

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: note synthétique

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

1 Contexte et problématique

La relation entre la croissance économique et les régulations environnementales connaît un intérêt croissant et donne lieu à un débat qui 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 (voir, par exemple, le rapport Meadows *et alii* [1972] au Club de Rome). 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.¹ 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.² 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 limiter la hausse de température à 1,5 degré en 2100.³ 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.

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.⁴ 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.⁵ 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.

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 pas d'effet sur le taux d'innovation. En revanche, les changements de prix ont un effet 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 réduite, mais significative, est due aux changements dans le prix de l'énergie.

Du point de vue de la croissance endogène, une réduction de l'utilisation des ressources (par exemple l'énergie) entraîne une baisse 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.⁶ Smulders et Bretschger [2000] ont montré que les changements technologiques (modélisés par les changements dans les technologies à usage général – *general*

1. Adopté en 1997 à Kyoto, ce protocole, qui impose aux pays industriels de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (notamment le dioxyde de carbone, CO₂) de 5,2% d'ici à 2012, par rapport au niveau de 1990, semble connaître une application mitigée, surtout suite au refus des États-Unis de le ratifier.

2. Sur un siècle, cet effort permettra une baisse de température inférieure à 0,2 degré

3. 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.

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

5. L'efficacité énergétique est 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

6. 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.

purpose technologies) induits par les politiques environnementales peuvent expliquer l'existence d'une Courbe Environnementale de Kuznets (CEK).⁷

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. Les détails de cette recherche sont présentés dans l'article intitulé "*Energy Consumption, Technological Progress and Economic Policy*" (Azomahou *et alii* [2003]).

2 Synthèse des résultats

Cette recherche contient deux volets: un volet empirique et un volet théorique. L'étude empirique est réalisée à partir de la base de données ENERDATA. Ces données couvrent la période 1971-1999 et contiennent un grand nombre de pays. Notre objectif est d'évaluer empiriquement les effets de générations de capital ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les résultats de cette quantification serviront de guide pour la modélisation théorique. Nous estimons la relation entre la production (mesurée par le PIB) et l'investissement en équipement (mesuré par la Formation Brute du Capital Fixe, FBCF) et la relation entre l'intensité énergétique (ratio entre la consommation d'énergie et le PIB) et le taux d'investissement (part de l'investissement dans le PIB).

Nous montrons que la relation entre le PIB par habitant et l'investissement en équipement par habitant a connu un changement structurel entre les périodes 1971-1984 et 1985-1999. Ceci indique la présence d'un progrès technologique autonome. Ce résultat est intéressant car le changement technologique est le canal principal de transmission des effets de générations de capital. La présence de ce changement structurel recommande d'étudier séparément la relation entre le PIB par habitant et le FBCF par habitant sur les périodes 1971-1984 et 1985-1999. À l'opposé, la relation entre l'intensité énergétique et le taux d'investissement n'a connu aucun changement structurel pour la période étudiée (1971-1999).

Nous observons une accélération claire de la productivité marginale du capital (ou de l'investissement en équipement) dans la période 1985-1999 par rapport à la période 1971-1984 comme l'indique les tableaux 1 et 2. 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.

TAB. 1 – *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

Le tableau 3 présente le taux de variation de l'intensité 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 y est de 0,013). Pour les pays de l'OCDE, nous observons

7. 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.

TAB. 2 – *Distribution de la productivité marginale du capital pour la France, le Royaume Uni, le Japon et les États-Unis*

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

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.

TAB. 3 – *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.

En nous basant sur ces résultats empiriques, nous construisons et calibrons un modèle à générations de capital physique avec progrès technique incorporé économisant l'énergie. L'énergie et le capital sont supposés complémentaires, et nous employons une fonction de production de type Léontief, fréquemment adoptée dans la littérature. Notre modélisation a deux caractéristiques principales. La première est l'exogénéité de la croissance. La seconde caractéristique renvoie à un mécanisme d'obsolescence et de remplacement des machines. En effet, pour la spécification de type Léontief, il serait optimal de remplacer les machines moins efficaces (par exemple, celles qui consomment plus d'énergie) par des machines qui consomment moins d'énergie, et ce à une date finie.

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, 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. Par ailleurs, 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 donnée. 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. Nous constatons également qu'une réduction de la consommation d'énergie a un effet direct négatif sur la production de long terme.

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 cet instrument et la quantifions en fonction de la vitesse du progrès technique économisant l'énergie et en fonction de la productivité marginale de l'investissement.

3 Politiques économiques: conséquences d'une réduction de la consommation d'énergie

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. Pour évaluer 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.

3.1 Réduction de l'offre d'énergie et hausse de la productivité

Une réduction de l'offre d'énergie implique 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, 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 peut compenser la perte du revenu entraînée 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 des machines.

3.2 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 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. Cependant, nous montrons que la politique fiscale (subventions à l'investissement) est inefficace pour compenser la perte de production consécutive à une réduction de l'offre d'énergie.

4 Conclusion

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'amélioration de l'efficacité énergétique durant la période 1971-1999 dans les pays de l'OCDE suggère l'existence d'un progrès technique économisant l'énergie, (ii) cette amélioration 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 (ou un changement structurel) 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. 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 (dans le cadre du protocole de Kyoto) 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.

Références

- 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.
- BÖHRINGER, C. ET C. VOGT (2003): “Economic and Environmental Impacts of the Kyoto Protocol”, *Canadian Journal of Economics*, 36, 475–494.
- ENERGY JOURNAL (1999): “The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation”, *numéro spécial*.
- 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.
- KUZNETS, S. (1955): “Economic Growth and Income Inequality”, *American Economic Review*, 45, 1–28.
- 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.
- 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.
- RESOURCE AND ENERGY ECONOMICS (2003): “Endogenous Technical Change in Environmental Macroeconomics”, *numéro spécial*.
- 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.