

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

Projet de recherche (n°29)

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

Projet de rapport final: note synthétique

Août 2005

Equipe de recherche

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

Responsable scientifique: Théophile AZOMAHOU

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

1 Contexte et problématique

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

Les prix du pétrole et ceux d'autres matières premières ont fortement augmentés ces dernières années, sous la pression d'une demande croissante émanant notamment des pays industriels et des pays émergents. Dans le même temps, les politiques énergétique et environnementale sont incitées à être revues et corrigées par la prise de conscience des dangers liés au changement climatique: concentration de plus en plus élevée des gaz à effet de serre (dont le dioxyde de carbone, CO₂) dans l'atmosphère, avec la menace de déstabiliser l'écosystème. Pour limiter ces risques, les pouvoirs publics mettent l'accent sur la réduction de la consommation d'énergie et la recherche fondamentale dans le domaine de l'énergie renouvelable (hydrogène, éolien, etc.)¹

L'*hypothèse de Porter* a suscité une grande discussion dans la littérature en économie de l'environnement (Porter [1991], Porter et van der Linde [1995]). Selon cette hypothèse, des normes environnementales strictes pourraient être bénéfiques à la fois à la compétitivité de l'entreprise et à la croissance économique (Porter [1991] et Porter et van der Linde [1995]). En effet, le potentiel d'innovation et de développement de nouvelles technologies induites par ces normes semble être à long terme un déterminant majeur de la compétitivité de l'entreprise et de la croissance économique.² Cette hypothèse contraste avec la vision traditionnelle selon laquelle toute régulation environnementale entraîne une perte de compétitivité pour les entreprises. Au niveau macroéconomique, l'analogie de l'hypothèse de Porter est l'hypothèse de la courbe de Kuznets environnementale (CKE), qui représente l'interaction entre la dégradation environnementale et le développement économique par une relation en U inversé.³ Les critiques adressées à l'hypothèse de Porter (Oates et al. [1994], Palmer et al. [1995]), l'hypothèse de la CKE et les discussions sur leur validité théorique et empirique sont étroitement liées aux débats actuels portant sur de grandes questions environnementales. Le protocole de Kyoto est un exemple édifiant.⁴

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

La littérature en économie environnementale a également souligné l'importance du progrès

1. Andris Piebalgs, commissaire à l'énergie, a établi le 13 avril 2005 la liste des priorités de l'UE, incluant celle d'orienter la R&D en faveur des sources d'énergie non polluantes en CO₂, notamment l'hydrogène et les ressources renouvelables, ainsi que celle de maintenir l'expansion du secteur des sources renouvelables d'énergie au rythme de 20% par an.

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

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

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

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

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

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

D'une part, nous mettons l'accent sur le progrès technique économisant l'énergie. D'autre part, nous étudions le progrès technique permettant de modifier la structure énergétique d'un pays. Cette recherche contient deux volets: une partie empirique et une partie théorique.

2 Etude empirique

Dans la partie empirique, nous étudions l'efficacité énergétique et le lien entre la production et l'investissement actif. L'étude concerne trois grands pays industrialisés: la France, le Japon et les États-Unis. En particulier, pour chaque pays, on s'intéresse aux secteurs du transport et de l'industrie qui sont reconnus comme étant de gros consommateurs d'énergie.

La production est mesurée par la valeur ajoutée aux prix de base (VA).⁶ Nous utilisons des séries sur la formation brute de capital fixe (GFCF) comme approximation du stock de capital fixe (ou investissement productive). L'intensité d'énergie est calculée pendant que le rapport entre la consommation totale d'énergie (en unité thermique britannique de milliers Qbtu⁷) et la valeur ajoutée. La consommation totale d'énergie inclut la consommation d'énergie primaire, les ventes au détail de l'électricité, et les déperditions d'énergie dans le système électrique. Nous pourrions utiliser la consommation d'énergie primaire au lieu de la consommation totale d'énergie mais ce dernier est essentiellement constituée de la consommation primaire, notamment la consommation des secteurs industriel et du transport.⁸

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

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

7. Quadrillion

8. L'énergie primaire inclut le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique,

TAB. 1 – Résultats d'estimation

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

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

À l'exception des données de consommation totale d'énergie des États-Unis qui proviennent de la base "US Energy Information Administration (EIA)", les données portant sur la valeur ajoutée, la formation brute du capital fixe, puis celles portant sur la consommation d'énergie proviennent de la base (STAN database) de l'OCDE. Pour le Japon, on ne dispose que des données sur le secteur manufacturier. En particulier, nous étudions la relation de long terme entre la valeur ajoutée et la formation brute du capital fixe. Cette estimation permet d'évaluer les effets de générations de capital. Il faut noter que nous n'étudions pas ici les aspects dynamiques de la relation production-investissement, ainsi que l'évaluation du progrès technique incorporé (voir par exemple Sakellaris et Wilson [2003]). Le modèle de régression économique considéré ici est statique et n'incorpore pas l'endogénéité de l'investissement, des investissements réalisés dans le passé, l'impact du prix des équipements. En revanche, notre spécification a le mérite d'être considéré comme une relation de long terme entre la production et l'investissement en équipements, ce qui nous permet d'étudier la productivité de long terme et notamment l'existence d'un progrès technique autonome.

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

temps.

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

3 Modélisation et politiques économiques

Le cadre théorique d'analyse considéré est un modèle d'équilibre général à générations de capital avec progrès technique endogène. Nous utiliserons un mécanisme endogène de remplacement des équipements (*optimal scrapping rule*). La date de remplacement des biens d'équipement est déterminée par le comportement des investisseurs.⁹ Notre façon d'endogénéiser le progrès technique est intéressante dans la mesure où elle traite les décisions au niveau des firmes, mais elle implique un niveau endogène de productivité du stock global du capital. Notamment, une amélioration de la productivité de toutes les générations de capital amènera évidemment à une amélioration de la productivité du stock global du capital. Les entreprises ont un comportement maximisateur via les activités de R&D. Ce type de comportement correspond à l'hypothèse des innovations induites selon laquelle les innovations sont orientées de façon à répondre aux changements des prix relatifs, induits par exemple par la politique environnementale.

Deux enseignements principaux peuvent être tirés de cette analyse : premièrement, notre modèle n'engendre pas de la croissance à long terme. Ce comportement s'explique d'une part, par l'hypothèse des rendements d'échelles décroissant pour les biens de technologies intermédiaires ; et d'autre part parce qu'ici, nous obtenons que l'âge optimal de remplacement et l'économie d'énergie provenant le progrès technologique ne sont pas assez forts pour inverser la tendance de rendements d'échelles décroissant. La raison est que nous avons considéré une fonction d'utilité instantanée. Par conséquent, le taux d'intérêt est constant à la longue.

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

Une extension intéressante de cette modélisation pourrait être l'inclusion d'un secteur de raffinerie de pétrole. En effet, si l'offre d'énergie devient endogène, le comportement des prix de l'énergie serait plus réaliste, particulièrement le court terme. Ce prolongement améliorerait notre modèle pour décrire la transition vers le sentier de croissance équilibré.

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

Références

- ARTHUR, B. (1989): “Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Small Events,” *Economic Journal*, 99, 116–131.
- DAVID, P. (1985): “Clio and the Economics of QWERTY,” *American Economic Review*, 75, 332–337.
- GRUBB, M., AND D. ULPH (2002): “Energy, the environment and innovation,” *Oxford Review of Economic Policy*, 18, 92–106.
- HICKS, J. (1932): *The Theory of Wages*. Macmillan, London.
- LÖSCHEL, A. (2002): “Technological Change in Economic Models of Environmental Policy: A Survey,” *Ecological Economics*, 43, 105–126.
- MULDER, P., H. L. F. DE GROOT, AND M. W. HOFKES (2003): “Explaining Slow Diffusion of Energy-Saving Technologies; A Vintage Model with Returns to Diversity and Learning-by-Using,” *Resource and Energy Economics*, 25, 105–126.
- NELSON, R., AND S. WINTER (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge.
- OATES, W. E., K. PALMER, AND P. R. PORTNEY (1993): “Environmental Regulation and International Competitiveness: Thinking about the Porter Hypothesis,” *Discussion paper 94-02*.
- PALMER, K., W. E. OATES, AND P. R. PORTNEY (1995): “Tightening Environmental Standards: The Benefit-Cost or the No-Cost Paradigm?,” *Journal of Economic Perspectives*, 9, 119–132.
- PORTER, M. E. (1991): “America’s Green Strategy,” *Scientific America*, 264, 168.
- PORTER, M. E., AND C. VAN DER LINDE (1995): “Toward a New Conception of the Environmental Competitiveness Relationship,” *Journal of Economic Perspectives*, 9, 97–118.
- RESOURCE AND ENERGY ECONOMICS (2003): “Endogenous Technical Change in Environmental Macroeconomics,” *numéro spécial*.
- RUTTAN, V. (1997): “Induced Innovation Evolutionary Theory and Path Dependence: Sources of Technical Change,” *Economic Journal*, 107, 1520–1529.
- SAKELLARIS, P., AND D. J. WILSON (2003): “Quantifying Embodied Technological Change,” *Review of Economic Dynamics*, à paraître.
- SCHUMPETER, J. (1942): *Capitalism, Socialism and Democracy*. Harper, New York.
- SMULDERS, S., AND L. BRETSCHGER (2000): “Explaining Environmental Kuznets Curves: How Pollution Induces Policy and New Technologies,” Center for Economic Research working paper no. 2000–95.
- WEYANT, J., AND T. OLAVSON (1999): “Issues in Modeling Induced Technological Change in Energy, Environment, and Climate Change,” *Environmental Modeling and Assessment*, 4, 67–85.