

\*  
\*   \*   \*

Ce rapport expose les données utilisées dans l'étude empirique, les résultats d'analyse des données, la modélisation théorique et les éléments de politique économique. Il présente également les contributions scientifiques auxquelles les résultats ont donné lieu. Une contribution majeure est la réalisation d'un article de recherche (voir Azomahou *et alii* [2003]) paru dans des documents de travail de l'Institut de Recherches Économiques et Sociales (IRES) de l'Université Catholique de Louvain (UCL, Louvain-la-Neuve, Belgique) et à paraître dans les documents de travail du *Centre for Operations Research and Econometrics* (CORE, UCL) et du BETA (ULP). Cet article a été soumis pour publication dans une revue internationale à comité de lecture. Il est rédigé en anglais pour permettre une large diffusion auprès de la communauté scientifique et a déjà été présenté à des conférences. 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.

Le rapport est organisé comme suit. La deuxième section présente les données utilisées dans l'analyse empirique. Nous avons exploité les données de base ENERDATA.

---

1. La consommation d'énergie ( $E$ ), la production (ou le PIB) et les émissions de CO<sub>2</sub> (un des principaux gaz à effet de serre) sont liées par la relation  $\text{CO}_2/\text{PIB} = (\text{CO}_2/E) \times (E/\text{PIB})$  (voir, par exemple, Roca et Alcántara [2001], Sun [1999]). Cette relation signifie que l'intensité du carbone ( $\text{CO}_2/\text{PIB}$ ) se décompose en deux facteurs, l'indice de carbonisation ( $\text{CO}_2/E$ ) et l'intensité énergétique ( $E/\text{PIB}$ ). Une action sur l'indice de carbonisation (par exemple, substituer les énergies "propres" aux énergies polluantes) ou sur l'intensité énergétique (par exemple, économiser l'énergie) permettrait ainsi de modifier l'intensité du carbone de l'économie.

La troisième section expose la modélisation théorique et la simulation qui est réalisée sur la base des résultats théoriques. La section 4 conclut le rapport. Le rapport fournit en annexe des informations sur les retombées scientifiques de cette première phase de recherche. Dans ce qui suit, nous présentons l'état des lieux et définissons la problématique de la recherche.

## 1.2 État des lieux et problématique

La relation entre la croissance économique et les régulations environnementales est source d'un débat conflictuel qui est loin d'être une curiosité académique. En effet, ce débat motive certaines recommandations d'experts en économie de l'environnement en faveur d'un contrôle étroit de la croissance économique en vue de protéger l'environnement naturel (voir, par exemple, le rapport Meadows *et alii* [1972] au Club de Rome).

Au niveau des entreprises, la performance économique a longtemps été considérée comme incompatible avec la performance environnementale (Walley et Whitehead [1994]). Pour une entreprise ayant des coûts élevés, s'accommoder avec une législation environnementale en vigueur est souvent envisagé comme un désavantage compétitif. Par le passé, comme les entreprises se concentraient généralement sur les technologies en aval (*end-of-pipe technologies*) pour contrôler la pollution et améliorer la qualité de l'environnement, les investissements dans la protection de l'environnement représentaient un coût supplémentaire (voir Cohen *et alii* [1995]). Wagner *et alii* [2002] ont mis en évidence l'existence d'un arbitrage entre performance économique et performance environnementale pour les entreprises européennes du secteur du papier. Plus précisément, les auteurs ont trouvé une relation décroissante entre une mesure de la performance économique (rendements du capital utilisé) et un indicateur environnemental composite construit à partir des émissions de SO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de la demande chimique en oxygène des entreprises allemandes, italiennes, néerlandaises et britanniques pour la période 1995-1997.

Récemment, on a vu émerger une position opposée, connue sous le terme d'*hypothèse de Porter*, selon laquelle 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]). 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.<sup>2</sup>

---

2. Il existe deux versions de l'hypothèse de Porter. La version *forte* énonce que certains types de régulation environnementale stimulent l'innovation, alors que la version *faible* implique que la

Cependant, cette position a été critiquée par Oates *et alii* [1993] et Palmer *et alii* [1995] pour son manque de fondement théorique rigoureux. En particulier, ces auteurs ont souligné que la réglementation environnementale n'est pas forcément bénéfique aux entreprises.

Dans une étude récente, Ambec et Barla [2002] ont proposé un fondement théorique de l'hypothèse de Porter en utilisant un mécanisme de jeu basé sur un modèle de renégociation (voir Shappington [1983], Beaudry et Poitevin [1995]). Comme le régulateur a la possibilité d'augmenter la production à un niveau socialement efficace, les technologies moins productives et plus polluantes sont moins attractives. En conséquence, par la réduction de coûts, une régulation plus stricte encourage des innovations en faveur de l'environnement et augmente en même temps le profit des entreprises. Jaffe et Palmer [1997] ont trouvé des résultats incompatibles avec la version forte de l'hypothèse de Porter, mais compatibles avec sa version faible, pour des entreprises dans le secteur manufacturier américain.<sup>3</sup>

Ce débat a eu un écho important dans les discussions concernant le changement climatique, notamment l'impact du *protocole de Kyoto* sur l'activité économique. Plusieurs modèles ont été élaborés pour simuler les conséquences économiques du protocole de Kyoto.<sup>4</sup> Selon Böhringer et Vogt [2003], le protocole de Kyoto n'est rien d'autre qu'une affaire ordinaire (*business-as-usual*) qui n'implique pas de coûts significatifs pour les parties qui l'ont ratifié. Certains modèles climatologiques suggèrent que, à très long terme, l'effort demandé par le protocole de Kyoto n'aura qu'un faible impact sur le climat (sur un siècle, cet effort permettra une baisse de température inférieure à 0,2 degré). De plus, des modèles agrégés d'optimisation des politiques climatiques recommandent un effort beaucoup moins ambitieux car selon eux, d'une part, les dommages futurs causés par le réchauffement climatique sont faibles et, d'autre part, les coûts économiques seront très importants (environ quatre fois plus élevés que les coûts de l'effet de serre en l'absence de toute intervention) pour pouvoir atteindre un objectif plus ambitieux, c'est-à-dire de limiter la hausse de température à 1,5 degré en 2100.<sup>5</sup>

---

régulation environnementale stimule certains types d'innovation.

3. On peut se reporter à Jaffe *et alii* [2002] pour une revue de littérature sur la validation empirique de l'hypothèse de Porter.

4. Adopté en 1997 à Kyoto, ce protocole, qui impose aux pays industriels de réduire leurs émissions de gas à effet de serre (notamment le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>) de 5,2% d'ici à 2012, par rapport au niveau de 1990, semble avoir une application mitigée, surtout suite au refus des États-Unis de le ratifier.

5. Voir Guesnerie [2003]. On peut également se référer au numéro spécial de la revue *The Energy Journal* [1999], "The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation" pour une discussion sur l'impact économique du protocole de Kyoto.

Cependant, selon Guesnerie [2003], compte tenu des limites de ces modèles, on peut conclure que l'impact économique du protocole de Kyoto n'a pas été évalué de façon satisfaisante du point de vue de l'analyse coûts-bénéfices.

Un intérêt croissant a été porté sur la capacité des politiques publiques à réduire la consommation d'énergies fossiles. Ainsi, la compréhension de la relation entre des régulations environnementales bien conçues, le progrès technique et la croissance économique est importante en matière de politique économique et environnementale.<sup>6</sup> La théorie économique néo-classique énonce qu'une augmentation du prix de l'énergie entraîne un changement technologique permettant de produire plus de biens qui sont moins intensifs en énergie. Cette conjecture est connue sous l'hypothèse d'innovation induite, introduite par Hicks [1932]. Elle suggère que l'augmentation du prix de l'énergie améliore l'efficacité énergétique (définie par l'inverse de l'intensité énergétique, c'est-à-dire le rapport entre la quantité énergétique consommée et la quantité de biens produits). Le mécanisme d'induction à travers lequel opère l'énergie amène les entreprises à développer et à diffuser des produits dont l'utilisation permet de produire plus avec une moindre consommation d'énergie. La question se pose alors de savoir pourquoi les entreprises ont-elles besoin d'une réglementation environnementale plus stricte pour adopter des innovations propres permettant d'augmenter leur profit? Un des objectifs théoriques de cette recherche est de fournir des éléments de réponse à cette question.

Une revue de littérature sur l'évidence de l'hypothèse d'innovation induite est donnée dans Jaffe *et alii* [2000,2002]. Pour tester cette hypothèse, Newell *et alii* [1999] ont développé un cadre empirique qui incorpore les aspects de régulation environnementale concernant les biens durables aux États-Unis. Les auteurs ont trouvé que le prix de l'énergie n'a aucun impact sur le taux d'innovation. En revanche, les changements de prix ont un impact sur la commercialisation de nouveaux produits et sur l'élimination des anciens. Plus précisément, une part substantielle de l'innovation est autonome et une part plus petite, mais significative, est due aux changements dans le prix de l'énergie.

De manière théorique, Xepapadeas et de Zeeuw [1999] ont utilisé un modèle dans lequel les entreprises ont la capacité d'investir dans des machines présentant des caractéristiques différentes, où les nouvelles machines sont plus productives et moins polluantes, mais plus coûteuses que les anciennes.<sup>7</sup> Ils ont également trouvé qu'une

---

6. La discussion concernant ce sujet est résumée dans Jaffe *et alii* [2002] et Löschel [2002].

7. Xepapadeas et de Zeeuw [1999] ont argumenté que les nouvelles machines sont plus productives que les anciennes car elles incorporent une technologie supérieure. Cependant, dans le cadre de leur modèle, il semble que cet argument ne soit pas correctement démontré (voir Feichtinger *et alii* [2001]).

politique environnementale plus stricte ne résulte pas en une situation *win-win* dans l'esprit de l'hypothèse de Porter où une réduction des émissions est associée à une augmentation du profit. De fait, l'arbitrage entre l'environnement et le profit est moins fort qu'en l'absence de cette politique environnementale.

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.<sup>8</sup> 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 (CEK).<sup>9</sup>

Dans cette recherche, nous adoptons un point de vue plus simple. En particulier, nous ne visons pas le débat sur l'hypothèse d'innovation induite. Nous nous centrons sur la question suivante: étant donnée la vitesse *observée* du progrès technique économisant l'énergie, et étant donnée la tendance *observée* de la productivité des biens physiques, dans quelle mesure les économies nationales peuvent-elles supporter la réduction de la consommation d'énergie comme prévu, par exemple, dans le cadre du protocole de Kyoto? Existe-il des politiques fiscales permettant de répondre à cette contrainte? En adoptant cette approche, nous omettons le secteur recherche et développement, et prenons le progrès technique comme observé.

### 1.3 Synthèse de la démarche

Nous présentons d'abord les études empiriques réalisées à partir de la base de données ENERDATA. Ces données couvrent la période 1971-1999 et contiennent un grand nombre de pays. Dans les pays de l'OCDE, nous observons une nette tendance à la réduction de la consommation d'énergie. En utilisant des méthodes économétriques

---

La modélisation du progrès technique incorporé que nous adoptons dans notre étude ainsi que celle de Feichtinger *et alii* [2001] (modèle à générations de capital) permettent de remédier à ce problème.

8. 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.

9. Le nom donné à ce type de courbe se réfère à la relation en U inversé entre l'inégalité de la distribution des revenus et le revenu par habitant, mise en évidence par Kuznets [1955]. L'existence d'une telle relation pour un indicateur environnemental signifie que la dégradation de l'environnement, mesurée par cet indicateur, augmente pour de faibles niveaux du revenu par habitant, puis se stabilise lorsque le revenu par habitant se situe à un certain seuil (appelé point de retournement) au-delà duquel elle diminue.



semi-paramétriques sur données de panel, nous observons également une accélération claire de la productivité marginale du capital dans la période 1985-1999 par rapport à la période 1971-1984. A l’opposé, et en accord avec l’étude de Newell *et alii* [1999], nous n’avons trouvé aucune corrélation entre l’intensité énergétique et le prix de l’énergie.

En nous basant sur ces résultats empiriques, nous construisons et calibrons un modèle à générations de capital avec progrès technique incorporé économisant l’énergie. L’énergie et le capital sont complémentaires, et nous employons une fonction de production de type Leontief, fréquemment adoptée dans la littérature sur les modèles d’équilibre général avec générations de capital. Notre modélisation a deux caractéristiques essentielles. La première est l’exogénéité de la croissance. Cet aspect est parfaitement compatible avec les objectifs de cette étude dans la mesure où nous voulons étudier les conséquences d’une restriction de la consommation d’énergie sur la tendance technologique. La seconde caractéristique renvoie à un mécanisme d’obsolescence et de remplacement des machines. En effet, pour la spécification de type Leontief, il serait optimal de remplacer les machines moins efficaces (par exemple, celles qui consomment plus d’énergie) par des machines plus efficaces, et ce à une date finie.

Ce mécanisme de remplacement et ses implications sur la dynamique d’investissement ont été récemment étudiés en détail dans le contexte de progrès technique neutre au sens de Harrod (voir, par exemple, Boucekkine *et alii* [1997]). Une présentation élémentaire de ce mécanisme lorsque le progrès technique économise l’énergie est donnée dans Boucekkine et Pommeret [2003]. Dans ce contexte, moins l’âge du capital lors du remplacement est élevé, plus importante sera la production. De plus, le gain de production dû au remplacement des machines sera plus grand si en même temps la productivité marginale de l’investissement augmente. Les politiques économiques peuvent expliquer le mécanisme de remplacement. Elles pourront être des subventions directes au remplacement (ou simplement des subventions à l’investissement). Nous étudions la performance de ces instruments et la quantifions en fonction de la vitesse du progrès technique économisant l’énergie et en fonction de la productivité marginale de l’investissement.

## 2 Analyses empiriques

Ce chapitre a pour objectif de quantifier de manière empirique l’effet de générations de capital et l’intensité énergétique. Les résultats seront utiles dans la construction du modèle théorique et la simulation des politiques économiques. Nous effectuons des estimations non-paramétriques de la relation entre la production et l’investissement et

des estimations de la relation entre l'intensité énergétique et le ratio de l'investissement dans le PIB. Le choix de l'approche non-paramétrique assure que les hétérogénéités et les non-linéarités éventuelles dans ces relations sont prises en compte. Dans ce qui suit, nous présentons les données et les variables utilisées. Les spécifications économétriques sont présentées en détails dans le document "article" joint (Azomahou *et alii* [2003]).

## 2.1 Données

Les données sont extraites de la base ENERDATA et comprennent la production, l'investissement et la consommation d'énergie. Nous utilisons la formation brute de capital fixe (FBCF) comme un *proxy* de l'investissement productif (investissement en équipement). La production est mesurée par le PIB. FBCF et PIB sont mesurés en millions de dollars américains en parité de pouvoir d'achat (PPA) constante en 1995. Ce choix d'unité de mesure rend les données comparables entre pays car la PPA élimine les différences de prix entre pays. Il permet aussi d'avoir une comparaison plus stable en termes d'intensité énergétique.

Concernant la consommation d'énergie, nous utilisons la consommation totale d'énergie primaire (exprimée en milliards de tonnes d'équivalent pétrole). La consommation d'énergie primaire est la consommation totale d'énergie nette des pertes d'énergie apparues durant la génération, la transmission et la distribution. Elle comprend les énergies sous formes de combustibles fossiles, de chaleur, d'électricité et de biomasse. Cette définition inclut les énergies générées par la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel, les énergies éolienne, géothermique, nucléaire, solaire et marémotrice. Le prix du pétrole Brent en dollars par baril est utilisé comme un proxy du prix de l'énergie.<sup>10</sup>

La série de la population est également employée pour calculer les valeurs par habitant. Nous définissons les variables suivantes: le PIB par habitant (en milliers de dollars, PPA en 1995), l'investissement par habitant (ou la FBCF par habitant, en milliers de dollars, PPA en 1995), la part de l'investissement (ou le taux d'investissement) dans le PIB (= ratio entre FBCF et PIB) et l'intensité énergétique (ratio entre la consommation d'énergie primaire et le PIB).<sup>11</sup>

La structure des données est de type panel complet (ou cylindré) couvrant la période 1971-1999. L'échantillon contient 55 pays (la liste des pays est donnée dans l'annexe du document "article"). Les observations sur le prix du pétrole ne sont disponibles

---

10. Du fait d'un problème de disponibilité des données, nous ne pouvons pas prendre les prix d'autres types de pétrole. Ces derniers sont cependant affichés en référence au prix du Brent.

11. Il serait intéressant d'analyser l'intensité énergétique par secteur d'activité (résidentiel, manufacturier, commercial et secteur du transport), mais nous ne disposons malheureusement pas de ces données.

TAB. 1 – *Statistiques descriptives*

Variable	Unité	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
FBCF par hab.	PPA, milliers 95\$	4,177	3,561	0,088	21,391
PIB par hab.	PPA, milliers 95\$	19,086	15,339	1,072	89,815
Taux d'invest.	pourcentage	0,214	0,072	0,036	0,623
Intensité éner.	kep*/\$	0,314	0,282	0,024	2,872
Prix du pétrole**	\$/baril	20,461	5,584	12,760	32,860

Notes. Nombre d'observations: 1595 (55 pays, 1971-1999). \*kilo d'équivalent pétrole.\*\*le prix du pétrole est disponible depuis 1982.

qu'à partir de 1982. Le tableau 1 présente les statistiques descriptives. On observe que la FBCF par habitant est en moyenne égale à 4177 dollars. Le montant de la FBCF correspond en moyenne à 21,4% du PIB. Pour la FBCF par habitant, l'écart-type est de 3561 dollars, inférieur à sa moyenne. La moyenne et l'écart-type du PIB par habitant sont respectivement 19086 et 15339 dollars. Les médianes du PIB par habitant et de la FBCF par habitant sont présentées dans la figure 1 et indiquent une évolution similaire durant la période d'étude. Finalement, la moyenne de l'intensité énergétique est de 0,316 kep (kilogrammes d'équivalent pétrole). Les valeurs de la FBCF par habitant, du PIB par habitant, du taux d'investissement et de l'intensité énergétique sont très variables. Les valeurs minimale et maximale sont très différentes; par exemple la FBCF par habitant varie de 88 à 21391 dollars, le PIB par habitant de 1072 à 89815 dollars, alors que l'intensité énergétique varie de 0,024 à 2,872 kep par dollar.

Les figures 2 et 3 illustrent l'évolution de l'intensité énergétique. La figure 2 présente les médianes de l'intensité énergétique des pays de l'OCDE et ceux hors de l'OCDE. Les pays de l'OECD sont généralement les pays les plus industrialisés et les plus avancés économiquement. Nous remarquons que sur la période étudiée, l'intensité énergétique de ces pays a une tendance globale à la baisse, excepté pour les années 1977-1979 et 1989-1993 où on observe une hausse. Une telle tendance n'est pas observée dans les pays non OCDE. Au contraire, pour ces pays, la courbe représentant la médiane présente une allure croissante, reflétant une différence importante dans la structure de production entre les deux groupes de pays.

La figure 3 présente l'évolution de l'intensité énergétique de quatre des pays les plus industrialisés: les États-Unis, la France, le Japon et le Royaume-Uni.<sup>12</sup> Nous observons que les courbes correspondant aux États-Unis et au Royaume-Uni dominent celles de

12. L'Allemagne est exclue de l'échantillon du fait de la rupture des séries due à la réunification.

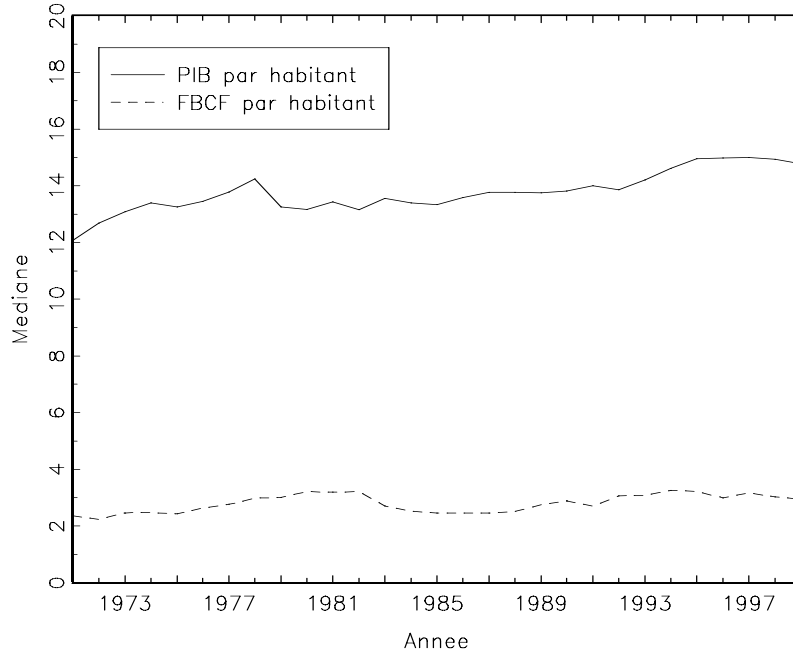


FIG. 1 – Médianes du PIB par habitant et de la FBCF par habitant (milliards de dollars américains en 1995, PPA).

la France et du Japon, ce qui signifie que les économies des États-Unis et du Royaume-Uni sont plus intensives en énergie que celles de la France et du Japon. En outre, l'intensité énergétique décroît fortement durant la période d'étude pour les États-Unis et le Royaume-Uni alors que la France et le Japon ont une évolution assez stable. Il en résulte que l'amélioration de l'efficacité énergétique est plus rapide aux États-Unis et au Royaume-Uni qu'en France et au Japon.

Dans la figure 4, nous présentons l'évolution du prix du pétrole brut Brent. Une chute importante du prix a eu lieu entre 1982 et 1986. Entre 1986 et 1998, le prix du pétrole fluctue mais reste inférieur à 24 dollars par baril. Cette évolution du prix n'apparaît pas corrélée à celle de l'intensité énergétique de l'ensemble des pays (le coefficient de corrélation est de 0,009).

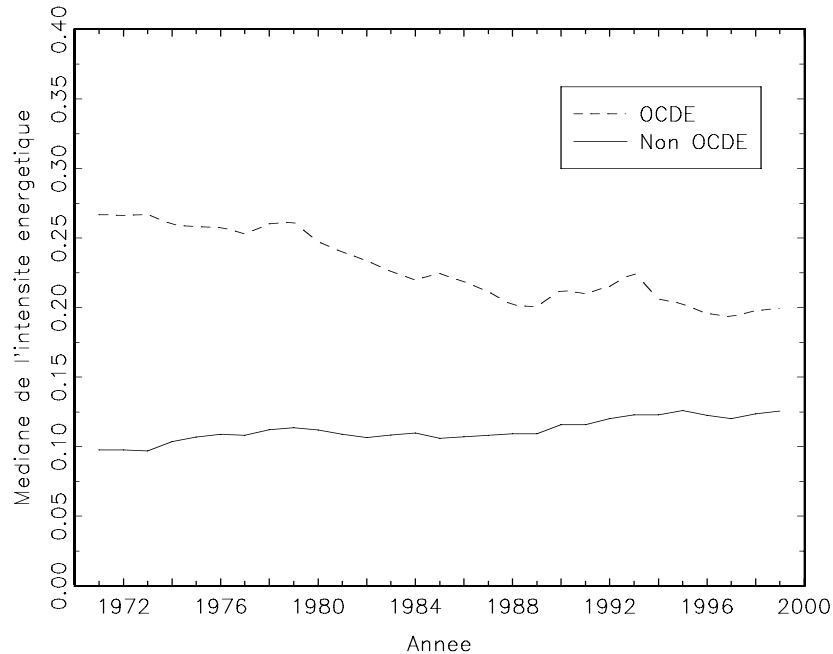


FIG. 2 – Médiane de l'intensité énergétique, OCDE et non-OCDE.

## 2.2 Résultats d'estimation

Nous étudions l'effet de générations de capital et l'efficacité énergétique en estimant: (i) la relation entre la production et l'investissement en équipement (appelée *régression économique*) et (ii) la relation entre l'intensité énergétique, la part de l'investissement en équipement dans le PIB et le prix de l'énergie (appelée *régression énergétique*). Nous utilisons un modèle semi-paramétrique partiellement linéaire comprenant une composante non-paramétrique et une composante paramétrique. La partie non-paramétrique n'impose pas de restriction *a priori* (par exemple linéaire, quadratique, cubique, etc.) sur la forme fonctionnelle entre la variable de réponse et les régresseurs. La composante paramétrique contient les variables de contrôle (par exemple les effets fixes de pays). Cette spécification nous permet de capter l'hétérogénéité et les non-linéarités éventuelles dans nos données. Les détails techniques concernant les méthodes économétriques employées sont présentés dans le document "article" joint.

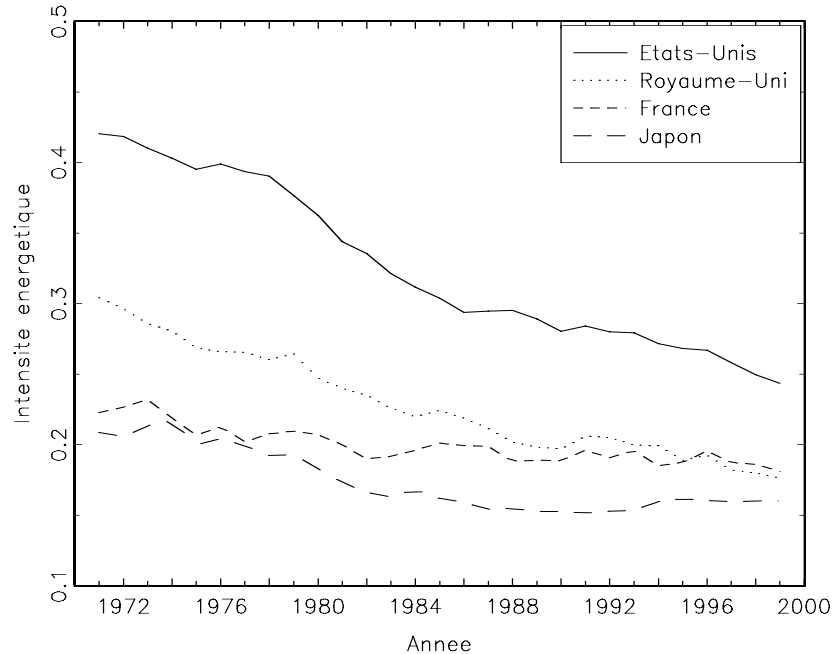


FIG. 3 – *Intensité énergétique, États-Unis, Royaume-Uni, France et Japon.*

### 2.2.1 Test de stabilité structurelle

Nous effectuons d’abord le test non-paramétrique de stabilité de Baltagi *et alii* [1996] sur l’ensemble de la période d’étude 1971-1999 pour, d’une part, la relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant et, d’autre part, celle entre l’intensité énergétique et la part de l’investissement en équipement dans le PIB. Les résultats du test sont donnés dans le tableau 2. Suivant Baltagi *et alii* [1996], la statistique du test est calculée pour différentes valeurs du paramètre de lissage correspondant aux différents choix de  $c \in [0,8; 1,2]$ , où  $c$  est une constante du paramètre de lissage.

L’hypothèse de stabilité structurelle est rejetée au niveau de 5% pour la relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant. Il ressort de ce résultat que la régression économique n’est pas stable sur l’ensemble de la période. Nous calculons ensuite le test pour différentes sous-périodes à partir de 1971 avec les mêmes valeurs du paramètre de lissage, jusqu’à ce que la stabilité soit détectée (c’est-à-dire que l’hypothèse nulle ne soit pas rejetée). Nous obtenons la stabilité pour les sous-périodes 1971-1984 et 1985-1999 comme indiqué dans le tableau 2. Pour chaque sous-période, la

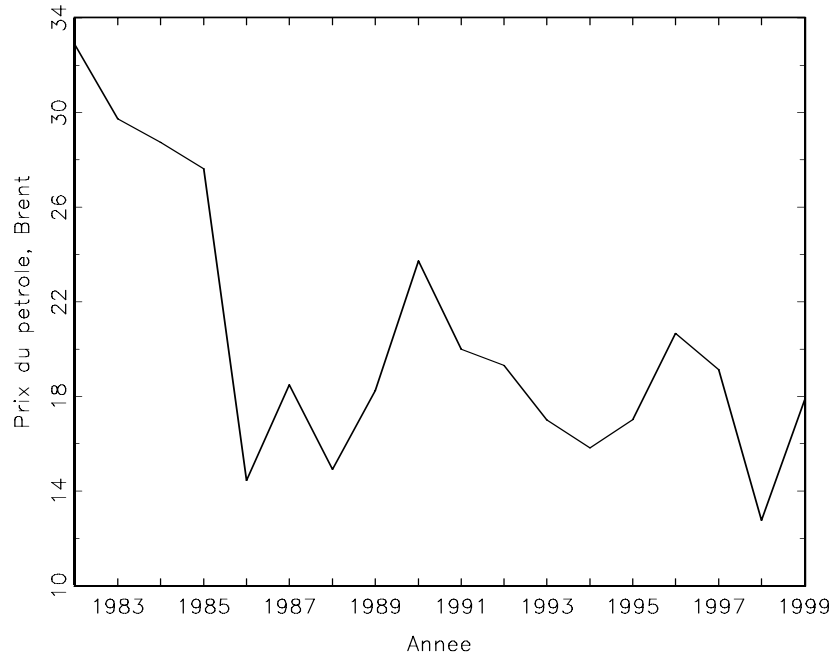


FIG. 4 – *Prix du pétrole brut Brent, en dollars américains par baril.*

relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant ne change pas significativement dans le temps. Nous estimons donc ladite relation pour ces deux sous-périodes séparément. Un changement structurel après 1984 est ainsi mis en évidence, ce qui indique la présence d'un progrès technologique autonome. Ce résultat est intéressant car nous savons que le changement technologique est le canal principal de transmission des effets de générations de capital.

Le test de stabilité montre également que la relation entre l'intensité énergétique et le ratio investissement/PIB est globalement stable sur l'ensemble de la période d'étude (1971-1999). Nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de changement structurel concernant les données énergétiques.

TAB. 2 – *Test non-paramétrique de poolabilité*

Valeur de $c$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Données économiques					
1971-1999	1,017	1,492	1,913*	2,265*	2,553*
1971-1984	-0,577	-0,106	0,361	0,785	1,150
1985-1999	-1,007	-0,835	-0,638	-0,438	-0,241
Données énergétiques					
1971-1999	-2,548	-2,548	-2,555	-2,571	-2,597

Note. \*significativité au niveau de 5% ( $> 1,645$ ).

### 2.2.2 Effet de générations de capital

Les effets de générations sont évalués par l'estimation de la relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant.<sup>13</sup> Les courbes estimées sont présentées respectivement dans les figures 5 et 6 pour les sous-périodes 1971-1984 et 1985-1999.

Les figures 5 et 6 montrent des non-linéarités dans la relation entre le PIB et la FBCF. L'allure de la courbe estimée change d'une sous-période à l'autre, en accord avec les résultats du test de stabilité. Pour la sous-période 1971-1984, la relation est croissante pour toutes les valeurs de la FBCF par habitant, excepté les valeurs supérieures à 12 mille dollars où elle est décroissante. L'aspect croissant de la courbe est encore plus net dans la sous-période 1985-1999 excepté pour les valeurs de la FBCF par habitant entre 17 et 19 mille dollars pour lesquelles la courbe est plutôt plate.

Pour les deux sous-échantillons associés à ces deux sous-périodes, nous présentons dans le tableau 3 les quartiles de la dérivée première estimée. La dérivée première représente l'effet marginal d'une variable explicative sur la variable de réponse. Nous trouvons que l'effet marginal de la FBCF par habitant sur le PIB par habitant (également appelé productivité marginale du capital ou de l'investissement en équipement) est en moyenne positif avec les valeurs moyennes de 1,431 et 1,717 pour les sous-périodes 1971-1984 et 1985-1999 respectivement (les valeurs médianes sont respectivement 1,463 et 1,546). Ce résultat est compatible avec ce que l'on attend de l'effet marginal de l'in-

13. Nous n'étudions pas les aspects dynamiques de la relation production-investissement, ainsi que l'évaluation du progrès technique incorporé, etc. (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 (nous ne disposons malheureusement pas de données concernant les prix au niveau national), etc. En revanche, notre modèle de régression a le mérite d'être considéré comme une relation de long terme entre la production et l'investissement en équipement, ce qui nous permet d'étudier la productivité de long terme et notamment l'existence d'un progrès technique autonome.



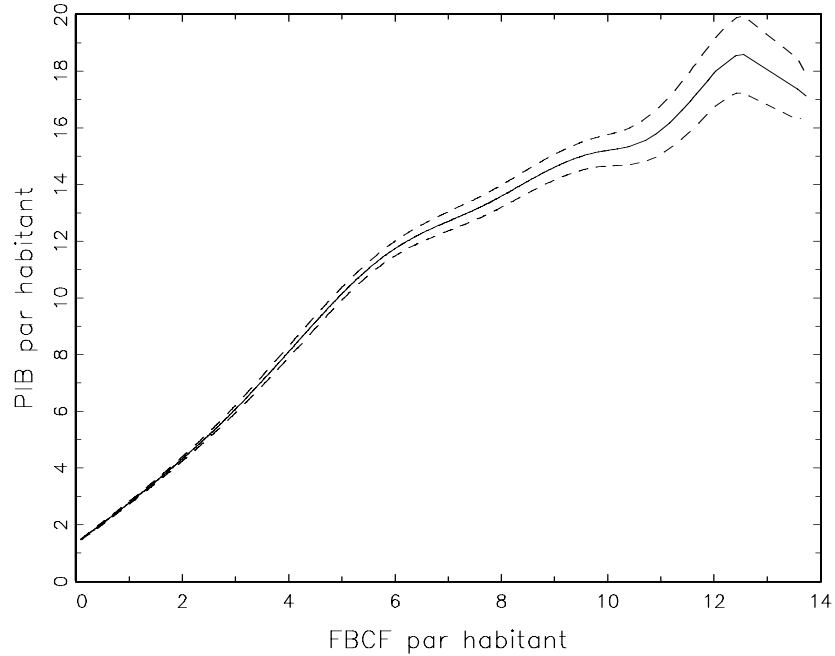


FIG. 5 – *Relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant, 1971-1984. La courbe en trait continu représente l'estimation, et les courbes en trait discontinu correspondent à l'intervalle de confiance point par point 95%.*

vestissement sur le PIB. Finalement, le tableau 4 indique la productivité marginale du capital pour les quatre pays industrialisés que nous avons considérés : la France, le Royaume-Uni, le Japon et les États-Unis. Les valeurs associées à ces pays sont toutes positives et les valeurs correspondantes à la période 1985-1999 sont systématiquement supérieures à celles de la période 1971-1984.

TAB. 3 – *Distribution de la productivité marginale du capital*

Sous-échantillon	Min.	25%	50%	75%	Max.	Moyenne
1971-1984	-1,425	1,189	1,463	1,668	3,675	1,431
1985-1999	2,688	1,477	1,546	1,835	8,332	1,717

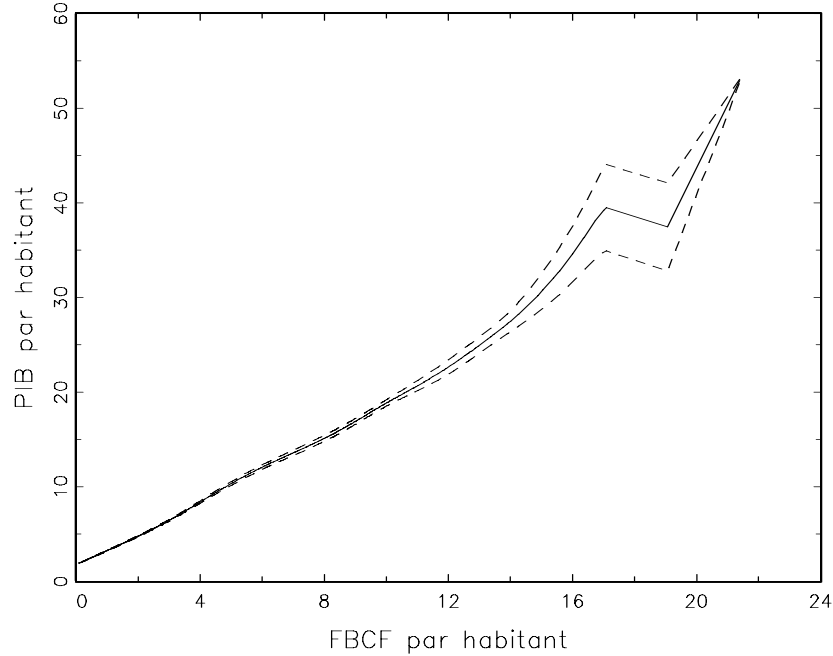


FIG. 6 – *Relation entre le PIB par habitant et la FBCF par habitant, 1985-1999. La courbe en trait continu représente l'estimation, et les courbes en trait discontinu correspondent à l'intervalle de confiance point par point 95%.*

### 2.2.3 Intensité énergétique

Nous présentons dans le tableau 5 le taux de variation de l'intensité énergétique, qui nous renseigne sur l'efficacité énergétique. Une baisse de l'intensité énergétique indique une amélioration de l'efficacité énergétique. Pour l'ensemble de l'échantillon, l'amélioration de l'efficacité énergétique est très faible (le taux de variation moyen est de 0,007). Ceci est principalement dû à un accroissement de l'intensité énergétique dans les pays hors OCDE (le taux de variation moyen est de 0,013) comme l'indiquait déjà la figure 2. Pour les pays de l'OCDE, nous observons une légère amélioration de l'efficacité énergétique (-0,009). En particulier, l'amélioration est plus forte (environ deux fois plus élevée) aux États-Unis et au Royaume-Uni qu'en France et au Japon. Ce résultat a déjà été illustré dans la figure 3.

La figure 7 présente la courbe estimée de la relation entre l'intensité énergétique et la part de l'investissement dans le PIB. L'intensité énergétique augmente pour des valeurs

TAB. 4 – *Moyenne de la la productivité marginale du capital pour la France, le Royaume Uni, le Japon et les États-Unis; régression économique*

Sous-échantillon	France	Royaume-Uni	Japon	États-Unis
1971-1984	0,735	2,056	0,986	0,803
1985-1999	1,943	1,482	2,358	1,950

du ratio investissement-PIB inférieures ou égales à 0,15. Ensuite, elle se stabilise pour les valeurs supérieures à 0,15 (la droite horizontale est contenue dans cet intervalle). L'estimation est très imprécise pour les valeurs supérieures à 0,4 car l'intervalle de confiance non-paramétrique est assez large.

TAB. 5 – *Variation de l'intensité énergétique*

Pays	Taux de croissance moyen
L'ensemble de l'échantillon	0,007
Non OCDE	0,013
OCDE	-0,009
États-Unis	-0,019
Royaume-Uni	-0,019
France	-0,007
Japon	-0,009

Note. Les valeurs sont calculées sur la période 1971-1999.

Comme nous l'avons souligné, l'estimation non-paramétrique ne tient pas compte du prix du pétrole. Le prix du pétrole varie dans le temps et reste le même pour tous les pays sur le marché mondial. Son influence éventuelle sur la production peut être captée par la formulation semi-paramétrique du modèle *via* la fonction de régression qui varie avec le temps. Néanmoins, elle reste insignifiante car le test de stabilité a rejeté la variabilité de cette fonction. Par ailleurs, nous ne disposons des données sur le prix du pétrole qu'à partir de 1982, ce qui réduirait considérablement la taille de l'échantillon si nous prenions en compte explicitement le prix dans l'analyse non-paramétrique. Cependant, pour avoir une idée précise de l'effet du prix du pétrole, nous effectuons une analyse paramétrique incluant cette variable comme régresseur supplémentaire. Le modèle utilisé est un modèle à effets fixes de pays avec les termes linéaire et quadratique du ratio investissement-PIB et le prix.<sup>14</sup> Les résultats d'estimation sont présentés dans

14. Nous avons également étudié le modèle incluant le terme cubique du ratio investissement-PIB. Ce dernier n'est pas significatif ( $\chi^2(1) = 0,05 < 3,84$  au seuil de 5%).

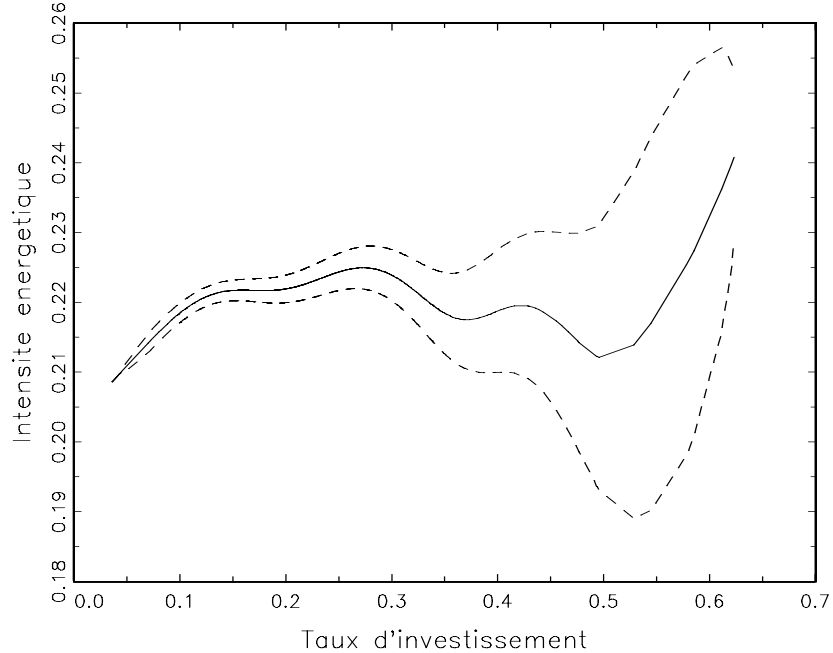


FIG. 7 – Relation entre l'intensité énergétique et la part de l'investissement dans le PIB. La courbe en trait continu correspond à l'estimation, et les courbes en trait discontinu à l'intervalle de confiance point par point au niveau de 95%.

le tableau 6. Le coefficient associé au prix n'est pas significatif. Ce résultat est cohérent avec celui de Newell *et alii* [1999] qui ont trouvé que, dans le contexte de l'hypothèse d'innovation induite, le taux global d'innovation est indépendant du prix de l'énergie. Ils ont toutefois trouvé que la direction de l'innovation est associée à la variation du prix de l'énergie pour certains produits mais pas pour d'autres. La significativité des coefficients correspondant au ratio investissement-PIB est en accord avec la courbe non-paramétrique (les termes linéaire et quadratique sont tous significatifs au seuil de 5%). On en déduit que la spécification semi-paramétrique fournit une approximation adéquate à la relation entre l'intensité énergétique et le ratio investissement-PIB.

Le tableau 7 décrit la distribution de l'effet marginal du taux d'investissement dans le PIB sur l'intensité énergétique. Cet effet marginal est du signe attendu, c'est-à-dire négatif (la moyenne sur l'ensemble de l'échantillon est -0,014). Ceci signifie qu'une augmentation de la part de l'investissement dans le PIB réduit l'intensité énergétique et

TAB. 6 – *Estimation du modèle paramétrique à effets fixes*

Variable	Coef.	<i>t</i> -stat.
Taux d'investissement	0,152*	2,238
Taux d'invest. carré	-0,310*	-2,361
Prix du pétrole	0.0002	1,587
<i>F</i>	308,86*	
Test de Hausman	3,10	
Nombre de pays	55	
Nombre d'années	18	

Notes. \*indique la significativité au seuil de 5%. La statistique du test Fischer correspond au test d'existence des effets fixes ( $H_0$ : tous les effets fixes sont nuls, la statistique suit un  $F(54,931)$ ). La statistique de Hausman correspond au test de comparaison entre le modèle à effets aléatoires et le modèle à effets fixes (hypothèse de Mundlak [1978], cette statistique suit un  $\chi^2(3)$ ).

TAB. 7 – *Distribution de l'effet marginal du taux d'investissement sur l'intensité énergétique*

	Min.	25%	50%	75%	Max.	Moyenne
échantillon	-1,790	-0,163	-0,009	0,127	1,551	-0,014
France						-0,067
Royaume-Uni						-0,120
Japon						-0,066
États-Unis						-0,115

aboutit à une production relativement moins consommatrice d'énergie. Le tableau 7 montre la moyenne de la dérivée première pour la France, le Royaume-Uni, le Japon et les États-Unis, et les quartiles pour l'ensemble de l'échantillon. Le signe de l'effet marginal du taux d'investissement reste négatif pour ces pays. Les valeurs (absolues) correspondant aux États-Unis et au Royaume-Uni sont plus élevées que celles correspondant à la France et au Japon. La réduction de l'intensité énergétique (ou l'amélioration de l'efficacité énergétique) en fonction de l'investissement en équipement est plus prononcée aux États-Unis et au Royaume-Uni qu'en France et au Japon. Ce résultat corrobore ce qu'avait suggéré l'examen des données.

En résumé, l'analyse empirique montre que le PIB par habitant est globalement une fonction croissante de l'investissement en équipement (ou la FBCF) par habitant. Cette relation a connu un changement structurel après 1984, traduisant ainsi l'impact du changement technique autonome sur la relation entre le PIB 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 théorique et simulation

### 3.1 Éléments de modélisation théorique

Nous construisons un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique économisant l'énergie, compatible avec la section empirique. Les détails de la construction formelle et les démonstrations mathématiques sont font l'objet de la section 3 du document "article" joint au présent rapport. 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, la fonction de production est linéaire en capital, suivant la spécification traditionnelle de Solow *et alii* [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 (décroissante) en énergie et non pas par leur productivité. Ceci semble à première vue contradictoire avec nos résultats empiriques concernant l'évidence d'un changement structurel dans la productivité marginal de l'investissement en 1985. Cependant, puisque cette amélioration de la productivité n'apparaît pas dans de courtes périodes, nous pouvons répliquer ce type de changement structurel comme un choc (exogène) sur la productivité des biens d'investissement dans le long terme. Finalement, la croissance est exogène dans notre modèle.

En développant ce modèle, nous souhaiterions de manière primordiale pouvoir répondre précisément aux questions suivantes: si nous réduisons la consommation d'énergie (par exemple dans le cadre du 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 (rendement marginal de l'investissement) 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, les résultats sont assez clairs et intuitifs. Par exemple, 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 investissements. 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.

Il faut noter que 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: conséquences d'une réduction de la consommation d'énergie**

Dans ce qui suit, nous supposons qu'il y a une réduction de la consommation d'énergie (qui peut se placer dans le cadre du 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 Réduction de l'offre d'énergie et hausse de la productivité**

Considérons une réduction de l'offre d'énergie, par exemple selon les termes un compromis international pour baisser la production de pétrole. Une telle réduction im-



plique une baisse du revenu de long terme. Supposons un accroissement régulier du progrès technique, comme justifié dans l'analyse empirique. D'après les résultats de la modélisation (voir Propositions 2 et 3, section 4 du document "article" joint) 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. Nous présentons dans la simulation l'évaluation quantitative de cet effet indirect.

### **3.2.2 Réduction de l'offre d'énergie et hausse de la subvention**

Nous supposons 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 (voir Propositions 2 et 3, du document "article", section 4), 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**

Dans cette simulation, nous distinguons le cas anglo-saxon et le cas franco-japonais. D'après le tableau 5, la vitesse du progrès technique économisant l'énergie dans le pre-

mier cas est environ le double de celle du second cas (1,9% contre 0,8% approximativement). Remarquons que la dérivée première estimée du PIB par habitant par rapport à FBCF par habitant (tableaux 3 et 4) ne devrait pas être vue comme une estimation précise de la productivité marginale de l'investissement de notre modèle. Elle est obtenue dans une spécification non-paramétrique très générale, qui n'est en aucun cas identique à notre fonction de production à générations de capital de type Leontief. Remarquons également que la productivité marginale de l'investissement ne peut pas être interprété comme le ratio du PIB 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.

Examinons 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 (cette propriété est démontrée dans la Proposition 2). Néanmoins, nous pouvons tirer une conclusion plus positive du modèle. Si nous extrapolons le changement structurel dans la dérivée première du PIB par habitant par rapport à la FBCF par habitant (tableaux 3 et 4), c'est-à-dire approximativement 20%, de la période 1971-1984 à la période 1985-1999, 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.

À l'opposé, 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%.<sup>15</sup> 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.

---

15. 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.

Les choses empirent quand le progrès technique permettant d'économiser l'énergie est plus lent, 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.

Concernant la politique fiscale, elle 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 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]. En effet, à l'aide du modèle macroéconomique "Hermès-Link" appliqué au six pays de l'Union européenne (l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Italie, les Pays-Bas et le Royaume-Uni), Lemiale et Zagamé [1998] ont remis en cause la supériorité des subventions aux investissements économisant l'énergie obtenue dans les études existantes (par exemple, Jaffe et Stavins [1995]).

## 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 utilisé la base de données ENERDATA pour analyser l'effet du progrès technique économisant l'énergie et celui de la productivité du bien d'investissement. Trois principaux résultats peuvent être mis en avant: (i) l'intensité énergétique durant la période 1971-1999 dans les pays

de l'OCDE indique une tendance significative dans le progrès technique économisant l'énergie, (ii) cette tendance est positivement corrélée avec le taux d'investissement et (iii) grâce à un changement structurel, la productivité marginale de l'investissement a connu une accélération durant la période 1985-1999, par rapport à la période 1971-1984.

En s'appuyant sur ces résultats, nous avons construit et simulé un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique exogène 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: (i) si l'augmentation de la productivité marginale de l'investissement, détectée dans notre étude empirique depuis 1985, 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); (ii) 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.

Nos résultats ont naturellement besoin d'une ré-évaluation dans des modèles à structure moins restrictive. En particulier, nous pouvons endogénéiser le progrès technique. En endogénéisant le progrès technique pour étudier l'impact de la régulation environnementale, il faut être prudent dans la distinction entre les efforts de recherche et de développement (R&D) visant à améliorer la productivité et la fiabilité des biens de capital, et ceux visant à améliorer les technologies économisant l'énergie. Ceci est l'une des conclusions méthodologiques de cette recherche.

## 5 Annexes: Retombées scientifiques

Les résultats issus de ce projet de recherche ont donné lieu à un article (joint au présent rapport) intitulé "*Energy Consumption, Technological Progress and Economic Policy*". Cet article a été présenté à des séminaires de recherche et à des conférences internationales. Il est également paru comme "working paper" et est soumis pour publication dans une revue internationale à comité de lecture. La référence de l'article est la suivante :

Théophile Azomahou, Raouf Boucekkine, Phu Nguyen Van [2003], "*Energy Consumption, Technological Progress and Economic Policy*".

### 5.1 Communications à des conférences

1. Soumis au "19th Annual Congress of the European Meeting of the Econometric Society", Universidad Carlos III de Madrid, août 2004.
2. Présenté au séminaire du BETA, Strasbourg 20 janvier 2004.
3. Présenté au séminaire de l'environnement de l'EUREQua, Paris 8 janvier 2004.
4. Présenté au "Sevilla Workshop on Dynamics Economics and the Environment", juillet 2003.

### 5.2 Publications

1. Soumis à la revue *Journal of Environmental Economics and Management*.
2. À paraître dans les "Working Papers" du BETA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2004.
3. À paraître dans les "Discussion Papers" du CORE, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2004.
4. Paru dans les "Discussion Papers" de l'IRES, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve,, n° 2003-25.

## Références

- AMBEC, S. ET P. BARLA (2002): “A Theoretical Foundation of the Porter Hypothesis”, *Economics Letters*, 75, 355–360.
- AZOMAHOU, T., R. BOUCEKKINE ET P. NGUYEN VAN (2003): “Energy Consumption, Technological Progress and Economic Policy”, IRES Discussion Paper 2003-25, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- AZOMAHOU, T., P. NGUYEN VAN ET F. LAISNEY (2003): “Economic Growth and CO<sub>2</sub> Emissions: A Nonparametric Approach”, CORE discussion paper no. 2001/12, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BETA working paper no. 2001-01, Université Louis Pasteur, Strasbourg, en révision pour *Journal of Public Economics*.
- BALTAGI, B. H., J. HIDALGO ET Q. LI (1996): “A Nonparametric Test for Poolability Using Panel Data”, *Journal of Econometrics*, 75, 345–367.
- BEAUDRY, P. ET M. POITEVIN (1995): “Contract Renegotiation: A Simple Framework and Implications for Organization Theory”, *Canadian Journal of Economics*, 28, 302–335.
- BÖHRINGER, C. ET C. VOGT (2003): “Economic and Environmental Impacts of the Kyoto Protocol”, *Canadian Journal of Economics*, 36, 475–494.
- BOUCEKKINE, R., M. GERMAIN ET O. LICANDRO (1997): “Replacement Echoes in the Vintage Capital Growth Model”, *Journal of Economic Theory*, 74, 333–348.
- BOUCEKKINE, R. ET A. POMMERET (2003): “Energy-Saving Technical Progress and Optimal Capital Stock: The Role of Embodiment”, *Economic Modelling*, à paraître.
- COHEN, M. A., S. A. FENN, S. KONAR ET J. S. NAIMON (1995): “Environmental and Financial Performance: Are They Related?”, Financial Markets Research Center working paper 95-13, Vanderbilt University.
- ENERGY JOURNAL (1999): “The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation”, *numéro spécial*.
- FEICHTINGER, G., R. F. HARTL, P. M. KORT ET V. VELIOV (2001): “Dynamic Investment Behavior Taking into Account Ageing of the Capital Good”, in *Dynamical Systems and Control*, éd. par F. UDWADIA. Gordon and Breach, London.
- GUESNERIE, R. (2003): *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*. La Documentation française, Rapport au Conseil d'Analyse Économique no. 39.
- HICKS, J. (1932): *The Theory of Wages*. Macmillan, London.
- JAFFE, A. B., R. G. NEWELL ET R. N. STAVINS (2000): “Technological Change and the Environment”, in *Handbook of Environmental Economics*, éd. par K.-G. MÄLER ET J. VINCENT, vol. 1. North Holland, Elsevier Science, Amsterdam.

- (2002): “Environmental Policy and Technological Change”, *Environmental and Resource Economics*, 22, 41–69.
- JAFFE, A. B. ET K. PALMER (1997): “Environmental Regulation and Innovation: A Panel Study”, *Review of Economics and Statistics*, 79, 610–619.
- JAFFE, A. B. ET R. N. STAVINS (1995): “Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, S43–S63.
- KUZNETS, S. (1955): “Economic Growth and Income Inequality”, *American Economic Review*, 45, 1–28.
- LEMIALE, L. ET 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*, éd. par K. SCHUBERT ET P. ZAGAMÉ, chap. 11. Vuibert, Paris.
- LÖSCHEL, A. (2002): “Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey”, *Ecological Economics*, 43, 105–126.
- MEADOWS, D. H., D. L. MEADOWS, J. RANDERS ET W. W. BEHRENS (1972): *The Limits to Growth*. Rapport au Club de Rome, Universe, New York.
- MUNDLAK, Y. (1978): “On the Pooling of Time Series and Cross Sectional Data”, *Econometrica*, 56, 69–86.
- NEWELL, R. G., A. B. JAFFE ET R. N. STAVINS (1999): “The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change”, *The Quarterly Journal of Economics*, 114, 941–975.
- OATES, W. E., K. PALMER ET P. R. PORTNEY (1993): “Environmental Regulation and International Competitiveness: Thinking about the Porter Hypothesis”, *Discussion paper 94-02*.
- PALMER, K., W. E. OATES ET P. R. PORTNEY (1995): “Tightening Environmental Standards: The Benefit-Cost or the No-Cost Paradigm?”, *Journal of Economic Perspectives*, 9, 119–132.
- PORTER, M. E. (1991): “America’s Green Strategy”, *Scientific America*, 264, 168.
- PORTER, M. E. ET 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*.
- ROCA, J. ET V. ALCÁNTARA (2001): “Energy Intensity, CO<sub>2</sub> Emissions and the Environmental Kuznets Curve: The Spanish Case”, *Energy Policy*, 29, 553–556.

- SAKELLARIS, P. ET D. J. WILSON (2003): “Quantifying Embodied Technological Change”, *Review of Economic Dynamics*, à paraître.
- SHAPPINGTON, D. (1983): “Limited Liability Contracts Between Principal and Agent”, *Journal of Economic Theory*, 29, 1–21.
- SMULDERS, S. ET L. BRETSCHGER (2000): “Explaining Environmental Kuznets Curves: How Pollution Induces Policy and New Technologies”, Center for Economic Research working paper no. 2000–95.
- SOLOW, R., J. TOBIN, C. VON WEIZSACKER ET M. YAARI (1966): “Neoclassical Growth with Fixed Factor Proportions”, *Review of Economic Studies*, 33, 79–115.
- SUN, J. W. (1999): “The Nature of CO<sub>2</sub> Emissions Kuznets Curve”, *Energy Policy*, 27, 691–694.
- WAGNER, M., P. NGUYEN VAN, T. AZOMAHOU ET W. WEHRMEYER (2002): “The Relationship between the Environmental and Economic Performance of Firms: An Empirical Analysis of the European Paper Industry”, *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 9, 133–146.
- XEPAPADEAS, A. ET 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.