



HAL
open science

Environnement et élasticités de substitution dans l'industrie : méthodes et interrogations pour l'avenir

Nathalie Alba-Saunal

► **To cite this version:**

Nathalie Alba-Saunal. Environnement et élasticités de substitution dans l'industrie : méthodes et interrogations pour l'avenir : Cahiers du CEG, n° 16. 1993. hal-02434403

HAL Id: hal-02434403

<https://ifp.hal.science/hal-02434403>

Preprint submitted on 10 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Centre Économie et Gestion

**Environnement et
élasticités de substitution
dans l'industrie;
méthodes et
interrogations pour l'avenir**

Nathalie ALBA-SAUNAL

Septembre 1993

**Cahiers du CEG - n^o 16
Document de recherche**

ENSPM - Centre Économie et Gestion
228-232, avenue Napoléon Bonaparte, Boîte postale 311
92506 RUEIL MALMAISON CEDEX.
télécopieur : 33 (1) 47 52 70 66 - téléphone : 33 (1) 47 52 64 25.

La collection "Cahiers du CEG" est un recueil des travaux réalisés au Centre d'Economie et Gestion de l'ENSPM, Institut Français du Pétrole. Elle a été mise en place pour permettre la diffusion de ces travaux, parfois sous une forme encore provisoire, afin de susciter des échanges de points de vue sur les sujets abordés.

Les opinions émises dans les textes publiés dans cette collection doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'IFP ou de l'ENSPM.

Pour toute information complémentaire, prière de contacter :
Saïd NACHET (*Responsable de la publication*) tél. (1) 47 52 64 08

"Cahiers du CEG" is a collection of researchs realized within the Center for Economics and Management of the ENSPM, Institut Français du Pétrole. The goal of such collection is to allow views exchange about the subjects treated of.

The opinions defended in the papers published are the author(s) sole responsibility and don't necessarily reflect the views of the IFP or ENSPM.

For any additional information, please contact :
Saïd NACHET (*Editor*) tel. (1) 47 52 64 08

RÉSUMÉ

Les mesures de protection de l'environnement sont, depuis quelques temps, l'un des points importants des politiques économiques des pays industrialisés. La recherche de processus de production moins polluants et de produits plus "propres" devient petit à petit un impératif pour les firmes industrielles. Parallèlement, de nombreuses études sont réalisées dans le but de mieux connaître les conséquences des mesures de politique économique (de type "carbon tax") sur l'emploi, l'investissement, la croissance, etc. L'objet de cet article est double. En premier lieu, il s'agit de faire le point sur les modèles utilisés dans un but de meilleure connaissance de la production de rejets polluants par les firmes industrielles. Qu'ils soient d'essence macroéconomique ou technico-économique, ceux-ci présentent avantages et inconvénients sur lesquels nous nous attarderons. En second lieu, nous nous intéresserons plus particulièrement au rôle du progrès technique et de son évolution future. Les processus de production évoluent en effet sous l'influence de l'innovation, et celle-ci repose sur des décisions particulièrement complexes. Le rôle des anticipations y est indéniable, ce qui complique grandement la tâche des économistes, notamment pour prévoir l'impact des mesures de réduction de la pollution.

ABSTRACT

During the last few years, environmental regulations have become one of the most important issues in economic policies of industrialized countries. Research into the reduction of pollution from production processes and to find "cleaner" products has gradually become a requirement for industrial firms. At the same time, many economic models have been developed to improve understanding of the consequences of economic policy measures (e.g. Carbon Tax) on employment, investment, growth, etc. This paper has two objectives. First, it examines models used to increase understanding of pollution from industrial activities. Whether macroeconomically or technically oriented, such models present advantages and disadvantages, and they are discussed. Secondly, it focuses on technical progress and its future evolution. Processes evolve with innovation, which relies on very complex decisions. The role of expectations is undeniable, and this makes the task of economists much more difficult, especially when forecasting the impact of pollution reduction measures.

**ENVIRONNEMENT ET ELASTICITES DE
SUBSTITUTION DANS L'INDUSTRIE : LE
POINT SUR LES METHODES ET LES
INTERROGATIONS POUR L'AVENIR**

Le premier choc pétrolier, en modifiant profondément le paysage économique et énergétique, s'est traduit par un regain d'intérêt pour les substitutions de facteurs. La connaissance des possibilités de substitution, et en particulier des élasticités "énergie / autres facteurs", permet en effet une vision prospective des modifications de l'environnement des entreprises. Ainsi par exemple, si l'élasticité "capital / énergie" est forte, il y a fort à parier qu'une augmentation brusque du prix de l'énergie se traduira par une modification importante de l'investissement. Le signe et la valeur de cette élasticité particulière ont été au cœur des débats pendant les années soixante-dix et quatre-vingt et les nombreuses études qui leur ont été consacrées témoignent de l'aspect primordial du problème¹. Cependant, si le contre-choc pétrolier et l'assagissement du marché qui a suivi ont quelque peu freiné l'intérêt porté, par les économistes, aux problèmes des substitutions de facteurs, c'est sans nul doute la prise de conscience des problèmes de pollution qui a relancé le débat en mettant en valeur trois points essentiels :

¹ Voir ALBA-SAUNAL [1993] pour un survey sur les études et les problèmes soulevés par le signe et la valeur de l'élasticité "capital / énergie".

- la majeure partie de la pollution atmosphérique provient des phénomènes de combustion, et donc de la consommation d'énergie d'origine fossile. Par ce biais, la réduction de la consommation d'énergie s'est retrouvée une nouvelle fois sur le devant de la scène.

- la diminution de la consommation d'énergie passe nécessairement, au niveau industriel, par une évolution des processus de production. Substitutions entre énergies, ou substitutions de facteurs sont des phénomènes attendus dans les années à venir.

- Cette évolution nécessitera une modification profonde des comportements. Il ne s'agit plus seulement, comme c'était le cas lors des chocs pétroliers, de réduire la consommation pétrolière ou charbonnière, mais bien de modifier les processus de production, de manière à permettre le recyclage des éléments et la diminution des déchets. Par là-même, il est important de pouvoir évaluer le mieux possible l'évolution des comportements de production. Or, ceci passe par une bonne connaissance des possibilités d'innovation technologique et des mécanismes qui y conduisent. Parmi ceux-ci, les anticipations tiennent une place prépondérante.

Après quelques définitions, nous effectuerons un état des tendances de la modélisation actuelle en matière d'environnement. De nombreux modèles globaux (au sens de la représentation de l'économie) et des méthodes spécifiquement adaptées existent aujourd'hui, et nous verrons quelles sont leurs caractéristiques et leurs lacunes. Nous nous intéresserons ensuite au mode de fonctionnement des décisions d'innovation, en insistant sur leur rôle déterminant dans la réduction de la pollution.

Quelques définitions

La grande majorité des études portant sur la pollution ont, en premier lieu, traité de pollution atmosphérique. La définition de ce terme, donnée par la Communauté Européenne est :

"l'introduction dans l'atmosphère par l'homme, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie ayant une action nocive de nature à mettre en danger la santé de l'homme, à endommager les ressources biologiques et les

écosystèmes, à détériorer les biens matériels et à porter atteinte ou à nuire aux valeurs d'agrément et aux autres utilisations légitimes de l'environnement."

La pollution atmosphérique provient en majorité des rejets de la combustion. L'énergie en est donc en grande partie responsable et, plus particulièrement, les énergies d'origine fossile. La maîtrise de la pollution relance donc le débat, déjà ancien, de la réduction de la consommation d'énergie et des modifications nécessaires des processus de production. Nous ne traiterons pas ici du difficile problème de l'énergie nucléaire. Parfaitement "propre" du point de vue de la pollution atmosphérique, l'électricité d'origine nucléaire pose un problème de retraitement des déchets. De ce fait, la pollution induite par la "fabrication" de ce type d'énergie sera directement intégrée aux déchets dits dangereux.

La très forte médiatisation à laquelle nous assistons depuis quelques années a engendré une volonté affichée des gouvernements et des entreprises d'agir pour la protection de l'environnement. Si des mesures avaient été prises depuis une vingtaine d'années, la médiatisation s'est traduite par une modification profonde de certains produits finis. On peut penser que la lutte contre la pollution et la recherche-développement dans le domaine écologique sont aujourd'hui des arguments de vente¹. Bien que l'effet de serre ou la couche d'ozone soient des termes bien connus du grand public, nous rappellerons succinctement leurs définitions. L'effet de serre concerne essentiellement les effets "réchauffants" des rejets chimiques dans l'atmosphère. Ces rejets proviennent en grande partie de la combustion des énergies fossiles et du bois.

De son côté, la dégradation de la couche d'ozone regroupe deux phénomènes distincts :

- la dégradation de l'ozone stratosphérique. On suppose à ce sujet qu'il existe une corrélation négative entre la présence de chlore et d'ozone dans l'atmosphère. Le chlore serait dû en grande partie à l'utilisation abusive de gaz CFC (chlorofluorocarbones).
- L'élévation des concentrations d'ozone troposphérique. Ce second phénomène provient directement de l'activité industrielle et de la

¹ Les exemples en sont nombreux dans l'industrie des biens de consommation courante (lessives sans phosphates, bombes aérosols sans CFC, etc.), ou d'équipements (automobiles "catalysées").

concentration de véhicules à moteurs. C'est par ce biais que se ferait le lien entre couche d'ozone et effet de serre.

En réalité, de nombreuses incertitudes scientifiques demeurent. On ne connaît pas encore, par exemple, le rôle exact des nuages ou de la capacité d'absorption de CO² des océans ou des végétaux. On n'a également aujourd'hui qu'une idée très relative de l'évolution de la couche d'ozone. De même, si certains s'accordent sur un réchauffement possible de la planète dans les décennies à venir, les avis divergent largement sur les répartitions régionales. Enfin, certains scientifiques remettent même en cause le bien fondé des mesures prises actuellement en matière d'élimination des gaz CFC. Ainsi, MADURO et SCHAUERHAMMER [1992]¹ indiquent :

“La théorie que accuse les CFC n'est que l'une des nombreuses théories prédisant une catastrophique réduction de la couche d'ozone. La première remonte à mars 1971, lorsque James McDonald (...) témoigna devant le Congrès à propos du transport supersonique². (...) Les CFC sont des composés chimiques inertes, non-toxiques, ininflammables qui ne détruisent ni l'ozone ni quoi que ce soit. Ce que l'on omet toujours de dire, c'est que la quantité de chlore contenue dans les CFC est insignifiante lorsqu'on la compare à la quantité de chlore émise dans l'atmosphère par les sources naturelles.”³

Il n'en reste pas moins que les dirigeants politiques, les chefs d'entreprises et les consommateurs s'accordent sur l'urgence du problème. Le commissariat Général du Plan souligne le fait dans son rapport intitulé “Energie 2010”, publié en février 1991 :

“Il s'agit d'un problème politique et d'un problème d'assurance. Des incertitudes scientifiques demeurent, qui ne seront pas levées avant 10 ans. L'ampleur des dégâts que causerait un réchauffement de l'atmosphère terrestre est impossible à évaluer et la date de l'apparition des premières

1 MADURO et SHCAUERHAMMER [1992] : “Ozone, un trou pour rien” (Editions Alcuin, Paris).

2 McDonald accusa les émissions de vapeur d'eau du transport supersonique de détruire la couche d'ozone.

3 Les auteurs indiquent que les sources naturelles de chlore dans l'atmosphère, exprimées en millions de tonnes par an sont, en ordre décroissant : l'eau de mer (600), les volcans (36), la combustion de la biomasse (8,4), la biote océanique (5). C'est-à-dire un total de 649,40. Le chlore en provenance des CFC est estimé à 0,75 millions de tonnes par an.

manifestations dangereuses très incertaine, mais il est certain que l'hystérésis du système climatique (hystérésis due aux océans) est telle que lorsque les incertitudes climatiques seront levées, il pourrait être trop tard pour engager une prévention efficace.” (p81)

Il n'entre pas dans notre propos de discuter du bien fondé des mesures prises. Il nous semble toutefois important de rappeler que les problèmes de pollution et le choix des moyens à adopter pour la réduire constituent encore aujourd'hui une controverse de premier plan. Certains gouvernements s'en sont d'ailleurs rendu compte et HOURCADE [1991] rappelle :

“C'est ainsi que la publication du chiffrage par Manne et Richels [dans le New York Times et le New Scientist] des coûts macroéconomiques d'une politique coordonnée entre grandes zones géopolitiques de limitation des émissions a joué un rôle central dans l'adoption, par l'administration américaine, jusqu'alors plutôt en flèche sur ce dossier, d'une position nettement plus réservée en raison de l'ampleur des coûts encourus pour des risques encore très incertains en l'état actuel des connaissances.”

Modélisation : les tendances actuelles

L'émergence des problèmes d'environnement et la recherche de l'impact des mesures de politique économique se sont traduits par une modélisation importante. De nombreux modèles macroéconomiques ont été utilisés à des fins d'analyse des répercussions des projets de modification de la fiscalité, des modules spécialement conçus pour l'environnement ont été développés et des modèles d'environnement ont vu le jour.

Deux grandes voies de recherche co-existent actuellement. La première, dite “bottom-up” est plutôt de nature microéconomique, dans le sens où elle privilégie le comportement des agents. Elle peut être utilisée pour mesurer l'impact d'une politique spécifique sur les différents agents et sur leurs principales fonctions. Elle consiste, dans un premier temps, à identifier les populations affectées par la mesure. Chaque membre de la population est repéré par des caractéristiques propres (taille, âge, éducation, etc., pour les ménages, et nombre d'employés, secteur, âge de l'équipement, etc., pour les firmes).

Ensuite, on s'attache à analyser les modes d'affectation des différentes décisions. La seconde voie, dite "top-down" est beaucoup plus macroéconomique, puisqu'elle cherche à décrire et à prévoir les modifications de l'économie consécutives à une mesure de politique économique.

Depuis quelques années, des modèles pouvant être utilisés pour des études touchant à l'environnement se sont largement développés. On distingue généralement trois conceptions particulières :

- les modèles traditionnels. D'essence économétrique ou technico-économiques, ces modèles retracent les relations économiques, d'un point de vue macroéconomique, ou de manière plus spécifique, d'un point de vue énergétique. Parmi ces modèles, on peut distinguer :
 - les modèles macroéconomiques. Ceux-ci ont été utilisés pour mesurer l'impact macroéconomique des mesures d'incitation fiscale à réduire la pollution. C'est par exemple le cas des études qui portent sur la "Carbon Tax". Ils sont utilisés seuls ou couplés à un modèle technico-économique (Système européen Hermès-MIDAS¹)
 - Les modèles d'essence technico-économique. Qu'ils soient pré-existants (EFOM par exemple) ou qu'ils aient été adaptés spécialement pour l'environnement (GLOBAL 2100), ces modèles reposent sur l'existence d'un certain nombre de modules, reliés entre eux par des équations de passage.
- Les modèles d'équilibre général. Ceux-ci représentent la dernière génération de modèles mis en oeuvre pour les problèmes d'environnement. Ils proposent généralement un approche globale (au sens macroéconomique et environnementale) du problème.

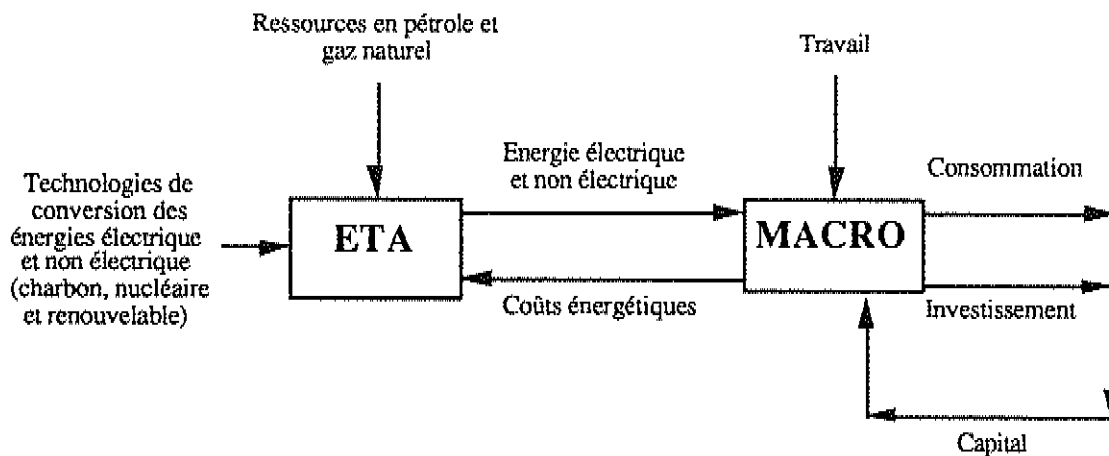
Nous ne reviendrons pas ici sur l'architecture des modèles macroéconomiques traditionnels. Ils se composent d'équations économétriques et comptables et sont

¹ HERMES : Harmonized European Research for Modeling Energy System. Développé, pour sa partie française, au laboratoire d'Économie de l'École Centrale de Paris à la demande de la Commission des Communautés Européennes. Hermès-France s'insère dans un ensemble de modèle européens du même type. Pour une présentation du modèle, voir FAUBRY et. al. [1984]. MIDAS : Modèle of Integrated Demand And Supply.

entièrement dévolus aux études macroéconomiques. Pour des informations plus précises sur l'architecture des modèles français qui ont été utilisés pour analyser les répercussions des mesures fiscales de dépollution, il sera utile de se reporter à Berthelemy et Devezeaux [1987] pour le modèle Mélodie et Faubry, Moncomble, Vidal de La Blache et Zagame [1984] pour le modèle Hermès-France.

Les modèles technico-économiques sont intéressants en ce sens qu'ils possèdent souvent un véritable module d'environnement. C'est par exemple le cas du modèle EFOM (Energy Flow Optimization Model), construit par la DG-XII de la Commission des Communautés Européennes au milieu des années soixante-dix. Il contient des informations relatives aux prix des différentes énergies, aux coûts d'investissement et aux coûts opératoires liés à la production d'énergie finale, à la transformation et à la consommation d'énergie, etc. Au milieu des années quatre vingt, EFOM a été étendu aux problèmes d'environnement et rebaptisé EFOM-Environnement (EFOM-ENV). L'horizon du modèle est d'environ vingt ans.

Graphique 1 - Schéma simplifié du modèle GLOBAL 2100



Le modèle GLOBAL 2100, développé et utilisé par Manne et Richels ([1990] et [1991]), est un descendant du modèle ETA-MACRO développé par Manne [1981]. Ce modèle est important car il a servi de point de départ à de nombreuses études, et de nombreux modèles se sont largement inspirés de son architecture. Etant l'un des premiers modèles d'une telle ampleur, il a également été très critiqué. Il a pour objectif d'estimer les coûts en termes de croissance économique d'une politique de réduction des émissions de gaz carbonique. Le modèle calcule entre autres choses, les pertes en Produit National Brut (PNB).

Le sous-modèle ETA (Energy Technology Assessment) est un modèle d'optimisation qui détermine le panier optimal de technologies nécessaire à l'approvisionnement énergétique. Il permet des substitutions entre différentes techniques de production et notamment le choix entre l'énergie électrique et l'énergie non électrique. C'est ce module qui prend en compte la contrainte de CO². A partir de la demande d'énergie agrégée (il n'y a pas de distinction de la provenance de la demande), le modèle détermine le type et le coût des équipements nécessaires pour satisfaire cette demande, à la fois au présent et dans le futur. Le modèle tient également compte du renouvellement et de l'épuisement des réserves de pétrole et de gaz ainsi que d'une volonté de taux de croissance de la production, détaillée par énergie.

Le sous-modèle MACRO est un modèle de croissance économique, qui fonctionne selon un mode de maximisation actualisée de l'utilité sous contrainte, sur la période 1990-2100. Dans MACRO, la génération de capital repose sur une hypothèse putty-clay et la fonction de production est de type C.E.S / Cobb-Douglas à quatre facteurs (capital, travail, énergies fossiles et énergie électrique) et à rendements d'échelle constants. Les facteurs sont regroupés en deux sous-ensembles : le capital et le travail d'une part, les énergies fossiles et les énergies non fossiles d'autre part. L'équation de la fonction de production est du type :

$$Y_t = [a (K_t)^\rho \alpha (L_t)^{\rho(1-\alpha)} + b (E_t)^\rho \beta (N_t)^{\rho(1-\beta)}]^\frac{1}{\rho}$$

où E représente l'énergie fossile et N, l'énergie non fossile. Le choix de cette spécification confère un caractère déterminant à la valeur de l'élasticité de substitution "capital / énergie" dans son ensemble (1 / (1 - ρ)). Les paramètres (a, b, α, β et ρ) sont fixés par calibration, c'est-à-dire sans recours à quelque estimation économétrique que ce soit.

Enfin, à ETA, a été rajouté un module environnement qui calcule les émissions de CO² proportionnelles au niveau de la consommation d'énergie. Il existe des possibilités de limitation du montant désiré des rejets de polluants, limitation qui peut être effectuée par zone géographique ou de manière globale, par le truchement d'un marché des droits d'émission¹.

¹ A partir de l'objectif politique de qualité de l'environnement (traduit en termes de montant global de rejets polluants), les industriels possèdent ou acquièrent un droit initial de pollution. Si leur rejets réels sont inférieurs à leurs droits, les entreprises peuvent céder une partie de ces derniers aux entreprises ayant dépasser leur quota. Ce type d'approche reflète le fonctionnement actuellement en vigueur aux Etats-Unis pour limiter les émissions de certains polluants.

Le bouclage "économie / énergie" se fait au niveau des coûts. Ainsi, un resserrement des contraintes de pollution ou une augmentation du prix de l'énergie se traduiront, au niveau macroéconomique, par une diminution du montant d'output nécessaire à la satisfaction de la consommation finale ou de l'investissement. De même, puisque l'investissement entre dans la composition du stock de capital futur, une baisse de celui-ci engendrera, à terme, une nouvelle diminution de la production.

De nombreuses critiques ont été adressées à ce modèle. En premier lieu, le choix des spécifications pour la nature du progrès technique pose quelques problèmes quant à ses répercussions. Celui-ci est pris en compte à trois niveaux :

- offre énergétique dans ETA ,
- demande d'énergie par des élasticités prix,
- progrès technique autonome et au niveau des facteurs de production dans MACRO (et notamment indicateur d'efficacité énergétique).

Les coefficients sont fixés par hypothèse. En ce qui concerne l'efficacité énergétique, le problème qui se pose tient à l'absence d'effets sur les émissions de polluants, ou du moins à un effet qui peut être ambigu. Si l'on considère une diminution de l'intensité énergétique à production donnée (ce qui peut se traduire par un accroissement de l'efficacité du facteur énergie pris dans sa globalité), l'effet sur les rejets n'est pas systématiquement une révision à la baisse. En effet, Hogan [1990] rappelle que le résultat ne peut être indépendant des hypothèses faites en matière de technologie. Ainsi, si l'on suppose un accroissement du coût de l'énergie (par exemple pour resserrer la contrainte de pollution), la logique veut que l'on assiste à une évolution technologique dans le secteur qui produit l'énergie. En revanche, l'effet sur les autres secteurs productif est indéterminé. Ainsi, le renchérissement de l'énergie peut provoquer un ralentissement technologique dans le secteur des biens, secteur qui est globalement dominé par un progrès technique consommateur d'énergie. Hogan [1990] indique que l'incertitude est telle qu'elle peut multiplier par quatre le coût de la réduction des émissions de CO².

On peut également considérer des limites qui tiennent aux choix des modélisateurs. Ainsi, il n'y a pas de recyclage possible dans l'économie du montant de la taxe. De même, le choix d'un seul polluant (le CO²) et l'absence de prise en compte des énergies non commerciales posent un problème de cohérence. L'omission du bois comme énergie de chauffage biaise les résultats dans des zones géographiques telles que l'Afrique ou l'Asie en ne tenant pas compte du phénomène de déforestation, pourtant de grande ampleur dans ces zones. Enfin, plus techniquement, rappelons que le couplage avec un

modèle d'optimisation (ETA) ne permet pas l'existence d'une sous-optimalité dans le secteur énergétique. Le problème principal posé par ce type de modèles est qu'ils reposent nécessairement sur une hypothèse de rationalité optimale, ce qui peut s'avérer assez éloigné de celle pratiquée dans les secteurs de demande. De même, il n'existe pas d'informations ni de traitement des éventuels effets de feed-back des surcoûts induits par les contraintes d'environnement sur les niveaux de demande.

Enfin, les modèles fondés sur une architecture et un mode de fonctionnement de type modèle d'équilibre général constituent la troisième voie de recherche en modélisation de l'environnement. L'intérêt d'utiliser un tel modèle repose sur trois points :

- la mesure exacte du coût associé à une mesure fiscale de réduction de la pollution nécessite une forte désagrégation,
- les changements technologiques doivent être endogènes,
- le modèle doit comporter une retro-action sur les variables économiques dans leur ensemble.

Construit sur ce schéma, le modèle de Jorgenson et Wilcoxon ([1990], [1992] et [1993]) prend en compte l'évolution de trente cinq secteurs industriels et quatre cent soixante-douze catégories de ménages. La dynamique du modèle repose sur une optimisation intertemporelle des choix des ménages et des entreprises.

En ce qui concerne plus précisément les fonctions de production, une approche duale a été choisie par les auteurs. Celle-ci repose sur une formulation de type Jorgenson et Fraumeni [1981], la fonction de coût intégrant un mode de détermination endogène du taux de croissance de la productivité globale pour chaque secteur. Jorgenson et Wilcoxon [1990] insistent sur l'importance qu'il y a à prendre en compte les substitutions factorielles dans leur ensemble (la plupart des modèles d'environnement ne s'intéressent qu'aux substitutions inter énergétiques), de manière à analyser les évolutions de l'emploi ou de l'investissement dans un cadre productif cohérent. Le problème posé par cette technique est le nombre très important de données nécessaires. C'est pour cette raison que bon nombre de modèles ont été estimés par calibration ou que d'autres reposent sur une structure input-output figée. Ainsi, dans le modèle M.S.G. IV (E) (Gomsrod, Johnsen et Vennemo [1990]), construit à la demande du Ministère des Finances norvégien, la production est décrite pour trente-trois secteurs et quarante biens à l'aide de fonctions de type "Leontief généralisée". Les paramètres et les valeurs des substitutions sont calibrées selon les résultats d'une étude effectuée sur la période 1962-1981 (Bye et

Frenger [1985]). La fonction de production comprend trois facteurs (capital, travail et énergie). L'énergie se divise ensuite entre énergie d'origine électrique et énergie non électrique selon une sous-fonction du même type. L'équation de la fonction est la suivante :

$$Z_{ji} = e^{-g_i t} \left[c_{jj}^i + \sum_{r \neq j} c_{jr}^i \sqrt{\frac{P_{ri}}{P_{ji}}} \right]$$

avec : j, r capital, travail et énergie
 Z_{ji} unités d'input j utilisés par le secteur i
 g_i progrès technique hicksien du secteur i
 P_{ji} prix de l'input j pour le secteur i

Le niveau de l'offre effective et de l'investissement nécessaire à la satisfaction de la demande finale est ensuite obtenu à l'aide d'une formulation input-output traditionnelle (inversion de la matrice des coefficients techniques).

L'utilité d'une estimation économétrique des comportements de production est justifiée par Jorgenson et Wilcoxon de la façon suivante :

“Un fort degré de substituabilité entre les inputs conduira à une estimation relativement faible du coût de la régulation des émissions de carbone, alors que les estimations de coût seront élevées lorsqu'il y aura de faibles possibilités de substitution. Bien que la calibration évite la lourdeur de l'estimation, elle conduit à spécifier a priori la nature des substitutions sans s'appuyer sur les réalités empiriques. Tant que le degré de substituabilité sera un déterminant important des résultats du modèle, nous considérerons que l'approche économétrique est essentielle pour analyser la régulation des émissions de carbone.”

Le choix de la méthode d'estimation est donc, pour les auteurs, aussi important que l'adoption d'une formulation à élasticités temporellement variables et à progrès technique incorporé.

Le modèle intègre également une équation de prix des services rendus par la capital, en termes de prix des investissements pour chaque début et fin de période. L'équation prend en compte un taux de dépréciation et des variables représentant la structure de l'imposition des revenus du capital. Les comportements reposent en outre sur des schémas d'anticipations rationnelles, fondées sur des prévisions parfaites. Le fonctionnement général du modèle repose sur une définition des prix des facteurs (K, L et

M) obtenus en égalisant offre et demande pour chacun d'eux. Le prix de l'output en dépend pour chacune des trente-cinq industries. A partir de ce prix, on détermine un prix d'offre, que l'on combine au prix des importations (exogènes) pour calculer le prix d'offre réel. De là proviennent les demandes globales et les exportations. A court terme, l'offre de capital est parfaitement inélastique puisqu'entièrement déterminée par les investissements des périodes antérieures. Cependant, l'existence d'une mobilité parfaite du travail et du capital permet une réallocation de ces deux facteurs entre les différents secteurs, lors de l'instauration de mesures environnementales.

Les résultats de l'étude permettent de comparer quatre états :

- le premier dans lequel aucune réglementation n'est mise en place,
- le deuxième dans lequel est instauré un contrôle de la pollution au niveau des processus industriels,
- le troisième dans lequel on contraint la pollution qui provient des véhicules à moteurs,
- le quatrième qui est une combinaison des scénarios deux et trois.

Lors de l'instauration de réglementations au niveau de la pollution industrielle, on constate des effets sur les coûts de production et sur le stock de capital, via une variation des prix d'investissements. Les réglementations ont pour effet d'obliger les entreprises à modifier les process et donc la structure du capital utilisé. Les auteurs indiquent à ce propos que l'évolution du stock de capital est vraisemblablement l'indicateur le plus important de la capacité d'adaptation de l'économie aux mesures d'environnement. Les principaux résultats obtenus par Jorgenson et Wilcoxon montrent :

- d'une part, que trois secteurs se répartissent 55 % des dépenses attribuées aux investissements de mise aux normes. Il s'agit de la chimie, du raffinage et de la métallurgie.

- D'autre part, que les investissements à but dépolluant représentent 20 % des investissements totaux pour les secteurs de la production de papier, du raffinage et de la métallurgie.

Il apparaît donc que, dans les secteurs à forte pollution, une partie des investissements dépolluants se soient substitués aux investissements traditionnels. Ceci réduit le taux de croissance de l'économie puisque ces investissements ne génèrent aucun bénéfice, si ce n'est celui de mise aux normes. Les auteurs indiquent toutefois qu'il serait nécessaire de distinguer deux types d'investissements : ceux qui sont véritablement des

investissements en faveur de la réglementation actuelle, et ceux qui tiennent plus des anticipations de nouvelles sources d'émissions de polluants. On peut en effet considérer que, quitte à modifier leur processus de production, les entreprises "dépassent" les réglementations, considérant qu'il y a un intérêt (en termes de rentabilité) à anticiper de nouvelles réglementations. La régulation entraîne vraisemblablement une croissance des coûts d'investissement dès lors que les contraintes deviennent effectives. Le seul problème est qu'il n'existe aujourd'hui aucune donnée disponible pour évaluer ce phénomène. Une autre limite du modèle tient à l'hypothèse de capital malléable et parfaitement mobile entre les secteurs. L'allocation du capital se fait sans coût et sans délai. L'instauration d'un coût d'ajustement dans la mobilité du capital pourrait être un moyen de tenir compte de certaines rigidités.

De très nombreuses études ont été effectuées à l'aide de tous ces modèles, en particulier sur les conséquences d'une modification de la fiscalité sur l'énergie. Cette modification consiste en une taxation accrue de la consommation de sources de polluants atmosphériques. Parmi ces études, on peut citer :

- Epaulard et Vielle [1991] : à l'aide du modèle Hermès-France, les auteurs analysent l'effet, sur l'économie française, d'une taxe supplémentaire sur les énergies fossiles. Les auteurs envisagent cette taxe, en utilisant, dans un premier temps, un chiffrage du BIPE sur l'augmentation du coût d'utilisation de l'énergie. Dans un second temps, ils instaurent un certain nombre de mesures d'accompagnement de manière à réduire les effets dépressifs de la taxe. Ces mesures regroupent un allègement des cotisations sociales et de l'impôt sur le revenu.

- Bartels [1992] : étude de l'impact d'une "Carbon Tax" sur la compétitivité internationale de l'industrie australienne.

- Capros, Karadeloglou et Mentzas [1990] : étude sur les conséquences de la mise en place d'une taxe au Royaume-Uni. L'analyse est effectuée à partir du système de modèles composé de MIDAS et Hermès. Deux types de taxe et deux hypothèses sont envisagées : la taxe peut être soit additive, soit multiplicative et les variantes sont effectuées avec ou sans ajustement de la génération d'électricité. Il semble que la taxe additive soit plus efficace. Les auteurs constatent également une élasticité de la réduction des émissions de CO² par rapport à un accroissement unitaire du prix moyen de l'énergie très faible.

- Carlevaro, Bertholet, Chaze et Taffe [1992] : impact d'une "Carbon Tax" sur les émissions du transport routier en Suisse.

- Charmant, Ladoux et Vielle [1992] : étude comparative d'une taxe sur l'énergie et d'une taxe sur les émissions de CO² dans le cas de la France. L'étude est faite à l'aide du modèle Mélodie. Les auteurs arrivent à la conclusion selon laquelle, si une taxe sur l'énergie dans son ensemble est plus efficace à court terme, une taxe sur les seules énergies fossiles donne de bien meilleurs résultats à long terme. Rappelons que l'horizon de simulation du modèle est 2010.

- Welsch [1992] : étude de l'efficacité des deux approches traditionnellement utilisées pour diminuer les émissions de CO², à savoir l'imposition d'une taxe et la mise en place de quotas.

De nombreuses autres études ont été effectuées sur la "Carbon Tax". Ainsi, Baron, Wise, Edmonds, Pitcher et Barns [1992], Hinchy, Thorpe et Fisher [1992], Peck et Teinsberg [1990], Pfaffenberger [1992], Siddayo et Percebois [1992] pour n'en citer que quelques-unes.

La majeure partie de ces études porte essentiellement sur les répercussions macroéconomiques des différentes mesures. On retrouve généralement des résultats quant aux modifications de la compétitivité internationale, de la consommation d'énergie, de l'emploi et du PIB. Les études plus sectorielles sont celles effectuées sur des modèles dont une partie au moins est d'essence technico-économique. Ceux-ci distinguent alors industrie, transport, transformation de l'énergie et génération d'électricité.

Les modèles spécifiques

Certaines des questions que nous avons soulevées précédemment ne peuvent être résolues que par l'utilisation de méthodes spécifiques à l'analyse des répercussions des mesures dépolluantes. Il en est ainsi des techniques issues de la théorie de Leontief sur l'utilisation de matrices input-output, ou de l'application de la méthode des effets aux problèmes d'environnement. Il est nécessaire de noter ici quelques différences dans l'emploi de certains termes. Jusqu'ici, nous avons supposé que la combustion énergétique regroupait toutes les utilisations possibles de l'énergie, en d'autres termes, son incorporation au processus de production. Dans les études qui portent spécifiquement sur le calcul des émissions et la détermination de leurs sources, on distingue généralement deux utilisations de l'énergie : la combustion et la matière première. Dans le premier cas,

il ne s'agit que de la consommation d'énergie dite "sous chaudière", c'est-à-dire la consommation à but de chaleur exclusivement. L'énergie comme matière première est en revanche totalement dévolue au procédé de fabrication, et est dite "hors chaudière". Les analystes effectuent cette distinction en arguant que seule la combustion génère des polluants atmosphériques importants. Cette distinction a donc pour but de donner une nouvelle hiérarchisation des secteurs polluants.

"L'un des réponses les plus importantes des économistes aux problèmes d'environnement a été d'étendre l'utilisation des modèles input-output à l'étude des relations entre l'économie, l'activité et les émissions de matières polluantes." (Cumberland et Stram [1976])

C'est par ces termes élogieux que ces auteurs ont salué l'utilisation des méthodologies de type input-output pour l'étude des problèmes d'environnement. L'utilisation de telles méthodes remonte en fait au milieu des années soixante. Quelque peu tombée en désuétude, principalement du fait des chocs pétroliers (qui ont semblé plus important à l'époque), cette méthode est de nouveau utilisée depuis la fin des années quatre-vingt.

L'utilisation de méthodes input-output suppose implicitement que les déchets générés par une industrie ont la même structure, et ce quel que soit le bien produit. De même, chaque industrie génère des déchets dans une proportion fixe de l'output. Une idée semblable s'applique à la consommation finale : la consommation d'un bien génère des déchets dans une proportion fixe du montant consommé. Partant de ce constat, la désagrégation choisie des secteurs industriels est primordiale. Si chaque industrie génère une proportion fixe de polluants, il va de soi que plus les secteurs sont désagrégés, plus l'analyse peut être affinée. La deuxième hypothèse qui sous-tend l'utilisation de ces modèles est que les modifications de l'activité (au sens d'une évolution technologique) sont internalisées par le secteur qui produit la technologie. Il y a donc, pour les autres secteurs, consommation intermédiaire de technologie. Une telle analyse est bien sûr basée sur un concept d'externalités. La pollution est considérée comme un produit fatal de la production comme de la consommation. Les déchets que l'on peut considérer sont au nombre de cinq¹ :

- déchets gazeux,
- déchets liquides,

¹ Dans la suite de l'exposé, nous appellerons "déchets" l'ensemble des polluants émis par une activité économique.

- déchets solides,
- chaleur,
- bruit.

Tableau 1 - Exemple de matrice input-output adaptée pour l'environnement

Secteurs producteurs \ Secteurs consommateurs	Biens et Services	Industrie	Demande Finale	Environnement
Biens et Services		INPUT	INPUT	Déchets dus à l'utilisation des biens par la demande finale
Industrie	OUTPUT de l'industrie			Déchets dus à l'utilisation des biens par l'industrie
Environnement		INPUT	INPUT	

d'après Forsund [1985]

A la lecture de la matrice (tableau (1)), on se rend compte que les déchets sont considérés comme des inputs de l'industrie et de la demande finale, alors que, dans le même temps, ces deux secteurs produisent des déchets qui sont des produits fatals des consommations finales ou intermédiaires. L'intérêt de cette analyse repose sur la conciliation qu'elle permet entre les deux approches théoriques de la pollution, à savoir que celle-ci est, soit un produit fatal (c'est le cas des déchets ménagers qui sont liés à la consommation des ménages), soit un facteur de production.

L'utilisation de matrices de coefficients de pollution repose sur la définition de coefficients d'émission proportionnels à l'output pour chacune des branches de la Comptabilité Nationale. Il est possible également de définir un coefficient proportionnel à chaque consommation intermédiaire d'une branche considérée, et d'obtenir une décomposition assez complète du processus de pollution. Dans un souci de simplification, et lorsque l'on s'intéresse en premier lieu à la pollution atmosphérique, on considère généralement que seules les consommations intermédiaires d'énergie présentent des coefficients d'émission. Des études ont été effectuées pour vérifier le bien fondé de ces notions. Ils semble que :

- la justesse de l'analyse dépende en premier lieu du niveau de désagrégation choisi. Plus celui-ci est fin, meilleurs sont les résultats.

- L'adéquation sur le passé des résultats obtenus à l'aide de l'un ou l'autre des indicateurs ne permette pas de hiérarchiser leur intérêt. Breuil et Houllier [1992] indiquent que, dans le cas de la combustion, le coefficient sur les consommations intermédiaires donne de meilleurs résultats, mais que dans le cas des rejets de SO² et de NO_x, le coefficient sur l'output soit plus proche de la réalité.

- La principale limite de cette approche réside dans le caractère exogène de l'effet des réglementations ou du progrès technique. Lorsque l'on constate une variation du coefficient d'émission, il n'est pas possible d'en connaître la raison exacte. Breuil et Houllier [1992] prennent l'exemple du tableau (2) pour montrer l'effet indéterminé d'une variation de la productivité.

Tableau 2 - Effet du progrès technique et la variation du facteur d'émission sur le niveau des rejets

Variation de la productivité des facteurs	Variation du facteur d'émission		
	Réduction	Augmentation	Stabilité
Variation positive	-	±	-
Variation négative	±	+	+

source : Breuil et Houllier [1992]

Les signes "+" désignent une augmentation des émissions de polluants, les signes "-", une diminution. On voit ainsi que dans le cas d'une variation similaire de la productivité des facteurs et du facteur d'émission, le résultat ne peut pas être connu.

La méthode des effets élargit quelque peu le champ théorique des modèles input-output. Initialement élaborée par l'Institut d'Economie et de Politique de l'Energie (I.E.P.E.) dans les années soixante-dix, cette méthode a été appliquée à l'analyse des évolutions de la consommation énergétique. Depuis quelques années, des travaux ont été effectués pour l'adapter au problème spécifique de la pollution atmosphérique¹.

La méthode repose sur une décomposition de la consommation d'énergie en trois éléments, de manière à isoler un effet d'intensité (évolution de l'efficacité productive), un effet d'activité et un effet de structure. L'équation retenue est du type :

$$E = \sum_i \left[\frac{E_i}{VA_i} * \frac{VA_i}{PIB} * PIB \right] \quad (2)$$

avec :

¹ Voir par exemple HUGUES [1991] ou BREUIL [1992].

E :	consommation d'énergie
(E _i /VA _i)	contenu énergétique du secteur i
(VA _i /PIB)	poids du secteur par rapport à l'ensemble de l'économie

On peut ensuite décomposer l'évolution de la consommation d'énergie en fonction de l'évolution de ses trois composantes et isoler ainsi les différents effets. Cette méthode s'applique en fait à toute analyse d'évolution d'une grandeur en fonction de celles qui la composent. Elle est donc directement applicable à l'analyse de l'évolution des émissions de polluants atmosphériques à la condition que l'on dispose de données fiables et précises sur ce sujet. Appliquée aux problèmes d'environnement, la méthode des effets peut permettre d'isoler cinq effets :

- un effet d'activité,
- un effet d'intensité,
- un effet de substitution,
- un effet de structure,
- un effet facteur d'émission.

La partie dite "effet de substitution" prend en compte la partie des émissions de polluants due à l'utilisation de telle ou telle sorte d'énergie. Il est par exemple évident que l'utilisation de fuel ou de gaz n'est pas indifférente du point de vue des rejets polluants. L'effet "facteur d'émission" évalue l'impact d'une modification du facteur d'émission. On décompose donc l'évolution de la consommation d'énergie en quatre grands groupes et on écrit :

$$\Delta E = EA + EI + ES + EF + EST \quad (3)$$

avec EA, effet d'activité, EI, effet d'intensité, ES, effet de substitution, EF, effet facteur et EST, effet de structure. Si K est un polluant particulier, les émissions de K seront données par l'équation (4). Y représente la production, F_i, le facteur associé à l'énergie i (c pour charbon, g pour gaz et p pour pétrole) et E_i la consommation d'énergie i.

$$EK = \frac{E}{VA_i} \left[F_c \frac{E_c}{E} + F_g \frac{E_g}{E} + F_p \frac{E_p}{E} \right] * \frac{VA_i}{PIB} * PIB \quad (4)$$

Les cinq effets permettent ensuite d'évaluer finement les raisons de l'évolution des émissions de polluants en fonction de celle de l'un des éléments¹. Ceux-ci prennent compte :

- effet d'activité : cet effet est dû à l'accroissement de l'activité économique dans son ensemble.
- effet d'intensité : cet effet est dû à la variation de l'intensité énergétique des procédés.
- effet de substitution : dû aux éventuelles substitutions inter-énergétiques.
- effet de structure : dû aux variations du poids de l'industrie dans le total.
- effet facteur d'émission : dû aux variations des coefficients d'émission. Cet effet regroupe l'évolution de la qualité des combustibles, l'évolution des procédés de combustion et la mise en œuvre ou l'amélioration d'installations d'épuration (filtrage des fumées par exemple).

Cette méthode, relativement simple dans la formulation, pose toutefois des problèmes statistiques et méthodologiques importants. Ainsi en est-il de la disponibilité des données, du choix de la désagrégation ou de la correspondance entre des séries macroéconomiques traditionnelles (issues de la Comptabilité Nationale) et des séries d'émissions de polluants (issues par exemple du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA)).

Le tableau (3) regroupe les résultats obtenus par Hugues [1991] sur l'industrie française entre 1980 et 1988. A la lecture du tableau, il apparaît clairement que l'effet de substitution est un effet dominant pour les trois polluants concernés. La majeure partie de la diminution des émissions de polluants est due à l'utilisation de sources d'énergie alternatives. Dans le cas du dioxyde de soufre, la diminution de l'intensité énergétique a eu des résultats intéressants puisque cet effet représente environ 7 % de la réduction. La contribution positive de l'effet "activité" met à jour la relation positive qui existe entre croissance et pollution. Dans les trois cas, la croissance de l'activité économique entre pour un quart (en valeur absolue) dans l'effet total. La seule autre contribution positive est l'effet facteur d'émission dans le cas du NOx.

¹ Pour une présentation formalisée des différents effets, le lecteur intéressé pourra se reporter à BREUIL [1992] ou HUGUES [1991].

Tableau 3 - Résultats de la méthode des effets sur la période 1980-1988 en niveau

	activité	intensité	substitution	structure	facteur	TOTAL
SO ²	374,03	- 100,71	- 1880,06	- 77,46	- 1,07	- 1685,27
NO _x	22,13	- 1,45	- 103,98	- 8,50	7,00	- 84,80
poussières	5,98	- 0,35	- 33,25	- 2,07	- 0,80	- 30,49

source : Hugues [1991]

Les méthodes technico-économiques appliquées à la pollution atmosphérique sont lourdes d'enseignements. D'un point de vue analytique, leur intérêt est évident et réside dans la décomposition très fine de l'évolution de chacun des déterminants du processus d'émission. Le degré de finesse de l'analyse est uniquement borné par la disponibilité de données, et par les moyens à mettre en œuvre pour assurer la correspondance entre des informations qui proviennent à la fois de la Comptabilité Nationale et de sources plus spécifiques (pour les émissions de polluants notamment). Une fois déterminés les facteurs d'émissions pour chaque énergie, il est possible de calculer chaque contribution à la pollution. Les critiques que l'on peut effectuer à l'égard de cette méthode sont de deux ordres :

- tout d'abord, l'utilisation en est essentiellement rétrospective. Une utilisation prospective de la méthode des effets suppose un jeu d'hypothèses qui détermineront largement les résultats. S'il est possible de s'appuyer sur des scénarios en matière d'évolution des consommations d'énergie (et donc des substitutions), de l'activité économique ou des consommations unitaires des équipements (pour l'effet intensité), il est revanche nettement plus difficile de prévoir l'évolution du facteur d'émissions. Pour ce faire, il serait nécessaire de mettre en œuvre des scénarios d'évolution pour ces facteurs. Or, ceux-ci dépendent de deux effets distincts : la qualité de l'énergie considérée et la nature du procédé utilisé. Un scénario exogène d'évolution de ces coefficients suppose donc des hypothèses sur l'évolution des techniques de production, sur l'innovation et le progrès technique en d'autres termes, ainsi que des hypothèses sur la transformation des énergies primaires. L'amélioration de la qualité des combustibles provient de la nature des processus de production du secteur énergétique.

- D'autre part, et ceci découle du premier point, une telle analyse ne peut qu'être faite a posteriori. Non seulement dans le temps, mais également à chaque période. Une fois connu un certain nombre de variables, il est possible de connaître le contenu en pollution de chacun des postes du processus. En revanche, on ne connaît pas les sources

ni les contraintes des décisions prises. Ainsi, si l'effet substitution domine, on ne peut savoir pourquoi. On peut supposer que les résultats décrits ici résultent de choix optimaux effectués par le secteur considéré, mais il est impossible de connaître la teneur de ce choix. Le rôle des prix, de la fiscalité, ou de la disponibilité des équipements de remplacement sont des thèmes qui ne peuvent être traités ainsi.

Si les méthodes spécifiques de calcul des émissions apportent sans conteste des informations supplémentaires par rapport aux modèles décrits plus haut, celles-ci laissent encore planer des zones d'ombre importantes. La plus importante de toutes concerne le manque d'informations quant à une quelconque évolution. L'absence de connaissance des sources économiques des modifications constatées ne peut qu'engendrer des interrogations pour le long terme. Il convient de garder à l'esprit que le problème de la pollution (quelle que soit sa source) est un problème qui doit se traiter sur le très long terme. L'horizon des modèles macroéconomiques ou technico-économiques spécialement voués aux études environnementales avoisine le siècle. Or, sur des horizons aussi lointains, la modification des comportements devient un problème de premier plan, et il convient de s'interroger sur le rôle de l'innovation en matière de dépollution. On ne peut se contenter d'indiquer les résultats de telle ou telle mesure de politique économique sans effectuer des hypothèses nombreuses sur l'évolution des comportements des entreprises face au problème de la pollution. Il va de soi qu'un simple choix entre suivre exactement les réglementations ou anticiper des réglementations futures peut être lourd de conséquences.

L'innovation technologique à venir : le noeud du problème

D'après ce qui précède, on peut classer les études chiffrées portant sur l'environnement en deux grands ensembles :

- les analyses des modèles. Celles-ci sont plutôt d'ordre macroéconomique et chiffrant les conséquences en termes de croissance, d'emploi, d'investissement, etc., des mesures gouvernementales de réduction de la pollution. Les études plus sectorielles se contentent généralement de distinguer les secteurs définis par la nomenclature des énergéticiens (résidentiel-tertiaire, transport, industrie, secteur de la transformation de l'énergie). Quelques analyses chiffrant également le montant des émissions de polluants, en se limitant généralement aux polluants atmosphériques. Seuls les modèles d'équilibre

général permettent une description particulièrement détaillée de l'économie, sans pour autant transiger avec la cohérence macroéconomique globale.

- Les analyses issues de méthodes spécifiques. Celles-ci utilisent ou adaptent des méthodes input-output ou technico-économiques et s'attachent à décrire les sources des variations des émissions de polluants. Comme dans la méthode des effets, l'approche peut être sectorielle (au sens des branches de la Comptabilité Nationale) et très désagrégée. La grande différence par rapport aux modèles provient de la différenciation qui est faite entre la consommation d'énergie à usage de chaleur, et celle à usage de procédé. Dans le premier cas, seule l'énergie utile au fonctionnement des chaudières est pris en compte. Dans le second cas, c'est l'énergie comme intrant du processus de production qui est comptabilisé.

Il est relativement difficile de trouver des études qui portent de manière plus précise sur les processus de production. Les hypothèses faites en la matière sont généralement assez frustes puisqu'on suppose au mieux, un arbitrage entre l'achat d'unités dépolluantes ou le paiement de la taxe (voir les modèles qui prennent en compte les coûts d'innovation). Il semble cependant évident que l'instauration de mesures incitatives à la réduction des émissions de polluants se traduise par un changement dans les processus de production. Dans le cas qui nous occupe, les mesures de dépollution que peuvent prendre les entreprises sont diverses et dépendent de la source de pollution considérée :

- si la pollution est due au process en tant que tel, le choix se fera entre l'installation d'une unité dépolluante à la sortie de la chaîne de production, et la modification du processus de production. L'arbitrage dépend à la fois des coûts de mise en œuvre, de l'état de la technologie, et surtout de l'accès possible à celle-ci. Ces problèmes sont de nature plus microéconomique que macroéconomique et nécessitent des approches d'analyses différentes que nous aborderons plus loin.

- Si la réduction de la pollution porte sur la teneur en polluants du produit fini, le problème est quelque peu différent. Si l'on considère, par exemple, le cas des automobiles "recyclables", leur mise au point nécessite des changements dans les matières premières non énergétiques, et donc des substitutions entre celles-ci. Qu'en est-il alors du capital utilisé ? Les machines utilisées pour le moulage des différents éléments sont-elles les mêmes ? Y a-t-il un changement dans la structure du capital ? Si oui, quelles en sont les conséquences sur la structure de la main d'œuvre ? On peut considérer que le problème est le même pour certains biens de consommations finales, notamment ceux sur

lesquels a été fait un effort en matière de réduction du bruit (voir tous les appareils électro-ménagers).

En résumé, on considère que l'instauration d'une taxe sur les polluants a quatre types de conséquences :

- sur le système énergétique :
 - substitutions entre différentes formes d'énergie,
 - réduction de la demande totale d'énergie,
 - effets sur la transformation d'énergie primaire et sur la génération d'électricité.
- sur la demande macroéconomique :
 - nouvelle allocation de la consommation, substitutions possibles entre différents produits.
- sur l'offre macroéconomique :
 - substitutions entre facteurs de production,
 - variation des coûts et des capacités,
 - évolution des processus d'innovation.
- sur l'équilibre macroéconomique ex-post :
 - effets de la hausse des coûts et des prix
 - effets sur le capital et le travail,
 - effet sur les consommations intermédiaires (évolution de la nature des composants),
 - effets sur les ressources gouvernementales.

Les deux approches décrites ci-dessus sont donc relativement différentes et traitent de deux aspects distincts du problème de la pollution. Toutefois, aucune d'entre elle n'est à même de décrire l'évolution du processus de production ni le rôle du progrès technique ou de l'innovation industrielle à long terme. Les modèles ont une vision trop globale et oublient souvent qu'il existe une très grande disparité entre les rejets de déchets de deux firmes de la même branche. L'incidence de réglementations environnementales peuvent avoir des effets radicalement différents selon la branche, le secteur, ou même l'entreprise. Or, si les politiques d'environnement peuvent ne pas affecter l'innovation

macroéconomique agrégée, une étude menée en 1981 aux Etats-Unis¹ a montré que les réglementations avaient engendré une modification structurelle profonde de l'innovation sectorielle. Celle-ci porte plus, semble-t-il, sur des produits sûrs, c'est-à-dire des produits qui rentreront dans les normes gouvernementales, même si une demande existe pour des produits à risques.

Un second point souvent flou dans les modèles est la nature du signal reçu par les entreprises lors de la mise en place d'une réglementation. Les modèles considèrent généralement la mesure de politique économique comme un choc exogène, dont la seule différence avec les chocs pétroliers repose sur la non-affection des équilibres extérieurs. Malgré tout, les mesures sont analysées comme des chocs, c'est-à-dire comme quelque chose d'imprévu sur lequel les entreprises n'ont pas d'ascendant. Or, si l'on peut considérer qu'il en a été ainsi au moment de la mise en place des premières réglementations, il ne faut pas oublier que celles-ci datent des années soixante-dix, et que, dans le cadre des études qui portent sur le très long terme, une telle hypothèse est totalement abusive. Les modèles qui ont pour horizon la fin du prochain siècle (dont GLOBAL 2100) reposent sur des fonctions à coefficients fixes et sur des structures figées des comportements de substitution. Il semble pourtant que l'évolution de ces comportements devraient être au centre de l'analyse, ne serait-ce que pour internaliser les effets des anticipations à long terme. D'une manière générale, la prise en compte de structures figées des comportements suppose une attitude attentiste de la part des entreprises, celles-ci ne réagissant qu'a posteriori aux mesures gouvernementales. Si une hypothèse d'anticipation parfaite du régime des prix est supposée dans le modèle de Manne et Richels [1990], celle-ci n'a pas d'effets sur le comportement d'innovation. Pourtant, de nombreux analystes s'accordent sur le rôle central que jouera, dans l'avenir, l'innovation industrielle. Pour Hourcade [1991], *“l'immobilité des comportements de substitution énergie/autres biens traduit l'absence de jeu sur l'innovation à long terme, alors que ce devrait être le facteur principal de discrimination, à cet horizon, entre internalisation ou non des risques climatiques”*. On retrouve le même constat chez Hogan [1990], qui indique :

“L'importance comparée des trends de productivité et des effets de substitution peut énormément varier lorsque l'horizon (de l'étude) dépasse la décade ou le siècle. Aussi, le sens commun et l'expérience empirique suggèrent que l'évolution de la technologie est sans doute l'effet le plus

¹ in OCDE [1985].

important , et peut même dominer les simples substitutions entre facteurs qui résulteraient de la pénurie d'une ressource particulière."

Si l'importance de l'évolution technologique est, pour tout le monde, au centre des interrogations sur l'avenir, il n'en reste pas moins que l'on entre ici dans le domaine des anticipations. C'est vraisemblablement à ce niveau que pourront être effectuées des améliorations dans la modélisation des conséquences des réglementations environnementales.

S'il semble acquis que le comportement d'innovation des firmes, a une influence déterminante sur l'évolution économique (à la fois en réponse et de manière à anticiper les réglementations), peu d'études traitent aujourd'hui de ce problème. Ainsi, il existe une controverse sur les conséquences des politiques environnementales sur l'innovation industrielle. Pour certains, les mesures sont réductrices du progrès technique, pour d'autres elles en sont un moteur. En fait, dès lors que l'on distingue entre innovation à but commercial et innovation de mise aux normes, la question peut se régler d'elle-même. On peut estimer que les réglementations vont accroître la partie de l'innovation dévolue à la mise aux normes, tandis qu'elles vont diminuer l'innovation à but commercial. Dans tous les cas, les montants alloués à l'innovation nécessaires au respect des nouvelles réglementations seront autant de moins dévolus à l'innovation commerciale. D'autre part, la formalisation de cette question reste difficile. A ce propos, Hourcade [1991] rappelle :

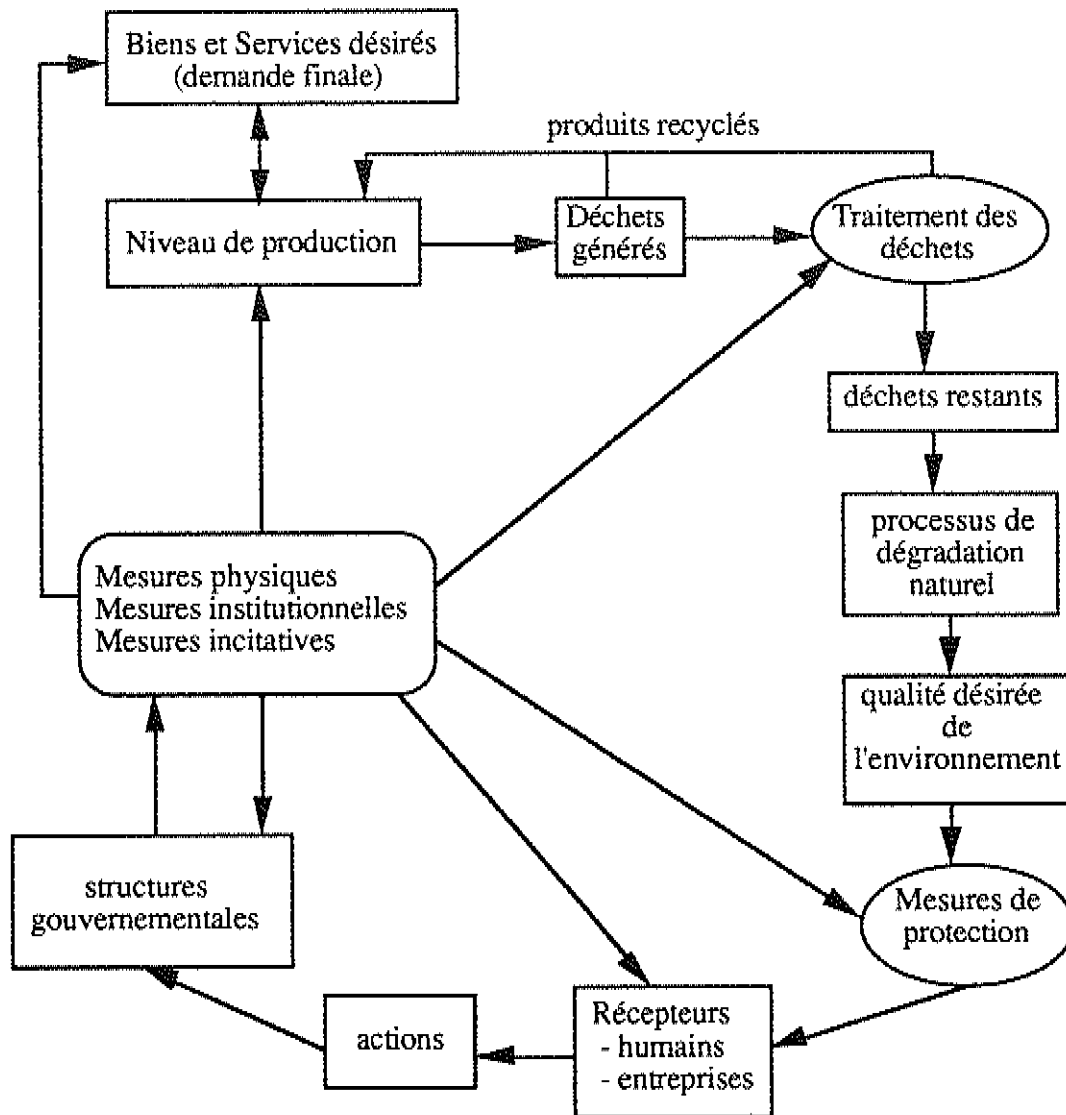
"Même sur le passé, il est difficile de discriminer économétriquement ce qui relève d'un progrès technique "naturel" autonome par rapport au prix ; mais, au sein de l'effet prix, on dispose d'encore moins de moyens de distinguer entre ce qui relève d'une adaptation des arbitrages microéconomiques à court terme et ce qui relève des comportements d'innovation avec ce qu'ils comportent de création d'irréversibilités liées à une transformation des anticipations sur les prix de l'énergie à long terme."

On se heurte ainsi à un double problème. D'une part, la représentation du futur à partir du passé ne peut se faire qu'en reproduisant les comportements, en paramétrant les fonctions ou en intégrant une structure d'anticipations a priori. D'autre part, les modèles ne peuvent que simuler l'impact d'une décision sur un système économique existant ou prévu. Or, les mesures gouvernementales en faveur de la réduction de la pollution auront, de façon certaine, des conséquences profondes sur les comportements. Si l'on peut considérer qu'à court terme, la technologie structure les coûts, ce sont les conditions du marché anticipées qui structurent l'innovation technologique. Or, la réaction des secteurs

productifs à l'environnement et ses contraintes dépend essentiellement des capacités et des mises en œuvre de l'innovation. On peut considérer que les études de type "Carbon Tax", qui reviennent à augmenter artificiellement le coût des énergies fossiles, prennent en compte ces modifications de comportement par le biais d'un effet prix traditionnel. Toutefois, et comme dans le cas des chocs pétroliers, il est vraisemblable que cette augmentation artificielle des coûts se traduise par des modifications profondes des processus de production, à un terme tout-à-fait indéterminé. Or, les conséquences de ces modifications ne peuvent être analysées dès lors que les modèles reposent sur des structures figées et moyennes. Pour prendre un exemple concret, il est possible que certaines branches décident une substitution vers des énergies moins polluantes (ce qui diminuerait à nouveau leur coût), que d'autres se tournent vers la mise en place d'unités de dépollution (traitement des fumées par exemple) et ne changent rien à leur consommation d'énergie, et que d'autres encore, préfèrent, pour un certain nombre de raisons, payer le surcoût induit par la réglementation. Ce troisième cas peut exister si les équipements de l'entreprise sont trop jeunes pour qu'il soit optimal de les remplacer (quel que soit le montant du surcoût) ou si l'entreprise anticipe des réglementations postérieures, qui risqueraient de rendre obsolètes les nouveaux équipements utilisés.

De ce point de vue, il semble évident qu'il faille tenir compte de différents scénarios de long terme quant à l'évolution des process et à la nature de l'innovation. L'apport des modèles d'équilibre général calculable est alors indéniable par rapport aux modèles économétriques. Ils permettent en effet de tenir compte d'une cohérence macroéconomique et technico-économique globale, tout en définissant plusieurs scénarios d'anticipations. Une fois la cohérence assurée, le modèle donne une image stabilisée de l'économie, dans laquelle les anticipations ont joué, et qui comporte une fonction de production implicite.

Graphique (7) - Structure générale de l'impact des décisions d'environnement



d'après : James [1985]

Les répercussions des réglementations en matière d'environnement ont donc des effets qui restent très incertains. Nous avons retracé, sur le schéma (7), les mécanismes principaux d'action des mesures sur les grands postes économiques. Partant de la qualité désirée de l'environnement, il convient de mettre en place des mesures de protection, mesures qui dépendront de la volonté et de l'action des acteurs humains, mais qui ne pourront être mises en place qu'en fonction de l'existence d'un certain nombre de structures institutionnelles et politiques. La mise en place de contraintes se répercute ensuite sur le niveau de production et sur la structure de la demande (on assiste ainsi aujourd'hui à une demande accrue en faveur des produits dits "propres"). Les interactions

entre la demande et l'offre sont d'un type macroéconomique traditionnel. C'est donc au sein même du bloc intitulé "niveau de production" que se pose l'essentiel des problèmes. Si la partie "traitement des déchets" prend en compte ce que l'on appelle aujourd'hui "l'éco-industrie", elle englobe également les modifications du processus de production dits "en bout de chaîne". Toutes les autres mesures agissent directement sur le processus de production.

Conclusion

Les outils quantitatifs utilisés pour évaluer et prévoir les conséquences de mesures anti-pollution sont nombreux et très diversifiés. La complexité du problème se traduit malgré tout par la persistance de zones d'ombre, tenant notamment aux réactions possibles des firmes et à l'évolution des processus de production. S'il est clair que la technologie n'évolue véritablement que sous l'influence de l'innovation et du progrès technique, il n'en reste pas moins que les raisons qui conduisent à décider d'innover ne sont pas aisées à formaliser. D'autre part, l'utilisation de modèles est forcément réductrice, dans la mesure où les comportements sont pris en compte de manière agrégée. Or, les réactions des firmes peuvent être largement diversifiées, notamment du fait que les dépenses de recherche-développement qui conduisent à l'innovation présentent également un caractère éminemment stratégique. Il pourrait donc être utile d'utiliser des théories alternatives, soit du type théorie des jeux (pour prendre en compte l'asymétrie des prises de décisions et le rôle de la concurrence) soit dérivées des théories évolutionnistes¹ (de manière à intégrer le rôle de l'apprentissage et le caractère local de l'évolution technologique).

Si l'on passe outre le problème de la prise de décision, il reste que :

- la réduction de la pollution nécessite l'utilisation d'une partie du potentiel d'innovation des firmes,
- les équipements de contrôle nécessitent l'emploi d'une main d'oeuvre nouvelle et qualifiée (ce qui devrait jouer à terme en faveur de l'emploi),

¹ Voir par exemple NELSON et WINTER [1982], GOMULKA [1990] ou GAFFARD [1990] pour des présentations précises de ces théories.

- les incertitudes concernant la mise en place des réglementations, couplées aux incertitudes dues à la mise en place de l'Europe (et des réglementations nouvelles qui pourraient en découler), sont des facteurs inhibant de tous les investissements (qu'ils soient matériels ou immatériels, c'est-à-dire dévolus à la recherche-développement ou à toute autre forme de dépenses).

- Enfin, il est nécessaire de faire des choix quant à la nature des polluants que l'on veut réduire. Par exemple, les essences sans plomb permettent de diminuer les rejets de CO dans l'atmosphère, mais n'ont pas d'effets sur le gaz carbonique (CO²). D'autre part, il est possible que la réduction d'un type de rejets se traduisent par l'apparition d'une nouvelle source de pollution, ce qui accroît encore l'incertitude des firmes quant à l'évolution des réglementations et bloque, une fois encore l'innovation industrielle.

Bibliographie

ALBA-SAUNAL N. (1993), "Les substitutions factorielles dans l'industrie : une analyse théorique et économétrique" (Thèse de Doctorat, Université de Paris 1, à paraître)

BARON M.R., WISE M.A., EDMONDS J.A., PITCHER H.M., BARNS D. (1992), "The second generation model of greenhouse gas emissions, background and initial development" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-105 à I-112)

BARTELS R. (1992), "The effect of a carbon tax on Australian industry" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-1 à I-6)

BERTHELEMY JC., DEVEZEAUX DE LAVERGNE JG. (1987), "Le modèle Mélodie : un modèle énergétique de long terme pour l'économie française" (Revue d'Economie Politique, vol 97, N° 5, pp649-672)

BREUIL JM. (1992), "Modélisation économique des émissions de polluants atmosphériques" (Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, ENSPM, décembre)

BREUIL JM., HOULLIER C. (1992), "Inventaire d'émission prospectif : une approche technique ou économique" (XXXIII Colloque international de l'AEA-Econométrie de l'environnement, Genève, 9-10 janvier)

CAPROS P., KARADELOGLOU P., MENTZAS G.N. (1990), "Carbon-Tax policy and its impacts on CO2 emission" (Paper presented at a meeting organized by the Commission of European Communities, DG XII, Brussels, April 26)

CARLEVARO F., BERTHOLET JL., CHAZE JP., TAFFE P. (1992), "Impacts of a carbon tax on the emissions of car transport in the Switzerland, an engineering-econometric model" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-7 à I-14)

CHARMANT A., LADOUX N., VIELLE M. (1992), "Have hydraulic and nuclear power to be charged for greenhouse effects" (in "*Coping with the energy future,*

markets and regulations", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-113 à I-125)

EPAULARD A., VIELLE M. (1991), "Effets macroéconomiques d'une hausse de la fiscalité sur l'énergie fossile" (Revue de l'Energie, N° 431, juin, pp381-387)

FAUBRY E., MONCOMBLE JE. VIDAL DE LA BLACHE O., ZAGAME P. (1984), "Le modèle Hermès-France" (Economie et Prévision, N° 66, pp3-29)

FORSUND F.R. (1985), "Input-output models, national economic models, and the environment" (in Kneese et Sweeney eds., Handbook of natural resource and energy economics, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, vol 1, pp325-344)

GAFFARD J.J. (1990), "Economie industrielle et de l'innovation" (Daloz, Paris)

GOMULKA. (1990), "The theory of technological change and economics growth" (Routledge, London)

HINCHY M.D., THORPE S.J., FISHER B.S. (1992), "Quantifying a tradable emissions scheme" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-95 à I-104)

HOGAN W.W. (1990), "Comments on Manne and Richels, CO2 emission limits, an economic cost analysis for the USA" (The Energy Journal, vol 11, N° 2, April, pp75-86)

HOURCADE J.C., BARON R. (1991), "Traitement de l'innovation et coûts à long terme de la réduction des émissions de CO²" (Revue de l'Energie, N° 427, janvier , pp42-53)

HUGUES N. (1991), "Analyse quantitative des effets de déterminants technico-économiques de la pollution de l'air sur son évolution historique en France" (Rapport de stage, CITEPA, août)

JAMES D. (1985), "Environmental economics, industrial process models, and regional-residuals management models" (in Kneese et Sweeney eds., Handbook of natural resource and energy economics, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, vol 1, pp271-324)

JORGENSON D.W., FRAUMENI B.M. (1981), "Relative prices and technical change" (in Berndt et Field Eds., *Modeling and measuring natural resource substitution*, MIT Press)

JORGENSON D.W., WILCOXEN P.J. (1990a), "Environmental regulation and U.S. economic growth" (*Rand Journal of Economics*, vol 21, N° 2, summer, pp314-340)

JORGENSON D.W., WILCOXEN P.J. (1990b), "The cost of controlling U.S. carbon dioxide emissions" (Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for climate Policy analysis, Washington D.C., October 22-23)

MADURO , SCHAUERHAMMER. (1992), "Ozone, un trou pour rien" (Editions Alcuin, Paris)

MANNE A.S. (1990), "Global 2100, model formulation" (Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for climate Policy analysis, Washington D.C., October 22-23)

MANNE A.S., RICHELIS R.G. (1990), "CO2 limits, an economic cost analysis for the USA" (*The Energy Journal*, vol 11, N° 2, April, pp51-74)

MANNE A.S., RICHELIS R.G. (1990), "The costs of reducing U.S. CO2 emissions -- Further sensitivity analysis" (*The Energy Journal*, vol 11, N° 4, pp69-78)

NELSON R.R., WINTER S.G. (1982), "An evolutionary theory of economic change" (Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Mass.)

PFAFFENBERGER W. (1992), "The cost of a CO2 reduction, an application of the Global 2100 model to Germany and France" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-141 à I-150)

SIDDAYAO C.M., PERCEBOIS J. (1992), "Energy and the global warming issue in developping countries, analyzing the incidence of a fuel carbon tax and its policy implications" (in "*Coping with the energy future, markets and regulations*", 15th Annual International Conference, 28-20 mai 1992, IAEE, Tours, France, pp I-1 à I-6)

Déjà parus

- CEG-1. D. PERRUCHET et J.-P. CUEILLE,
Compagnies pétrolières internationales : intégration verticale et niveau de risque.
Novembre 1990.
- CEG-2. C. BARRET et P. CHOLLET,
Canadian gas exports : modeling a market in disequilibrium.
Juin 1990.
- CEG-3. J.-P. FAVENNEC et V. PREVOT,
Raffinage et environnement.
Janvier 1991.
- CEG-4. D. BABUSIAUX,
Note sur le choix des investissements en présence de rationnement du capital.
Janvier 1990.
- CEG-5. J.-L. KARNIK,
Les résultats financiers des sociétés de raffinage distribution en France 1978-1989.
Mars 1991.
- CEG-6. I. CADORET et P. RENOUE,
Elasticités et substitutions énergétiques : difficultés méthodologiques.
Avril 1991.
- CEG-7. I. CADORET et J.-L. KARNIK,
Modélisation de la demande de gaz naturel dans le secteur domestique : France,
Italie, Royaume-Uni 1978-1989.
Juillet 1991.
- CEG-8. J.-M. BREUIL,
Emissions de SO₂ dans l'industrie française : une approche technico-économique.
Septembre 1991.
- CEG-9. A. FAUVEAU, P. CHOLLET, F. LANTZ,
Changements structurels dans un modèle économétrique de demande de carburant.
Octobre 1991.
- CEG-10. P. RENOUE,
Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE.
Décembre 1991.

- CEG-11. E. DELAFOSSE,
Marchés gaziers du Sud-Est asiatique : évolutions et enseignements.
Juin 1992.
- CEG-12. F. LANTZ, C. IOANNIDIS,
Analysis of the French gasoline market since the deregulation of prices.
Juillet 1992.
- CEG-13. K. FAID,
Analysis of the American oil futures market.
Décembre 1992.
- CEG-14. S. NACHET,
La réglementation internationale pour la prévention et l'indemnisation des pollutions
maritimes par les hydrocarbures.
Mars 1993.
- CEG-15. J.-L. KARNIK, R. BAKER, D. PERRUCHET,
Les compagnies pétrolières : 1973-1993 vingt ans après.
Juillet 1993.