

PIERRE VILLA<sup>1</sup>

# ÉVOLUTION SUR LONGUE PÉRIODE DE L'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

**RÉSUMÉ.** Selon les études historiques, les pays industrialisés ont connu une baisse séculaire de l'intensité énergétique après avoir connu un maximum. Une ligne reliant ces maxima représente ainsi la « vraie » courbe de progrès technique au niveau mondial. Après ces sommets, le progrès technique l'emporte sur les révolutions industrielles et la baisse de l'intensité énergétique exprime la tendance du progrès technique : les pays en développement n'ont pas encore atteint le maximum.

L'intensité énergétique est une fonction décroissante du prix relatif de l'énergie par rapport au prix à la consommation si elle provient des ménages ou au prix du PIB si elle provient des entreprises. Pour les ménages, elle est fonction croissante de la richesse réelle par tête et pour les entreprises du PIB en niveau. Elle dépend aussi du progrès technique et d'effets structurels comme le choix de la spécialisation de l'économie dans des secteurs à plus ou moins forte intensité énergétique, ou comme le partage de la demande finale des ménages et de la demande intermédiaire des entreprises : plus riches, les ménages se chauffent plus et circulent plus ; et la croissance peut se faire avec un rapport consom-

mations intermédiaires d'énergie/investissement différent selon les paramètres de l'économie comme le coût relatif des facteurs.

Après avoir passé en revue la littérature sur le sujet, nous proposons une étude économétrique pour la France depuis 1900. Afin de distinguer l'effet de structure de la tendance du progrès technique, nous calculons un indice de structure agrégé. Il est égal à la somme pondérée des intensités énergétiques des branches. Les poids sont les parts de la valeur ajoutée dans la valeur ajoutée totale.

L'effet du coût d'usage relatif de l'énergie par rapport au capital n'est pas significatif sans doute parce que les anticipations de variation du prix de l'énergie variaient trop au cours du temps par rapport à la durée de vie des équipements. Avant comme après la seconde guerre mondiale, l'élasticité de la demande au revenu sur longue période est de l'ordre de 1,3, alors que l'élasticité négative aux prix relatifs est environ de 0,1. Si l'effet de structure est crucial pour expliquer la demande d'énergie avant 1938, il n'en est pas de même après 1949, en raison sans doute de la diversification des ressources énergétiques

1. PIERRE VILLA est conseiller scientifique au CEPII (pierre.villa@cepii.fr).

Cet article est le résumé d'une étude réalisée dans le cadre de la convention n° 96.2.18.09.95 signée entre le secrétariat d'état à l'Industrie (DGEMP-OE) et le CEPII.

et de la diversification de l'appareil industriel. Enfin, est apparue depuis la seconde guerre mondiale une tendance de progrès

technique de l'usage de l'énergie d'environ 1,0 % sur longue période.

Classification JEL : C8 ; N7 ; Q4.

**E**ntre le premier choc pétrolier et le contre-choc de 1986, la demande d'énergie primaire dans un pays comme la France a diminué considérablement par rapport au PIB. S'agit-il d'une inflexion de long terme, signifiant que l'évolution de l'économie serait durablement économe en énergie, en raison des progrès techniques dans la production, de la saturation de la demande d'énergie des ménages lorsque le niveau de vie s'élève, ou des retombées des mouvements écologistes qui voient dans l'évolution économique « énergivore » une impasse parce que non extensible à la planète et poussent les gouvernements à prendre des mesures (normatives ou fiscales) visant à réduire la pollution ou l'effet de serre ? Le point de vue économiste, *stricto sensu*, défendrait la thèse inverse : les économies d'énergie, c'est-à-dire la baisse accélérée de l'intensité énergétique par rapport à l'évolution spontanée, ne peuvent être réalisées durablement que si le prix relatif augmente, c'est-à-dire s'il apparaît une rareté durable au niveau mondial ou si on taxe volontairement l'énergie. Dans le premier ordre d'idée, il ne semble pas que cela soit vrai sur longue période car la baisse, puis la stabilisation des prix du pétrole depuis 1985 et l'abandon récent et relatif des filières nucléaires dans la majorité des pays développés expriment plutôt un excédent de ressources. Dans le second ordre d'idée, l'article qui suit est sujet à un parti pris selon lequel les économies d'énergie, surtout en matière pétrolière, ne peuvent être obtenues que par la taxation et non par la réglementation. Il ne s'agit pas ici de discuter des potentialités de l'offre, ni de ses déterminants économiques, mais de préciser les déterminants sur longue période de la demande agrégée dans un pays développé comme la France.

Selon les études historiques, les pays industrialisés ont connu une baisse séculaire de l'intensité énergétique. Après une croissance lors de la première révolution industrielle, liée au développement de techniques plus intensives en énergie, à la substitution du charbon au bois et au développement des énergies marchandes, l'intensité énergétique globale a atteint un maximum, décalé selon l'ordre chronologique du développement de l'industrie dans chaque pays. Une ligne reliant ces maxima représente ainsi la « vraie » courbe de progrès technique au niveau mondial ou du moins la tendance de long terme de baisse de l'intensité énergétique comprenant les effets techniques et les effets de saturation liés aux revenus. Après ces sommets historiques, le progrès technique l'emporte sur les révolutions industrielles et la baisse de l'intensité énergétique exprime la tendance séculaire du progrès technique : les pays en développement n'ont pas encore atteint le maximum.

En France, mais aussi dans l'OCDE, depuis la seconde guerre mondiale, l'intensité énergétique décroît de 0,7 % en moyenne par an. Cette évolution peut être décomposée en quatre phases : décroissance dans les années cinquante, stabilisation dans les années soixante, baisse dans les années soixante-dix et quatre-vingt et stabilisation depuis. Les « économistes énergéticiens » expliquent la première phase par une baisse des coefficients techniques, c'est-à-dire du

« contenu énergétique » de la production : reconstruction en Europe, progrès technique, économies d'échelle ; la deuxième phase par la stabilisation du contenu énergétique (substitution des énergies comme le pétrole au charbon à partir de la fin des années cinquante), tandis que les « effets de structure » entre fonctions d'utilisation (ou « usages » de l'énergie) eussent été neutres : la croissance de la consommation d'énergie dans le logement et le transport personnel, liée à l'urbanisation, et le développement de la chimie du pétrole eussent compensé la baisse relative des activités productives traditionnelles consommatrices d'énergie ; la troisième phase par un effet de structure général (la consommation des ménages s'est substituée à celle des entreprises) et par un effet de contenu (c'est-à-dire la baisse de l'intensité énergétique au niveau microéconomique) pour les entreprises comme pour le transport. La baisse de l'intensité énergétique serait donc autonome (expliqué par une tendance du progrès technique) ou serait la conséquence des effets de structure. Les économies d'énergie des quinze dernières années seraient la conséquence combinée d'une action volontaire des pouvoirs publics, du progrès scientifique et d'une « bonne » spécialisation énergétique de la France. Elles pourraient être poursuivies sans action supplémentaire spécifique. Les « économistes généralistes » auraient au contraire tendance à penser que le niveau de la demande et le progrès technique dépendent principalement de facteurs économiques comme la richesse et les prix relatifs et que les effets de structure sont secondaires (voir même parfois antagoniques en raison de l'irréversibilité de l'évolution des filières et des modes de vie). Cette opposition, quoique rhétorique, nous guidera dans la suite. La question principale est de savoir si la diminution de l'intensité énergétique moyenne observée dans les pays de l'OCDE est un phénomène durable ou un intermède entre la stabilisation de l'intensité observée dans les années soixante/soixante-dix et depuis 1990. En d'autres termes, il s'agit de savoir si les économies d'énergie des années soixante-dix et quatre-vingt sont dues aux prix relatifs et à la moindre croissance, et donc peut-être temporaires, ou si elles proviennent du progrès technique et sont définitivement acquises.

## P roblématique de la demande d'énergie

### Les études historiques : le démarrage, le plafond, la descente

Les économistes de l'énergie s'accordent à penser que la meilleure mesure de l'évolution de l'efficacité énergétique à long terme d'une économie est le ratio d'intensité énergétique défini par le rapport de la consommation d'énergie en quantité d'un pays sur son PIB mesuré à prix constants<sup>2</sup>. En tout premier lieu, ce ratio présente l'avantage de distinguer les pays pour lesquels la structure de la production et les techniques sont relativement homogènes et stables au cours du

2. Le débat sur sa mesure concerne la demande d'énergie. Les notions de « Primary Energy Use » (ou utilisation d'énergie primaire) et de « Total Final Consumption » (consommation finale totale en énergie) ne sont pas équivalentes. La différence entre les deux couvre les pertes de transformation et de consommation des entreprises énergétiques. Selon la convention française, l'énergie nucléaire est primaire, selon celle de l'AIE, c'est « la chaleur produite par la centrale » qui est primaire. Le rendement est de 1/3 environ. Le problème économique surgit car on peut vendre la chaleur.

temps, et qui présentent une spécialisation géographique liée aux dotations factorielles et de matières premières. Ce concept possède en outre l'avantage d'être exhaustif car le numérateur est la consommation totale d'énergie primaire mesurée comme une somme pondérée par des coefficients représentant les pouvoirs calorifiques des consommations d'énergie primaire. Toutefois les formes d'usage de l'énergie ont changé au cours du temps (la qualité de la houille constituée de charbon, lignite et coke ou le contenu en carbone du pétrole raffiné varient). Il faut donc, comme en comptabilité nationale pour le calcul du PIB, utiliser une année de base pour convertir les quantités en TEP. D'une manière générale nous prendrons pour les consommations énergétiques les coefficients de conversion utilisés à l'heure actuelle par le Conseil mondial de l'énergie (CME ou WEC) ou l'Agence internationale de l'énergie (AIE), ou, pour la France, les coefficients d'équivalence retenus par l'Observatoire de l'énergie. Pour les données de comptabilité nationale, nous utiliserons les bases de prix les plus récentes des pays et les dollars PPA de 1990 pour les comparaisons internationales.

Malgré les limites associées à la constance des prix relatifs et des taux de conversion des énergies, cet indicateur représente bien la demande d'énergie car il ne dépend pas des techniques de production et de transformation des énergies secondaires qui varient au cours du temps. Il est donc indépendant de l'offre. En revanche, quand il est calculé au niveau global, il suppose que les formes d'énergie sont parfaitement substituables moyennant les coefficients de conversion. Pour tenir compte de l'imparfaite substituabilité, il faudrait soit étudier chaque type d'énergie séparément, soit construire un indicateur agrégé de type Cobb-Douglas ou CES dont les élasticités seraient tout aussi arbitraires dans l'état actuel des connaissances. C'est pourquoi, dans la suite de ce texte, nous utiliserons d'une manière générale l'intensité énergétique comme indicateur de la demande d'énergie d'une nation, d'une branche ou d'un agent.

Les grands pays industrialisés ont été marqués par une baisse séculaire de l'intensité énergétique<sup>3</sup>. Toutefois, les pays anglo-saxons, qui ont connu un décollage de la production industrielle plus tôt que les autres, présentent une tendance à la décroissance à partir d'un niveau très élevé d'intensité énergétique. En revanche, les pays dont la révolution industrielle a été plus tardive, ont connu une évolution beaucoup plus plate. D'une manière générale, comme le montre d'ailleurs l'étude de J.-M. Martin (1988)<sup>4</sup>, les intensités énergétiques sur longue période peuvent être représentées par une courbe en accent circonflexe avec un méplat depuis le début des années cinquante.

L'évolution de l'intensité énergétique du Royaume-Uni est intéressante à cet égard. Après une croissance de 1850 à 1880 associée à la disparition des formes d'énergie non marchandes (bois, énergies éolienne et hydraulique), à la substitution de la houille au bois, au développement de la sidérurgie et à l'utilisation de la vapeur dans les industries textiles, elle diminue à partir de 1880 jusqu'en 1910, se stabilise jusqu'en 1920, recommence à décroître jusqu'en 1950, se stabilise depuis 1950 jusqu'au premier choc pétrolier, pour finalement décroître fortement dans la période récente. Humphrey et Stanislaw (1979) attribuent la chute brutale de l'intensité énergétique à partir de 1880 à la hausse du prix relatif du charbon

3. Voir le graphique 1.8 p. 57 du rapport du CME (1993).

4. Cette étude est reprise par le rapport du CME et tient compte de la consommation (marchande) de bois de chauffe (voir tableau page 13 et graphiques).

par rapport au bois<sup>5</sup> qui aurait provoqué une restructuration de l'industrie anglaise (baisse de la part de l'industrie de l'acier) et une amélioration des techniques de production de la fonte et de l'acier. Ils expliquent ensuite la baisse de l'intensité énergétique au cours de l'entre-deux guerres par le développement des industries peu consommatrices d'énergie et par la dépression : les périodes de faible activité seraient caractérisées par le développement de techniques économes en énergie et par l'utilisation des équipements les moins énergivores. De même, ils attribuent la chute de l'intensité énergétique depuis 1974 à la hausse du prix du pétrole et à la récession<sup>6</sup>. Par contre au cours des années soixante et soixante-dix les prix du pétrole sont bas ; cela provoque la substitution avec la houille. De plus le prix de l'énergie est bas de sorte que la tendance à la baisse de l'intensité énergétique disparaît jusqu'en 1975.

En conclusion, les pays industrialisés ont connu au xx<sup>e</sup> siècle un plafond de l'intensité énergétique moyenne que les économistes historiens attribuent plus au progrès technique et aux substitutions d'énergies qu'aux déterminants économiques comme la richesse (PIB par tête), les prix relatifs ou la conjoncture : montée au cours du développement de la part des énergies marchandes qui sont mesurées, plus ou moins grande précocité de l'industrialisation (un pays bénéficie des progrès techniques des pays à industrialisation ancienne). Ainsi le maximum d'intensité énergétique est d'autant plus tardif que le démarrage a été récent : il est daté de 1920 pour les États-Unis, la France et l'Allemagne (électrification) et de 1950 pour le Japon (usage prolongé du bois). Ce maximum correspond, dans chaque pays, au moment où les effets de montée en régime (disparition des énergies non marchandes, industrialisation) sont épuisés et où apparaît la tendance du progrès technique dans l'usage de l'énergie. Une ligne reliant ces maxima représente ainsi la « vraie » courbe de progrès technique au niveau mondial.

### Les études descriptives sur l'après-guerre

Ces études plus précises et détaillées veulent expliquer les évolutions de moyen terme en les décomposant entre une tendance de longue période analogue à celle qui a été mise en évidence dans les travaux évoqués au cours du paragraphe précédent et des fluctuations de plus court terme ayant des déterminants économiques. La question principale est de savoir si la diminution de l'intensité énergétique moyenne observée dans les pays de l'OCDE entre les deux chocs pétroliers est un phénomène durable ou un intermède entre la stabilisation de l'intensité observée dans les années soixante/soixante-dix et depuis 1990. En d'autres termes, il s'agit de savoir si les économies d'énergie sont dues aux prix relatifs et à la moindre croissance et donc peut-être temporaires ou si elles proviennent du progrès technique et sont définitivement acquises.

5. Ce point de vue est aussi soutenu par Markovitch (1966) qui calcule des séries de prix relatif de la houille et du bois (p. 58-59, série AF). À titre d'exemple, le prix relatif de la houille serait passé en France de 17,9 dans la décennie 1865-1874 à 26,7 et 25,6 dans les décennies 1875-1884 et 1885-1894.

6. Toutefois leurs résultats sur la période récente paraissent bien brutaux. La chute du PIB se traduit par une baisse de l'intensité énergétique de court terme qui signifierait que dans les périodes de basse conjoncture on utiliserait les équipements les plus économes. Cependant leurs résultats sont accentués par le fait qu'ils utilisent pour indicateur « l'élasticité-croissance » : c'est-à-dire, le rapport du taux de croissance de la consommation d'énergie sur le taux de croissance du PIB. Ce ratio n'est pas adapté pour l'étude des fluctuations conjoncturelles.

Pour cela les études historiques (par exemple, Martin & *al.*) ou les travaux prospectifs de l'OCDE (par exemple, Schipper & Myers) décomposent l'intensité énergétique moyenne selon des fonctions : agriculture, industrie, transports (activité des branches et fonction de consommation des ménages), résidentiel (chauffage des logements...) et tertiaire (services et commerces). D'une manière générale, l'intensité énergétique est décomposée de la manière suivante :

$$\frac{E}{Y} = \sum_i \frac{E_i}{Y_i} \frac{Y_i}{Y} + \sum_j \frac{E_j}{C} \frac{C}{Y} \quad (1)$$

où :  $E_i$  sont les consommations intermédiaires en énergie des branches  $[i]$  et  $E_j$  les consommations finales des ménages pour la fonction  $[j]$  en millions de TEP, tandis que  $Y_i$  sont les valeurs ajoutées des branches (en volume : prix constants),  $Y$  est le PIB (marchand plus non marchand) et  $C$  la consommation marchande totale en volume. Parfois les valeurs ajoutées  $Y_i$  ou les consommations  $E_j$  sont remplacées par des indicateurs en quantités physiques (on note  $F$  les entreprises et  $M$  les ménages)<sup>7</sup>.

En différenciant logarithmiquement, on obtient :

$$\frac{dz_F}{z_F} = \sum_i \frac{E_i}{E_F} \frac{dz_i}{z_i} + \sum_i \frac{z_i}{z} dy_i \quad (2)$$

$$\frac{dz_M}{z_M} = \sum_j \frac{E_j}{E_M} \frac{dz_j}{z_j} + \frac{d(C/Y)}{C/Y} \quad (3)$$

$$\frac{dz}{z} = a \frac{dz_F}{z_F} + (1 - a) \frac{dz_M}{z_M} \quad (4)$$

où :

$$z_i = \frac{E_i}{Y_i}, z_j = \frac{E_j}{C},$$

$$E_F = \sum_i E_i, E_M = \sum_j E_j, E = E_F + E_M,$$

$$y_i = \frac{Y_i}{Y},$$

$$z_F = \frac{E_F}{Y}, z_M = \frac{E_M}{Y} \text{ où } Y \text{ est le PIB en volume,}$$

$a = E_F / (E_F + E_M)$  est la part de la consommation énergétique des entreprises.

Dans ce système de notations, les  $z$  représentent les intensités énergétiques et les  $y$  les structures de valeur ajoutée.

Le premier terme des équations (2) et (3) représente l'effet de contenu et le second, l'effet de structure. L'effet de contenu est une somme pondérée par les consommations énergétiques des variations de l'intensité énergétique des

7. Par exemple, Schipper et Myers utilisent le nombre de personnes-km et de tonnes-km pour les transports et la population pour le logement.

branches pour les entreprises et des contenus énergétiques de la consommation finale pour les ménages. L'effet de structure dépend de la variation de la structure de la valeur ajoutée des entreprises et de la variation de la propension moyenne à consommer des ménages. Sur la base de cette décomposition, Martin *et al.* obtiennent ainsi pour la France les résultats présentés dans le TABLEAU 1.

TABLEAU 1

	Évolution de l'intensité énergétique moyenne de la France de 1973 à 1982		
		MTEP/GF 1970	
	E/Y en 1973 (%)	Effet contenu (%)	Effet structure (%)
<b>Entreprises</b>			
— Métallurgie	3,33	- 0,42	- 0,51
— Autres industries	7,33	- 1,11	- 0,14
— Tertiaire, transport*, agriculture	6,46	- 0,34	- 0,01
Total entreprises	17,48	- 1,91	- 0,66
<b>Ménages</b>			
— Logement	6,90	- 0,72	0,38
— Transport*	2,85	- 0,29	0,15
— Total ménages	9,76	- 1,01	0,53
Total (en %)	26,88	- 2,92	- 0,13

\* Le transport « entreprises » est la consommation intermédiaire de la branche et le transport « ménages » est la consommation de carburants.

Source : Martin & *al.* (1984).

Cette approche statistique se trouve aussi dans Howarth & *al.* (1993)<sup>8</sup>. Comme dans l'étude précédente, ils trouvent que l'effet de structure est faible et l'effet de contenu est élevé. Mais d'une manière générale, les auteurs qui veulent distinguer l'effet de structure de l'effet de contenu font leurs calculs à partir d'une année de base de sorte qu'il faut soit ajouter un terme croisé de deuxième ordre, soit attribuer ce terme à l'effet d'intensité ou de structure. Il vaudrait mieux calculer l'effet de structure année par année, comme un indice chaîne (de Laspeyre ou de Paasche), en s'inspirant des formules (1) à (4) (qui fournissent les indices de Divisia correspondants). Ensuite, l'effet d'intensité pourrait être calculé par solde compte tenu de la variation de l'intensité énergétique globale qui est directement observable (TABLEAU 2).

L'après-guerre peut-être décomposé en quatre phases : décroissance de l'intensité énergétique dans les années cinquante, stabilisation dans les années soixante, baisse dans les années soixante-dix et quatre-vingt et stabilisation depuis. Les économistes « énergéticiens » expliquent l'évolution au cours de la première phase par une baisse du contenu énergétique : progrès technique, substitution des énergies (pétrole au charbon, puis gaz au pétrole). La deuxième phase est expliquée par une stabilisation du contenu énergétique, tandis que les effets de structure se seraient compensés : la croissance de consommation d'énergie, dans le logement et le transport personnel, liée à l'urbanisation, et le développement de la chimie du pétrole

8. « Effet de structure » et « effet d'intensité » correspondent à l'anglais « activity effect » et « intensity effect ».

TABLEAU 2

Intensité énergétique des pays de l'OCDE*					
	TEP/dollar ppa 1990				
	1960	1973	1980	1986	1994
RFA	0,22	0,26	0,25	0,21	0,17
Canada	0,45	0,45	0,40	0,33	0,32
France	0,18	0,21	0,18	0,16	0,15
Italie	0,12	0,17	0,14	0,13	0,12
Japon	0,16	0,21	0,16	0,14	0,14
Royaume-Uni	0,27	0,23	0,19	0,17	0,16
États-Unis	0,37	0,37	0,32	0,26	0,23

\* Les différences pour la France en 1973 avec l'estimation de Martin & al. (tableau 1) proviennent de la base de prix pour calculer le PNB. À partir de 1970, la RFA représente l'Allemagne réunifiée (il y a donc une rupture de série).

Sources : AIE pour la *final energy consumption* et CEPII-Banque de données CHELEM pour le PNB dollars ppa.

compensant la baisse relative des activités productives traditionnelles consommatrices d'énergie. L'évolution de la troisième phase est expliquée tout d'abord par un effet de structure général : la consommation des ménages s'est substituée à celle des entreprises et par un effet de contenu pour les entreprises (en France, l'effet de structure n'y représente que le tiers de l'effet de contenu). Ainsi les prévisions donnent-elles une tendance de baisse de 1 % de l'intensité énergétique pour l'OCDE (Schipper & Myers, p. 269, *op. cit.*) car l'effet de structure est très faible.

Le type d'analyse que nous venons de résumer sommairement sert de prémisses aux modèles de prévision d'énergie du type MEDEE (Chateau & Lapillonne, 1977). La demande globale d'énergie est le résultat d'une agrégation de demandes élémentaires extrêmement détaillées par types d'énergie et par fonctions pour lesquels les coefficients ne dépendent que de tendances du progrès technique. Cette approche présente trois inconvénients.

En premier lieu, elle ne permet pas de mesurer l'impact de la conjoncture, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire à prix relatifs fixes. Or deux thèses opposées sont possibles. Selon la première, les périodes de forte conjoncture et/ou de forte croissance permettent des gains d'intensité énergétique grâce à des économies d'échelle (quel que soit la technique de production ou l'âge des équipements). Selon la seconde, c'est au contraire les périodes de basse conjoncture qui « obligent » à rationaliser la production : la concurrence dans une situation où une partie des équipements est sous-utilisée et où la technologie ancienne est fixée (modèle Putty-Clay) oblige à utiliser les investissements les plus économes en énergie. Suivant les cas (années cinquante ou années quatre-vingt), on fait appel à l'une ou l'autre thèse, ce qui est peu satisfaisant.

Ensuite, elle renvoie à des variables exogènes le choix des techniques de production et de la structure de la demande finale, alors que les prix relatifs entre les formes d'énergie et les autres produits peuvent avoir une influence cruciale. Ainsi deux thèses peuvent s'opposer. Selon la première, la stabilité de l'intensité énergétique dans les années soixante est due au développement de la consommation des ménages ; sa baisse ou sa stagnation dans les années récentes est l'expression d'un comportement logistique, avec saturation de la consommation finale liée au



niveau de richesse (PIB *per capita*), ou des coefficients techniques en énergie dans le secteur productif associé à la disparition des vieilles techniques de production (il n'y aurait pas de retour des techniques par exemple<sup>9</sup>). Selon la seconde, les mouvements de moyen terme de l'intensité énergétique sont dus au coût relatif du capital et de l'énergie et au prix relatif de la consommation et de l'énergie finale distribuée. Les variations de l'intensité énergétique seraient donc temporaires ou au minimum en escalier.

Enfin, elle ne prend pas en compte l'incertitude, les anticipations et l'irréversibilité. Les anticipations d'inflation, de croissance du prix de l'énergie, de croissance de l'activité ont une influence sur les « contenus » énergétiques. Dans un modèle prenant en compte ces effets, si le premier choc pétrolier avait par exemple été anticipé, il aurait eu des conséquences ambiguës à la fin des années soixante. La hausse anticipée des prix relatifs de l'énergie aurait conduit à des économies d'énergie, tandis que la baisse du taux d'intérêt réel aurait eu les effets inverses. Des économies d'énergie peuvent donc être faites apparemment à contre courant. De même des variables macroéconomiques peuvent avoir une influence : un taux de change bas pour un pays importateur d'énergie le pousse à faire des économies ou à substituer des ressources nationales<sup>10</sup>. Le but n'est pas ici de vouloir expliquer la demande d'énergie par ces variables d'anticipation ou macroéconomiques, mais d'isoler leur impact potentiel, pour faire mieux ressortir les autres déterminants.

## De l'analyse descriptive à la modélisation

Ainsi les études sur la demande d'énergie se clivent-elles en deux approches générales. Le point de vue des « énergéticiens » qui considèrent qu'il ne s'agit que d'un problème de moyen-long terme. Il faut donc raisonner en consommation d'énergie primaire *per capita* ou en intensité énergétique et étudier l'impact du progrès technique, de l'effet de structure, de la croissance à long terme et des substitutions entre énergies. Les techniques de modélisation employées sont constituées de gros modèles où la demande est finement décomposée en plusieurs énergies primaires utilisées dans de nombreuses fonctions (usages) économiques. La prévision des coefficients peut se faire en modélisant la tendance par des fonctions *a priori* (logistique, log-normale...) ou des processus adaptatifs. Le point de vue des économistes consiste à utiliser des modèles de demande, éventuellement en distinguant les usages (ménages, entreprises, secteurs d'activité) et les formes d'énergie. Ils distinguent alors essentiellement des effets prix relatifs (à la consommation finale ou à la consommation intermédiaire), des effets de revenu (demande et revenu disponible des ménages) et des effets de patrimoine (capital logement, capital productif, population, richesse réelle, effet d'habitude). Leurs techniques de modélisation sont les modèles d'équilibre général calculable et les modèles économétriques (du type Houthakker-Taylor). Ils peuvent contrôler, au sens économétrique du terme, l'impact des variables structurelles précédentes par

9. L'acier « électrique » va-t-il remplacer définitivement l'acier à l'oxygène ? Filière sèche contre filière humide pour le ciment ? Voiture électrique contre voiture à essence ?

10. Ainsi peut-on comparer la politique énergétique de la France dans les années 1973 à 1983 (taux de change bas, taxation de l'énergie, programme nucléaire) et la politique de l'Allemagne qui payait son pétrole relativement moins cher en terme d'exportations (taux de change élevé, forte dotation en énergie traditionnelle). Ainsi de la politique de l'Union européenne ?

des variables conjoncturelles (taux d'utilisation des capacités, fluctuations du PIB, anticipations). La prévision se fait en projetant les variables exogènes.

Sur cette toile de fond, passons en revue les modèles de demande d'énergie. Arbitrairement, nous les avons décomposés selon les techniques utilisées : les modèles de type MEGC, les modèles de prévision de tendance et les modèles économétriques traditionnels. Comme nous allons le voir, ces techniques de prévision ne recouvrent pas la distinction entre « énergéticiens » et « économistes » qui est de ce fait en partie rhétorique.

## Les modèles MEGC

Les modèles MEGC, ou Modèles d'équilibre général calculable, sont des modèles macroéconomiques détaillés ayant des fondements microéconomiques qui permettent de dériver rigoureusement la forme des fonctions d'offre et de demande à partir des comportements de maximisation des fonctions d'utilité des ménages et de profit des entreprises. Ils servent surtout à étudier l'impact des politiques économiques (en particulier de la fiscalité) sur la demande d'énergie et sur les conséquences en matière d'environnement. Ils sont en général très détaillés et présentent l'avantage d'être cohérents au niveau macroéconomique en formalisant toutes les simultanités. En revanche, ils ont la faiblesse de ne pouvoir être estimés sur des situations concrètes par les méthodes traditionnelles puisqu'ils supposent que les économies sont à l'équilibre Walrasien. Ils sont en général calibrés sur une année plutôt qu'estimés. La difficulté pour calibrer les modèles est tournée en décomposant les économies en un grand nombre de secteurs ou de fonctions sur lesquels on dispose d'informations plus précises venant des gens de l'art. On trouvera une présentation de ces modèles spécifiques à l'énergie dans Beaver & Huntington (1992), Beaver (1993) et Bhattacharyya (1996).

Ces modèles servent à faire des prévisions de long terme dont les principales variables exogènes sont la croissance de la population, la productivité globale des facteurs et les politiques fiscales et budgétaires des États. Ils distinguent essentiellement trois facteurs de production : le capital physique, le travail et l'énergie. Ces facteurs peuvent être ensuite décomposés : par exemple on distinguera le capital matériel, du capital bâtiment et du logement et les différentes formes d'énergie. Dans ce dernier cas, les modèles ne travaillent pas en énergie primaire. Les demandes sont formulées en énergies finales consommées. De ce fait, les modèles incluent un secteur énergétique (par exemple l'électricité) qui effectue la transformation de l'énergie primaire en énergie finale. Les prix sont endogènes et déterminés par l'équilibre de l'offre et de la demande. Comme les pays sont fortement spécialisés dans le domaine de l'énergie, ces modèles attachent beaucoup d'importance au commerce extérieur. En particulier, ils donnent de nombreux effets purement liés à la théorie de la spécialisation internationale en relation avec la localisation géographique des facteurs primaires. Par exemple, une taxation de l'énergie dans les pays développés conduit, en général, à une amélioration de leurs termes de l'échange (ou une appréciation du taux de change réel) et une diminution des effets de pollution du fait que les pays en développement utilisent les sources d'énergie les plus polluantes en émissions de CO<sub>2</sub> (charbon et fuel).

Pour ce qui concerne la demande d'énergie, la formulation est générale. Elle s'inclut dans le bloc général des demandes de travail, de capital et de consommations intermédiaires selon des fonctions de coûts des entreprises et des fonctions de demande des ménages. Pour les entreprises, les modèles sont en général Putty-Clay : la demande d'énergie s'ajuste seulement en fonction des nouvelles générations de la capacité productive. Les proportions relatives d'intrants (*input*) restent constantes et inchangées pour le vieux capital. Cela permet d'avoir une élasticité de substitution forte à long terme, faible à court terme et donc d'ajuster les modèles aux faits. Pour les ménages, la modélisation est moins unifiée. En particulier, certains modèles font des hypothèses d'anticipations parfaites des prix et d'autres d'anticipations myopes.

Nous ne reprendrons pas ici les caractéristiques de la demande d'énergie de ces modèles qui sont présentées dans Beaver & Huntington (tableaux 1 et 2 pp. 570-571) et Bhattacharyya (pp. 150-151). Nous en retiendrons les résultats essentiels à notre propos. L'efficacité énergétique, c'est-à-dire le rapport : « Consommation d'énergie finale en TEP/PIB », qui est un résultat agrégé de ces modèles, dépend principalement du choix des techniques, de la structure de la production et du rapport entre capital nouveau et capital ancien.

Malgré l'apparition de modèles très détaillés et estimés économétriquement (Jorgenson & Wilcoxon, 1993), les effets prix sont encore sujets à discussion. Alors que les élasticités-prix et revenu sont, selon les auteurs de ces modèles, les seuls paramètres qui affectent les résultats, il n'y a pas de consensus sur leur valeur. Nous retrouverons ce problème pour les estimations économétriques sur séries chronologiques longues.

## Les méthodes génériques de prévision de l'intensité énergétique à long terme

Les économistes de l'énergie utilisent plusieurs méthodes pour prévoir l'évolution des intensités énergétiques. Ces techniques de prévision peuvent aussi être utilisées pour projeter des coefficients de consommation ou des paramètres des fonctions de production. Elles sont plus généralement utilisées par le courant des « énergéticiens » parce qu'elles visent à produire des prévisions à partir des variables elles-mêmes de façon à engendrer une dynamique, mais nous verrons qu'elles peuvent être facilement combinées avec des modèles économétriques traditionnels ou dans le cadre des MEGC.

### L'estimation de la tendance par une logistique

Cette méthode est utilisée par exemple par Furtado & Suslick (1993) pour prévoir l'intensité en consommation de pétrole par rapport au PIB au Brésil et par Hourcade (1993) de manière systématique pour construire des scénarios macroéconomiques<sup>11</sup>. Elle consiste à supposer que les intensités énergétiques sui-

11. Ce dernier ne procède pas à des estimations, mais se contente de supposer que l'asymptote des logistiques décrivant les demandes d'énergie est déterminée par des dires d'experts.

vent une loi logistique avec un seuil asymptotique de saturation modulée par des composantes économiques comme les prix relatifs et les revenus. On peut toutefois douter *a priori* de la pertinence des modèles utilisés, car les intensités énergétiques présentent plus souvent des courbes en  $U$  ou en escalier qu'un seuil de saturation. En outre, les auteurs n'estiment jamais le modèle complet avec des variables économiques. Ainsi, ils ne se demandent pas si les déterminants du taux de croissance de l'intensité énergétique sont différents de ceux d'un éventuel seuil de saturation. On pourrait en effet imaginer de tester un modèle où le taux de croissance dépendrait des prix relatifs, des revenus et de variables conjoncturelles, tandis que l'asymptote serait fonction de la richesse par tête et de la population (ou de sa densité) :

$$\frac{\Delta e_t}{e_{t-1}(a(POP_t, W_t) - e_{t-1})} = b[\Delta(PIB_t), TU_t \Delta(PR_t)]$$

où  $e_t$  est l'intensité énergétique primaire,  $POP$  la population (ou sa densité),  $W$  la richesse par tête,  $TU$  le taux d'utilisation des capacités et  $PR$  les prix relatifs,  $PIB$  le PIB en volume,  $\Delta$  étant l'opérateur de différences premières. Cette formulation montre qu'il est possible de marier une recherche des tendances sans renoncer aux déterminants économiques habituels.

### Les modèles d'apprentissage (Furtado et Suslick)

Ces modèles consistent à supposer que la tendance est le produit d'un processus adaptatif. Toutefois, là encore, il n'y a aucun *comportement des agents réels* puisque le processus d'apprentissage considéré ne concerne que le *modélisateur*. L'argument selon lequel la tendance de progrès technique serait le résultat d'un processus d'apprentissage n'a pas de fondement économique. En fait, le modèle consiste à réviser les anticipations de l'intensité énergétique à la lumière des *informations passées de l'économètre qui ne comprennent pas certaines informations de la période de prévision*. Plus précisément, on suppose que l'économètre a pu observer sur la période  $[1, T]$ , la consommation primaire d'énergie  $E_t$  (en TEP), le PIB,  $Y_t$  en volume (et donc l'intensité énergétique  $e_t = E_t/Y_t$ ). Mais le vrai modèle d'intensité énergétique consiste à relier linéairement  $\text{Log}(e_t)$  à  $\text{Log}(Y_t)$ , d'autres variables  $Z_t$  et la constante. Si l'on pouvait observer  $Z_t$ , on pourrait l'estimer économétriquement.

Soient  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  et  $\hat{c}$  les estimateurs (les coefficients) ainsi que  $\text{Log}\hat{e}(T, Y, Z)$  l'estimateur de  $\text{Log}(e_t)$ . Ce dernier est sans biais car il y a une constante. La meilleure prévision en  $T + 1$  de  $E_{T+1}$  est donc :

$$\hat{E}_{T+1} = \hat{e}(T+1, Y, Z)Y_{T+1},$$

avec :

$$\text{Log}(\hat{e}(t, Y, Z)) = \hat{a}_T \text{Log}(Y_t) + \hat{b}_T Z_t + \hat{c}_T \quad \forall t \in [1, T] \quad (\text{A1})$$

Mais comme le modélisateur ne connaît pas  $Z(T + 1)$  à la date  $T + 1$ , il ne peut faire de prévision avec le vrai modèle de l'économie. Cependant, on sent qu'intuitivement, compte tenu de son information et de la présence de la constante, une bonne prévision serait du type :

$$\text{Log}(\tilde{e}_T) = \sum_1^T \frac{1}{T} \text{Log}(\hat{e}_t) + \frac{1}{T} \sum_1^T \text{Log}\left(\frac{E_t}{Y_t}\right).$$

On introduit donc le modèle « intégral » auxiliaire ou « modèle d'apprentissage » suivant :

$$\frac{1}{t} \sum_{u=1}^t \text{Log}(e_u) = \alpha \frac{1}{t} \sum_{u=1}^t \text{Log}(Y_u) + \beta v_t \quad (A2)$$

en supposant que le processus  $v_t$  vérifie :

$$v_t = d \frac{1}{t} \sum_{u=1}^t Z_{it} + w_t \quad (A3)$$

où  $w_t$  est un bruit blanc.

Le modèle auxiliaire (A2) peut être estimé et mis à jour car l'économètre dispose de l'information suffisante. Soit  $\hat{\alpha}_T$  et  $\hat{\beta}_T$  les estimateurs des MCO sur la période (1, T) du modèle d'apprentissage (A2). La formule de mise à jour est du type :

$$\hat{\alpha}_{T+1} = \frac{b_T \hat{\alpha}_T + y_T e_T}{b_{T+1}} \quad (A4)$$

$$\text{où : } b_t = \sum_{i=1}^T \sum_{u=1}^t \text{Log}^2(e_u), y_T = \sum_{i=1}^T \text{Log}(Y_u) \text{ et } e_T = \sum_{i=1}^T \text{Log}(e_u).$$

On remarque que  $\frac{b_T}{b_{T+1}} \rightarrow 1$  quand  $T \rightarrow \infty$ .

En raison du caractère intégral du modèle auxiliaire, il existe donc une solution limite qui, pour être celle du vrai modèle, doit vérifier :

$$\text{Log}(e) = \alpha \text{Log}(Y) + \beta a \text{Log}(Y) + bZ + c.$$

Il faut donc que  $\hat{\alpha}_T$  converge vers  $a$ . Cela est assuré en vertu de la loi des grands nombres, si on suppose que les processus sont stationnaires du second ordre.

Le modélisateur peut donc envisager un processus d'apprentissage qui converge vers le vrai modèle de l'intensité énergétique sans le connaître. Pour cela, il lui suffit de faire la régression (A2) par les moindres carrés ordinaires. Ce modèle aura la même prévision limite. Soit  $A(T, Y_T)$  l'estimateur obtenu. Une prévision convergente asymptotiquement de la consommation d'énergie est donc :

$$E_{T+i} = \exp(A(T, Y_{T+1})) Y_{T+1}$$

À la période suivante, le modélisateur pourra mettre à jour son évaluation de l'intensité énergétique en rajoutant un point et calculer  $A(T, Y_{T+2})$  et ainsi de suite. Le processus est donc adaptatif au sens où l'ensemble d'information du modélisateur est croissant, mais il n'est pas adaptatif au sens des comportements des agents réels qu'il est supposé représenter.

Cette méthode ne donne cependant pas de bonne prévision. En effet si le processus décrit bien l'ajustement lent de l'effet de la technique de production, il manque de déterminants économiques de long terme : tout se passe comme s'il n'y avait pas de modèle énergétique. En outre Furtado et Suslik n'estiment pas le modèle d'apprentissage (A2) mais une version légèrement différente : ils font les régressions sur les logarithmes des sommes et non sur les sommes des logarithmes, or cette dernière fonction est concave, ce qui biaise les estimateurs.

## Les modèles trans-log (Furtado et Suslik)

Ces modèles sont basés sur l'observation statistique de longue période selon laquelle l'intensité énergétique peut-être décrite à long terme comme une courbe de type log-normale en fonction du revenu par tête avec une forte « skewness » (grosse queue à droite vers les forts revenus) comme nous l'enseigne l'analyse descriptive du premier paragraphe<sup>12</sup>. Comme pour la logistique, cette forme générale de la courbe peut-être modulée à court terme par des déterminants économiques, comme les prix relatifs et le revenu, ainsi que des variables de fluctuations conjoncturelles (croissance du PIB, taux d'utilisation des capacités de production). Cette façon de modéliser la tendance présente l'avantage de pouvoir être traduite dans un modèle traditionnel de demande utilisant une fonction d'utilité indirecte trans-log.

On suppose donc que le modèle de long terme de l'intensité énergétique est donné par :

$$e_t = \frac{K(P_t, PE_t, t)}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\text{Log}(y_t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (5)$$

où :  $K(., ., t)$  est l'intensité moyenne énergétique définie par des variables de long terme comme le prix relatif de l'énergie,  $P$  est le prix du PIB ou de la consommation totale,  $PE$  est le prix de l'énergie,  $t$  est le trend de progrès technique,  $Y$  est le PIB,  $POP$  est la population totale,  $y$  est le PIB par tête,  $t$  est la tendance,  $e$  est l'intensité énergétique considérée,  $\sigma$  est la variance du logarithme de la tendance de l'intensité énergétique et  $\mu$  est la moyenne de cette tendance.

Il est important de noter que cette loi empirique est supposée s'appliquer aussi bien à la répartition des revenus par tête entre pays qu'à la répartition des revenus des ménages à l'intérieur d'un même pays. Elle représente donc la demande d'énergie d'un ménage comme d'une nation.

En appelant  $E_t$  la demande d'énergie, on peut donc écrire :

$$\text{Log}(E_t) = \text{Log}(POP_t) + \text{Log}(A) + (1 + \alpha_0 \alpha_1 \text{Log}(y_t)) \text{Log}(y_t) \quad (6)$$

avec :  $\text{Log}(A) = \text{Log}(K(P, PE, t)) - \text{Log} \sqrt{2\pi} - \text{Log} \mu - \sigma^2 / 2$

et  $\alpha_0 = \mu - \sigma^2 / 2$  et  $\alpha_1 = \sigma^2 / 2$ .

On remarque alors avec plaisir que l'équation (6) est une fonction de demande traditionnelle qu'on peut dériver à partir d'une fonction d'utilité indirecte dépendant des revenus et des prix relatifs.

On peut maintenant supposer que les revenus par tête d'un pays (si on veut estimer la demande pour celui-ci) suivent une loi de répartition  $f(y)$  quelconque à support borné positif de moyenne  $\bar{y}$ . L'équation (6) est alors une fonction de demande traditionnelle qu'on peut dériver à partir d'une fonction d'utilité indirecte trans-log dépendant du revenu moyen par tête et des prix relatifs<sup>13</sup>.

Les estimations de Furtado et Suslik pour la demande de pétrole du Brésil, à partir d'une fonction de demande trans-log proche de l'équation (6), semblent montrer que la méthode donne des estimations assez précises selon le critère de

12. La « skewness » devrait permettre de rendre compte de la chute en escalier de la demande énergétique des pays ayant dépassé leur « mode ».

13. Voir par exemple l'ouvrage de microéconomie de Varian p. 133.

l'erreur quadratique moyenne. Ils distinguent les effets de revenu par tête, de prix et de progrès technique. Les principaux résultats sont les suivants :

- l'élasticité par rapport au revenu n'est pas significativement différente de 1,
- l'élasticité par rapport au prix est significativement négative,
- l'élasticité-prix par rapport aux produits de substitution n'est positive que parce qu'on la croise avec la tendance de progrès technique (variable temps),
- l'élasticité par rapport à la tendance du progrès technique est croissante au cours du temps.

Cependant cette spécification présente l'inconvénient de supposer implicitement que les élasticités-prix croissent avec le revenu par tête. Il n'est donc pas sûr qu'elle puisse s'appliquer telle quelle au niveau agrégé. Comme nous le verrons par la suite, il semblerait que les élasticités augmentent quand le prix relatif de l'énergie augmente, mais non pas quand le revenu par tête augmente. Sur ce dernier point, il n'existe aucune preuve empirique sur longue période.

## Les modèles économétriques

Les modèles de prévision de la demande énergétique sont donc basés sur deux idées qui s'appuient sur le point de vue des économistes et celui des énergéticiens. Selon les premiers, la demande doit reprendre les éléments généraux de la théorie de la demande : revenus, prix et tendance de progrès technique. Selon les seconds, il faut distinguer les déterminants de court terme et ceux de long terme : richesse, population, tendance du progrès technique, effet de substitution entre énergies. C'est en gardant en tête cette distinction que nous allons aborder les différents types de modélisation macroéconomique de la demande énergétique. Nous partirons ainsi du modèle le plus simple et le plus général de consommation pour aller vers les modèles les plus spécifiques au domaine qui nous intéresse.

### La consommation des ménages : le modèle de Houthakker et Taylor

Historiquement, la formalisation la plus simple des fonctions de demande finale, ce modèle présente l'avantage d'introduire, bien que de manière trop générale, les déterminants en flux et en stocks de la consommation finale, ce qui permet de distinguer, de manière théorique, le court terme et le long terme.

On postule que la demande d'un bien dépend de la dépense totale, des prix relatifs et d'une variable d'état (ayant la dimension d'un stock) de la fin de la période précédente. Dans un cadre linéaire, on écrira :

$$E_t = \alpha + bS_{t-1} - cY_t + dPR_t \quad (7)$$

où  $S_{t-1}$  est la variable d'état en fin de période ( $t - 1$ ) représentant la richesse accumulée par les ménages dans le bien considéré si c'est un bien durable, ou un effet d'habitude si c'est un bien fongible ;  $Y_t$  est le revenu total ou encore la dépense totale en volume ;  $PR_t$  est le prix relatif du bien considéré et  $E_t$  est la consommation en volume du bien.

En supposant que la variable de stocks s'accumule avec un taux de déclasserment constant, on peut écrire :

$$S_t - S_{t-1} = E_t \delta S_{t-1} \quad (8)$$

soit :

$$E_t = \delta a + (1 - b \delta) E_{t-1} - c(Y_t - Y_{t-1}) - \delta c Y_{t-1} - d(PR_t - PR_{t-1}) + \delta d PR_t \quad (9)$$

Dans le cas de l'énergie,  $\delta$  est un taux d'oubli,  $b$  est un effet d'habitude,  $c$  et  $d$  sont les propensions marginales à consommer et la sensibilité aux prix à court terme tandis que  $\frac{\delta}{\delta - b}c$  et  $\frac{\delta}{\delta - b}d$  sont les effets de long terme.

Les estimations de Vallet (1978, pp. 210-212), effectuées sur la période 1956-1974 (actualisées sur 1959-1982, voir DMS), portent sur la demande d'énergie domestique et de carburant par les ménages. Le revenu a été remplacé par la dépense totale. Les résultats sont donnés dans le TABLEAU 3.

TABLEAU 3

	En base 1971, en francs 1970						
	Constante a	Effet d'habitude b	Revenu (CT) c	Revenu (LT) c	Prix d	Prix (LT) d	Taux d'oubli $\delta$
Énergie domestique (1956-1974)	0,075	-0,051	0,055 (1,38)	0,051 (1,27)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	0,60
Énergie domestique (1959-1982)	0,092	0,00	0,056 (1,40)	0,056 (1,40)	0,009 (0,77)	0,009 (0,77)	1,0
Carburant (1956-1974)	0,0	-0,151	0,0 (0,0)	0,066 (3,00)	0,039 (1,77)	0,022 (6,67)	0,0
Carburant (1959-1982)	0,09	0,61	0,016 (0,52)	0,041 (1,32)	0,114 (0,418)	0,285 (1,04)	1,0

\* Entre parenthèses, les élasticités à la dépense totale pour l'année de base 1970 : les calculs ont été faits avec une part de la consommation d'énergie domestique de 4 % et de la consommation de carburant de 2,2 % dans le total de la consommation marchande (valeurs de l'année 1970). Les estimations sont en niveau sauf l'énergie domestique de 1959 à 1982 qui est en logarithme.

Bien que ces équations soient détaillées par fonction, elles montrent une forte instabilité de tous les coefficients : si les propensions à consommer par rapport à la dépense totale sont clairement positives et correspondent à une élasticité-revenu à long terme nettement supérieure à 1,0 dans les années récentes, les élasticité-prix de long terme n'apparaissent significativement différentes de 0 que lorsqu'on introduit les années soixante-dix et quatre-vingt. Ces résultats signifient que l'énergie est un bien normal dont la demande croît avec le revenu et la sensibilité aux prix relatifs est plus importante dans les années récentes qui couvrent le choc pétrolier. Cela incite à penser que l'apparente insensibilité de la demande des ménages en énergie dans les années précédant le choc de 1974 est le résultat



statistique d'une baisse régulière du prix accompagnée par une hausse concomitante des transports et du capital en logement. Le modèle est d'une certaine manière sous-déterminé : il faudrait trouver des arguments de long terme à la variable de stocks, par exemple la population, la richesse totale, le parc logement (chauffage) ou le parc automobile (carburant). En outre, une estimation en logarithme plutôt qu'en niveau ou en propension devrait permettre de corriger de l'hétéroscédasticité des résidus et d'estimer directement les élasticités. Sur ce dernier point le modèle suppose implicitement que les élasticités sont variables au cours du temps, mais leur évolution dépend cruciallement des prix relatifs. Ainsi, du fait de la hausse des prix relatifs de l'énergie depuis 1973, l'élasticité-prix a augmenté depuis les chocs pétroliers.

### Les modèles avec anticipations de prix

Ces modèles partent de la constatation empirique selon laquelle la demande d'énergie n'a pas répondu à la chute des prix dans les années soixante de manière symétrique à la hausse des prix de 1974 et 1980. Historiquement, la croissance de la demande depuis 1986 associée à la baisse des prix de l'énergie aurait été plus faible que les économies d'énergie entre les deux chocs pétroliers. Ainsi, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, les élasticités-prix ont augmenté entre les deux chocs pétroliers. Wirl (1991) constate qu'elles ont diminué depuis 1987. Il attribue cette évolution non pas à un phénomène mécanique associé aux prix relatifs (comme dans les modèles précédents) mais aux coûts de changement des techniques et aux anticipations de hausses de prix. Pour vérifier sa thèse, il imagine un modèle intertemporel de demande des ménages. Ces derniers ont, à chaque date, une demande d'énergie optimale de long terme  $E_t^d(Y_t^a, PR_t^a)$  dépendant de manière traditionnelle des revenus anticipés  $Y_t^a$  et des prix relatifs anticipés  $PR_t^a$ . Ils expriment sur le marché une demande effective d'énergie  $E_t$  qui minimise à chaque instant la valeur présente actualisée des coûts. Ceux-ci se décomposent en deux : les coûts quadratiques d'écart de la demande effective en début de période à la demande optimale de long terme de fin de période, et les coûts quadratiques d'ajustement de la demande qui proviennent des changements des équipements ménagers et des automobiles. Ce modèle est très général et pourrait s'appliquer aux entreprises. Avec anticipations myopes ou adaptatives, cette dérivation donne un modèle de type Houthakker-Taylor généralisé dont les coefficients dépendent du taux d'intérêt  $r_t$  : les délais d'ajustement s'allongent avec le taux d'intérêt. Avec anticipations rationnelles, il donne le même type de modèle avec une contrainte supplémentaire sur les coefficients qui permet d'estimer le taux d'actualisation implicite des ménages (TABLEAU 4).

Si les estimations des élasticités-prix et revenus sont robustes et comparables pour la France à celles du modèle Houthakker-Taylor (voir TABLEAU 3, carburants), en revanche, les résultats ne permettent pas de vérifier la thèse de l'auteur parce que les coefficients qu'il estime ne dépendent pas du taux d'intérêt comme le voudrait son modèle théorique et parce que les anticipations sont supposées myopes. Or lorsqu'il estime le modèle avec anticipations rationnelles, s'il obtient approximativement les mêmes élasticités-prix et revenu (voir p. 252, *op. cit.*), le taux d'actualisation implicite estimé est négatif dans tous les pays. Cela signifie que les anticipations ne sont pas rationnelles.

TABLEAU 4

## Estimation des paramètres de la demande de carburant \*

	Élasticité-prix	Élasticité-revenu	Délai d'ajustement
États-Unis	- 0,56 (3,3)	1,02 (6,0)	0,74 (8,6)
France	- 0,43 (5,1)	1,34 (41,7)	0,52 (5,2)
RFA	- 0,29 (2,8)	1,42 (17,5)	0,48 (3,1)

\* Période d'estimation : 1962-1985, anticipations myopes.

Source : Wirl (1991).

C'est sur la base de ce résultat que Kauffman (1994) a cherché à généraliser la méthode et à l'étendre à l'ensemble de la demande d'énergie. Tout d'abord, il constate qu'aux États-Unis les anticipations de prix ne sont ni myopes, ni rationnelles, mais qu'elles sont fondées sur les prévisions de prix des organismes institutionnels et en particulier du DOE (Department of Energy). Ainsi le DOE anticipait en 1975 ou 1976 une stabilisation du prix de l'énergie, puis une hausse à partir de 1978 ; en 1981 il anticipait une hausse du prix de l'énergie qui aurait eu lieu à partir de 1986 (exactement le contraire de ce qui s'est passé). Pour cette raison, l'auteur considère tout d'abord que les anticipations sont fondées sur les travaux du DOE parce que le coût d'achat des prévisions est faible et aussi parce que le DOE avait une légitimité. Ces anticipations sont très fluctuantes et expliqueraient *a priori* pourquoi les États-Unis n'ont pas fait d'économies supplémentaires d'énergie dans les années soixante-dix et auraient commencé à les faire à la fin des années quatre-vingt. Le point de vue est donc différent de celui de Wirl : il ne s'agit pas de faire une hypothèse *a priori* sur les anticipations mais de les mesurer à partir des prévisions du DOE, puis d'estimer par un modèle économétrique leur influence sur la demande d'énergie.

Pour cela il se base sur un modèle général intertemporel de production. S'il s'agit d'entreprises, celles-ci ont une fonction de production dépendant du travail, du capital et de l'énergie. L'investissement ayant une durée de vie qui dépasse la période (capital fixe), il est nécessaire de répartir le coût d'achat du capital sur toute sa durée de vie si l'on veut le comparer au coût du travail et de l'énergie. Dans le cas où la technologie est Putty-Clay, c'est-à-dire peut être choisie *ex ante* (avant d'investir), mais est fixée *ex post* (l'investissement une fois réalisé), parce qu'il y a irréversibilité de l'investissement, le coût relatif capital/énergie dépend du taux de croissance anticipé du prix de l'énergie. La demande d'énergie dépendra donc positivement du coût du capital en énergie, c'est-à-dire du prix relatif du capital par rapport à l'énergie multiplié par le taux d'intérêt réel anticipé (par rapport au prix de l'énergie) corrigé du taux de dépréciation du capital ; soit, dans le cas où le capital se déprécie à taux constant, de la variable :

$$C_{K,E} = \frac{P_K}{P_E} (\tau \hat{P}_E \delta) \quad (10)$$

où :  $p_K$  est le prix d'achat du capital,  $p_E$  est le prix d'achat de l'énergie,  $\hat{p}_E$  est le taux de croissance anticipé du prix de l'énergie (en nominal),  $r$  est le taux d'intérêt nominal et  $\delta$  est le taux de dépréciation du capital.

Cette analyse ajoute aux prix relatifs le taux d'intérêt réel relatif à l'énergie pour tenir compte de la dimension intertemporelle. Elle peut, de plus, être étendue sans difficulté aux ménages. Il suffit de supposer que dans le modèle de Houthakker-Taylor, la variable d'état est un capital des ménages (automobile pour les carburants et installation domestique de chauffage pour la consommation d'énergie domestique) qui a une durée de vie déterminée (technique : exogène, ou économique : endogène). Là encore le taux d'actualisation des ménages aura la même expression que dans l'équation (10).

De ce modèle général couvrant les entreprises et les ménages, on attend les propriétés suivantes :

- un taux d'intérêt plus élevé augmente le coût du capital et donc retarde le rythme de renouvellement des équipements et décale la demande d'énergie par rapport aux prix relatifs ;

- un taux d'intérêt plus élevé incite à réduire l'intensité capitalistique, mais à choisir des techniques plus dispendieuses en énergie ;

- une hausse du taux de croissance anticipé du prix de l'énergie signale une augmentation de ses coûts actualisés vis-à-vis du capital ; ainsi la demande d'énergie devrait être plus faible que n'indiquent les prix relatifs de court terme : effet de substitution ;

- une baisse du taux de croissance anticipé du prix de l'énergie indique une baisse du coût actualisé de l'énergie par rapport au capital et à l'investissement ; on investira donc plus car la rentabilité anticipée est plus forte (effet de revenu) mais on utilisera aussi des techniques plus intensives en énergie (effet de substitution).

Si l'idée paraît intéressante, les estimations de Kauffman souffrent à notre avis d'une erreur de spécification de la variable de taux d'actualisation. En effet, il considère la statistique :

$$OILAP5 = r - \hat{p} - \hat{p}_E$$

où  $r$  est le taux moyen des bons du trésor à 5 ans,  $\hat{p}$  est le taux d'inflation de la date de publication des prévisions énergétiques du DOE et  $\hat{p}_E$  est le taux de croissance annuelle moyen sur 5 ans du prix du pétrole correspondant aux prévisions du DOE.

Cette statistique présente deux inconvénients. D'une part, elle n'est pas cohérente parce que non homogène : on ne peut déduire deux fois le « taux d'inflation » pour calculer un taux d'intérêt réel ; la variable qui préside au choix de la technique est en fait le taux d'intérêt réel rapporté au taux de croissance anticipé du prix de l'énergie. D'autre part, elle ne prend pas en compte l'amortissement du capital. Or c'est bien le but du modèle proposé de considérer la dynamique intertemporelle qui comprend un effet d'actualisation et des coûts d'ajustement liés à l'irréversibilité de l'investissement. S'il n'y a pas de coûts d'ajustement, on comprend mal pourquoi on ne changerait pas de technique instantanément. Toutefois, malgré ces deux remarques liminaires, nous allons commenter ses estimations parce qu'elles présentent aussi un intérêt à titre de méthode générale et pour faire des comparaisons internationales.

La demande d'énergie est décomposée en 5 secteurs : l'agriculture, l'industrie, les services et les commerces, le secteur résidentiel et les transports<sup>14</sup>. Pour chaque secteur les équations de demande d'énergie sont décomposées en charbon (CMS), pétrole, gaz naturel et électricité ; il s'agit donc de demandes en quantités physiques (TEP). Les variables explicatives sont : le revenu réel, les prix, la tendance, l'effet de structure et les anticipations. Les équations estimées sont du type :

$$EI = aEXP - bY + cPR + dT + eSTRUC$$

où *EXP* est la variable d'anticipation du taux d'actualisation ; *Y* est une variable de revenu réel ; *PR* est une variable de prix relatif ou de prix si les élasticités sont différenciées ; *T* est une tendance du temps ; *STRUC* est une variable prenant en compte l'effet de structure ; *EI* est l'intensité énergétique, c'est-à-dire la consommation d'énergie primaire par type d'énergie et par secteur d'activité rapportée à la valeur ajoutée du secteur pour l'industrie, à la consommation totale pour les ménages et à l'activité économique pour les transports. Les prix et l'effet de structure sont parfois considérés en logarithme (Kauffman, 1994, pp. 179-182). Selon ces estimations les effets d'anticipations sont très faibles. On peut attribuer cela au fait que la DOE n'était pas « crédible » aux États-Unis. Ainsi, les estimations semblent montrer que les agents ne sont pas rationnels (Wirl) et qu'ils n'utilisent pas vraiment les prévisions des organismes officiels (Kaufmann). En outre, les estimations de Kaufmann montrent que les élasticités-prix ne sont significatives que parce qu'il distingue les différentes formes d'énergie (charbon, gaz naturel, pétrole et électricité). Ainsi les élasticités-prix sont surtout dues à des phénomènes de substitution entre énergies plutôt qu'à des substitutions entre facteurs ou entre l'énergie et les autres consommations. Cependant, on peut retenir de cette étude qu'il est intéressant de contrôler les estimations à l'aide de variables spécifiques : taux d'accumulation en logement comme indicateur du renouvellement des techniques de chauffage, taux de croissance du PNB/tête ou des immatriculations comme indicateur du renouvellement du parc automobile.

Les estimations de la demande d'énergie montrent que le vieux modèle traditionnel de Houthakker-Taylor est robuste, qu'il soit dérivé d'une fonction d'utilité CES ou translog ou qu'il soit posé *a priori*. D'une manière générale, l'effet revenu est très proche de 1 alors qu'il y a une certaine difficulté à estimer les élasticités-prix. La difficulté à estimer les élasticités-prix peut être attribuée à des phénomènes économiques ou à des raisons statistiques. Dans le premier ordre d'idées, la substitution entre consommations énergétiques et autres consommations serait faible pour les entreprises (consommations intermédiaires) comme pour les ménages (consommations finales) en raison de l'incertitude sur les prix de l'énergie qui réduit la fiabilité (argument numérique) et l'intérêt (argument théorique lié au risque) du calcul intertemporel. En revanche, les effets prix joueraient surtout sur les substituabilités inter-énergétique, justifiant ainsi indirectement l'usage d'un indicateur agrégé de demande. Dans le second ordre d'idées, l'économétrie serait impuissante à évaluer de manière fiable les élasticités-prix relatifs parce que ces derniers sont intégrés d'ordre 0 (ne présentent pas de tendance) alors que les autres variables explicatives sont intégrées d'ordre au

14. Ces deux derniers secteurs comprennent les activités industrielles de services du logement et de transports et les dépenses d'énergie et de carburants des ménages pour compte propre (logements et transports des ménages).

moins 1 (possédant ainsi une tendance comparable à celle de la demande énergétique globale)<sup>15</sup>. Ainsi, le fait de détailler la demande d'énergie par type d'énergie permet de mieux identifier les élasticités-prix mais de manière sans doute artificielle au niveau macroéconomique : cette méthode met surtout en évidence des élasticités de substitutions entre les énergies plutôt qu'entre l'énergie et les autres demandes.

Les anticipations de prix de l'énergie ne semblent pas avoir d'impact significatif sur la demande. D'une part, elles ne sont pas rationnelles et d'autre part, elles ne semblent pas basées sur les institutions publiques de prévision. De plus, il faudrait contrôler l'estimation avec des variables spécifiques au domaine : effet de structure, richesse approximée par le PIB par tête ; logement approximé par le capital logement par tête. Pour finir, il faudrait distinguer les effets de court terme (revenus, prix) des effets de long terme (richesse, structure, logement, tendance).

## E stimation d'une demande d'énergie pour la France

### Remarques liminaires

Le travail statistique de J. Rouchet (1997a & b) montre que l'intensité énergétique primaire globale de la France, mesurée par le rapport de la consommation d'énergie primaire totale en Tep rapportée au PIB marchand en francs constants, sur longue période, présente des ruptures de tendance marquées. *Grosso modo*, de 1838 à 1938, la croissance de l'intensité énergétique est de 0,6 à 0,7 % par an et est assez régulière. Depuis la seconde guerre mondiale, au contraire, le ratio présente une décroissance de 0,7 % par an en moyenne. L'observation des données suggère donc que les deux périodes sont de nature différente. Dans la mesure où les sources originelles sont les mêmes, l'explication ne peut être qu'économique. Le contenu énergétique de la demande globale et donc le progrès technique dans son utilisation ont changé. La période 1838-1938 est caractérisée par la substitution du charbon au bois, puis à partir de 1920, par le développement de l'électricité hydraulique. L'après-seconde guerre mondiale est une période de diversification des ressources : développement du pétrole et du gaz de 1946 à 1973 environ, déclin du charbon depuis le début des années soixante et développement de l'électricité d'origine nucléaire depuis 1975. Cette modification des ressources a forcément eu un effet sur le progrès technique de l'usage de l'énergie et peut-être sur la structure de la demande, alors qu'à l'inverse les prix relatifs, la richesse et l'effet de structure ont joué sur l'intensité énergétique.

De cette analyse descriptive succincte nous tirons deux enseignements. Tout d'abord, les périodes séparées par la seconde guerre mondiale sont hétérogènes et doivent être étudiées séparément. Ensuite, le sens de la causalité (par exemple des prix vers l'intensité énergétique ou l'inverse) et le délai d'action des variables

15. Afin de tourner cette difficulté, on peut procéder à des estimations économétriques par la méthode de la co-intégration. Malheureusement la seule estimation de ce type que nous connaissons (voir Masih & Masih, 1996) porte sur les pays en développement et n'introduit justement pas les prix relatifs probablement parce qu'ils sont intégrés d'ordre 0 ou peut-être parce qu'ils ne sont pas connus sur longue période dans ces pays.

n'est pas clair *a priori*. L'étude économétrique vise à répondre à ces questions générales. On y propose une spécification et une construction des indicateurs.

D'une manière générale l'intensité en énergie primaire est un indicateur de la demande macroéconomique agrégée d'énergie, même si du point de vue statistique le numérateur du ratio est calculé à partir de la production (et du commerce extérieur) d'énergie primaire. On l'explique en tendance de long terme par des variables macroéconomiques traditionnelles comme le revenu par tête (le PIB par tête) et le prix relatif moyen de l'énergie par rapport au prix à la consommation ou par rapport au prix du PIB. À ces explications traditionnelles, on ajoute le progrès technique (en général exogène et mesuré par une tendance) et un effet de structure qui vise à prendre en compte le déplacement des activités vers des produits dont la production nécessite plus ou moins d'énergie (coefficient technique). Avant la seconde guerre mondiale, il s'agit essentiellement du développement des industries intermédiaires (particulièrement la sidérurgie) au détriment de l'agriculture. Dans l'après-seconde guerre mondiale, la situation est plus complexe. En même temps que se poursuivait la réduction de la part de l'agriculture, se développait le secteur tertiaire, comprenant les transports qui utilisent beaucoup d'énergie, tandis que simultanément, surtout depuis les années soixante-dix, les substitutions internes dans l'industrie entre activités productives de biens intermédiaires (sidérurgie, ciment) et de biens d'équipement (machines-outils et informatique) rendaient l'effet de structure plus difficile à mettre en évidence à un niveau aussi grossier de la nomenclature. Enfin, à court terme la demande d'énergie peut fluctuer en fonction des variations de prix et de la demande globale. Ainsi, estimer une équation de demande d'énergie globale se heurte à la difficulté de séparer les effets de court terme et de long terme sur les mêmes variables.

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre. La méthode traditionnelle consiste à estimer une fonction de demande globale par des moindres carrés ordinaires en niveau ou en taux de croissance. La seconde, plus moderne, consiste à procéder en deux temps. Tout d'abord, on cherche la relation de long terme entre la demande, les prix relatifs, le revenu (et éventuellement l'effet de structure) par une méthode de co-intégration des séries ; ensuite, on estime la relation de court terme en supposant que la relation de long terme joue comme une « force de rappel » : modélisation à correction d'erreur. En quelque sorte, la demande d'énergie fluctue à court terme autour d'une demande désirée de long terme. Dans la suite, nous présenterons les résultats des deux méthodes. Cependant, à titre liminaire, nous allons d'abord aborder les problèmes de spécification et de mesure.

## Le modèle général proposé

Le modèle le plus général en niveau est le suivant <sup>16</sup> :

$$LDIS = a + b * \text{temps} + c * STRU + d * L\grave{A}BT + e * LPRL \quad (10)$$

La définition des variables est la suivante.  $LDIS = \text{Log}(DIS/PIBZ)$  est le logarithme de l'intensité énergétique primaire globale. Au numérateur se trouvent les disponibilités en charbon, gaz naturel, électricité primaire et pétrole en millions de TEP, c'est-à-dire en quantités physiques pondérées par les coefficients de conversion énergétique. Les disponibilités en bois et autres énergies nouvelles

16. Voir Houthakker & Taylor (1970), Houthakker & Kennedy (1979), et Vallet (1978) pour la France.

(éolienne par exemple) ont été exclues parce qu'on ne disposait pas sur longue période d'un indice de prix de ces énergies. Les séries et leur mode de calcul sont présentées dans Rouchet (1997a). Au dénominateur se trouve le PIB marchand en francs constants de 1980<sup>17</sup>.

*LPIBT* est le logarithme du PIB marchand par tête. C'est un indicateur de la richesse des individus. Cette variable peut avoir un signe positif ou négatif selon que l'élasticité de la demande d'énergie par rapport au PIB est supérieure ou inférieure à 1.

*LPR* est le logarithme du prix relatif de l'énergie par rapport au prix du PIB ou de la consommation. Le prix de l'énergie est, sur la période de 1949 à 1996, le prix à la consommation INSEE. Pour les années antérieures, le prix a été calculé comme un indice pondéré par les différentes disponibilités en énergie :

$$PXE = \sum_{i=1}^4 (PXE_i \cdot DIS_i / DIS) \text{ avec } DIS = \sum_{i=1}^4 DIS_i \quad (11)$$

Le calcul est fait pour le charbon, l'électricité primaire, le gaz naturel et le pétrole. Les prix élémentaires de l'énergie sont tirés des statistiques séculaires de Fourastié (1962) et de l'INSEE disponibles de 1900 à 1957. Cet indice a ensuite été raccordé à l'indice INSEE en 1949. Le prix de l'électricité est le tarif de la première tranche, le prix du charbon est le prix de gros moyen à l'extraction du charbon et du lignite, le prix du pétrole est le prix du litre au détail à Paris et le prix du gaz, le prix à la consommation du m<sup>3</sup> TTC.

La variable *STRU* représente l'effet de structure de la demande d'énergie dans le secteur productif marchand. Sur longue période, et de manière grossière, on peut la décomposer en trois : le primaire, le secondaire et le tertiaire. Dans ce cas, il suffit d'introduire comme variables exogènes dans l'équation, la part des valeurs ajoutées primaire (*ZPRIM*), secondaire (*ZSEC*) et tertiaire (*ZTER*) dans la valeur ajoutée totale marchande hors énergie, soit :

$$ZPRIM = \frac{VAZU01}{VAZ} \quad (12)$$

$$ZSEC = \frac{\sum_{i=02}^{07} VAZU0i}{VAZ} \quad (13)$$

$$ZTER = \frac{\sum_{i=08}^{13} VAZU0i}{VAZ} = -1 \cdot ZPRIM \cdot ZSEC \quad (14)$$

où *U01* représente l'agriculture et *U0i* représente l'indice des secteurs marchands *U02* à *U13* de la nomenclature *U*. *VAZU0i* est la valeur ajoutée de la branche en francs constants 1980 et *VAZ* la somme des valeurs ajoutées en volume des branches marchandes hors énergie.

17. Séries Toutain de 1820 à 1889 ; Villa de 1890 à 1948 ; INSEE base 1970 de 1949 à 1969 et base 1980 à partir de 1970, raccordées.

Mais ces variables sont trop grossières pour prendre en compte l'effet de structure dans l'après-guerre. C'est pourquoi nous avons utilisé aussi un indicateur plus détaillé correspondant toujours à la nomenclature  $U$  :

$$STRU(t) = \sum_{i=1}^{13} \frac{z_i(t)}{z(t)} (y_i(t) - y_{80_i}) \quad (15)$$

$$\text{où : } z_i = \frac{E_i}{Y_i}, \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^{13} E_i}{\sum_{i=1}^{13} Y_i}, \quad \bar{Y}_i = \frac{Y_i}{Y}, \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^{13} \bar{Y}_i$$

$z_i$  représente l'intensité énergétique de la branche ( $i$ ) et  $z$  l'intensité énergétique moyenne des branches non marchandes, mesurées par les coefficients techniques en énergie de la nomenclature  $U$  :  $z_i = \frac{E_i}{Y_i} = \frac{CIZU0i}{VAZU0i}$  où  $CIZU0i$  est la consommation intermédiaire en énergie de la branche  $U0i$  en francs 1980<sup>18</sup>.

$Y_i$  est la valeur ajoutée de la branche ( $i$ ),  $y_i$  est la structure de la valeur ajoutée et  $y_{80_i}$  est la même structure en 1980 (année de base). Le calcul est mené pour l'ensemble des branches marchandes, à l'exclusion de l'énergie (branche  $U03$ ).  $STRU$  est un indice de Paasche.

Les valeurs postérieures à 1970 sont calculées en base 1980 à prix 1980 ; elles ont été rétropolées jusqu'en 1949 à partir des données de la base 1970.

Lorsqu'on voudra que l'effet de structure n'ait qu'un impact conjoncturel, on le calculera par :

$$DSTRU(t) = \sum_{i=1}^{13} \frac{z_i(t)}{z(t)} (y_i(t) - y_i(t-1)) \quad (16)$$

$DSTRU$  est un indice de Passche qui peut être chaîné pour donner un indice  $STRU$  chaîne Passche, approximation d'un indice de Divisia.

Enfin *temps* est la tendance déterministe.

C'est à estimer ce modèle général que sont dévolus les deux paragraphes suivants.

## L'estimation de la demande d'énergie avant la seconde guerre mondiale

### L'estimation par les méthodes traditionnelles

Le modèle estimé est de la forme :

$$LDIS = a_1 + a_2 * ZPRIM + a_3 * ZSEC + a_4 * LPIBT + a_5(L) * LPR + a_6 * \text{temps} \quad (17)$$

18. Les branches de biens d'équipement ont été regroupées ( $U05$ ) ainsi que les services  $U10+U11$  et les institutions financières  $U12 + U13$ .



où  $a5(L)$  un polynôme de retards.

Les estimations des coefficients de retards ont été réalisées par la méthode d'Almon en prenant un polynôme de degré 1 ou 2 et en contraignant le quatrième retard à 0. Si la somme des effets prix est significativement différente de zéro, la structure des retards est mal estimée et en grande partie arbitraire (TABLEAU 5). Toutefois les estimations traditionnelles amènent aux conclusions suivantes. On ne peut estimer simultanément la tendance du progrès technique et l'effet de richesse mesuré par le PIB marchand par tête parce que cette variable présente une tendance linéaire sur la période. L'effet de structure est très important. La baisse de la part de l'agriculture correspond à une hausse de l'intensité énergétique. Cependant la hausse de la part de l'industrie a un effet négatif contraire au signe attendu. On peut y voir l'effet du progrès technique qui pousse à économiser l'énergie dans la sidérurgie ou le ciment et aussi le développement des consommations pour le transport qui fait partie du tertiaire. L'élasticité au PIB par tête est estimée de manière robuste (lorsqu'on retire la tendance) et vaut environ 0,3. L'élasticité aux prix relatifs est aussi très robuste et vaut environ 0,11 à long terme. Mais la structure de retard estimée est assez imprécise et somme toute peut-on se contenter de supprimer les effets prix retardés.

TABLEAU 5

Estimation de la demande d'énergie avant la seconde guerre mondiale : variable dépendante LDIS *							
	Constante	ZPRIM	ZSEC	LPIBT	LPR	R <sup>2</sup>	DW
Coefficients	10,48	3,02	2,17	0,31	0,11	0,89	2,44
Écart-types	(0,86)	(0,41)	(0,24)	(0,09)	(0,03)		

\* Moindres carrés ordinaires (MCO) ; période d'estimation : 1900-1938.

### L'estimation par la co-intégration

On commence par tester le degré d'intégration des séries. On constate que le logarithme de l'intensité énergétique, du PIB par tête et du prix relatif moyen de l'énergie, ainsi que la part de l'agriculture et le nombre optimal de retards sont choisis de manière à maximiser la vraisemblance. Ensuite, on teste les relations de co-intégration entre ces variables. Une relation de co-intégration, ou relation de long terme, est acceptée si les coefficients en sont significatifs et si le résidu n'est pas intégré. Les tests sont présentés dans le TABLEAU 6 et montrent qu'il existe une relation de long terme robuste entre les cinq variables (voir EQ1).

Enfin, on estime la relation de court terme qui explique la variation du logarithme du taux d'intensité énergétique en fonction des variables conjoncturelles (variation des prix relatifs, du PIB par tête et des effets de structure) ainsi que d'une force de rappel (résidu retardé de l'équation de long terme) :

$$DLDIS = a1 * DZPRIM - a2 * DZSEC - a3 * DLPIBT - a4 * DLPR - a5 * U(1)$$

$$\begin{aligned} \text{avec : } DLDIS &= LDIS - LDIS(-1) \\ DZPRIM &= ZPRIM - ZPRIM(-1) \\ DZSEC &= ZSEC - ZSEC(-1) \\ DLPIBT &= LPIBT - LPIBT(-1) \\ DLPR &= LPR - LPR(-1) \end{aligned}$$

$U(-1)$  est le résidu retardé d'une période de la relation de co-intégration.

TABLEAU 6

Relations de co-intégration : variable dépendante LDIS *		
Variables	EQ1	EQ2
LPIBT	0,31 (0,09)	0,48 (0,08)
LPR	- 0,12 (0,03)	- 0,04 (0,06)
ZPRIM	- 3,01 (0,41)	-
ZSEC	- 2,17 (0,24)	-
Constante	- 10,48 (0,86)	- 13,64 (0,74)
$R^2$	0,89	0,53
DW	2,44	0,79
Test DF (sans retard)	- 7,34	- 2,77
Résidu : I (1)	Non	Oui
Conclusion	Acceptée	Refusée

\* La valeur critique du test de Dickey-Fuller à 5 % avec constante (table de Phillips-Ouliaris) est de -4,45 pour 4 variables explicatives et -3,77 pour 2 variables explicatives : voir Hamilton (table B9, case 2, p. 766). Elle est de -4,16 et -3,45 à 10 %. Les valeurs des tests correspondent ici à des retards nuls.

Les résultats du TABLEAU 7 (équation EQ1) montrent que toutes les variables ont un effet conjoncturel significatif en plus de l'effet de long terme. La relation de court terme correspondant à l'équation EQ2 n'étant pas d'aussi bonne qualité, on est conduit à rejeter ce modèle partiel.

TABLEAU 7

Estimation de court terme : variable dépendante DLDIS *							
	DZPRIM	DZSEC	DLPIBT	DLPR	U(-1)	$R^2$	DW
Coefficients (EQ1)	- 2,79 (0,53)	- 1,95 (0,50)	0,27 (0,12)	- 0,11 (0,04)	- 1,22 (0,17)	0,69	1,98
Coefficients (EQ2)	- 2,29 (0,76)	- 1,39 (0,70)	0,35 (0,18)	- 0,10 (0,06)	- 0,30 (0,12)	0,36	2,72

\* Moindres carrés ordinaires (MCO) ; période d'estimation : 1900-1938 ; U(-1) est le résidu retardé de la relation de co-intégration.

Si l'on tient compte des fluctuations de court terme, l'intensité énergétique jusqu'à la seconde guerre mondiale est donc très sensible aux effets de structure, a une élasticité à la richesse proche de 0,30 à long terme et une sensibilité aux prix relatifs de -0,10 environ, significativement différente de 0.

# E

## stimation de la demande d'énergie après la seconde guerre mondiale

L'équation générale estimée est de la forme :

$$LDIS = a_1 + a_2 * temps + a_3 * STRU + a_4 * LPIBT + a_5(L) * LPR \quad (18)$$

où *LPIBT* est le logarithme du PIB marchand en volume par tête ; *STRU* est l'effet de structure défini par l'équation (6) ; *LPR* est le logarithme du prix à la consommation finale d'énergie au prix de la consommation finale totale et prend donc en compte l'effet du prix relatif et de la taxation ; *LPIBT* est le logarithme du PIB par tête ; *a5(L)* est un polynôme de retard.

Les résultats sont donnés dans le TABLEAU 8. L'effet de structure, quelle que soit sa mesure, n'est jamais significatif. Plusieurs explications peuvent être données. Tout d'abord, la part de la valeur ajoutée agricole présente une tendance qui est corrélée avec la tendance temporelle censée représenter le progrès technique<sup>19</sup>. En outre, la part du secteur secondaire est non significativement différente de 0 : la diminution de la part de la valeur ajoutée de la sidérurgie et des ciments a été compensée par l'augmentation de la part des transports. Il en résulte que la part des industries intermédiaires et du secteur des transports et télécommunications ne sont pas des variables explicatives de l'intensité énergétique moyenne<sup>20</sup>. Force est donc de mesurer l'effet de structure par un indicateur global : nous avons pris la variable *STRU* définie par l'équation (16). Les résultats économétriques ci-dessous montrent que cette variable n'est pas significative. Cela suggère que le développement des transports peut avoir compensé la baisse de la part des industries intermédiaires ou que le niveau sectoriel utilisé est trop grossier : peut-être faudrait-il utiliser la nomenclature en 40 secteurs (nomenclature *T* de l'INSEE) pour mesurer un effet de structure significatif ?

TABLEAU 8

Estimation de la demande d'énergie après la seconde guerre mondiale : variable dépendante LDIS *							
	Constante	Tendance	STRU	LPIBT	LPR	R <sup>2</sup>	DW
Coefficients	- 11,57	- 0,0142	- 0,21	0,28	- 0,12	0,90	0,71
Écarts-types	(0,89)	(0,0027)	(0,22)	(0,10)	(0,05)		

\* Moindres carrés ordinaires (MCO) ; période d'estimation : 1953-1996.

L'estimation par les moindres carrés ordinaires en imposant un retard, ou en fixant une structure de retards par la méthode d'Almon, donne une tendance de - 1,3 % environ, une élasticité au PIB par tête de 0,20 et une élasticité aux prix

19. La co-linéarité de la part de l'agriculture et du temps rend la tendance non significative.

20. Les variables *ZSEC* (équation 4), *ZU04* = *VAZU04/VAZ* (part de la valeur ajoutée des biens intermédiaires) et *ZU09* = *VAZU09/VAZ* (part de la valeur ajoutée des transports et télécommunications) ne sont pas significatives.

relatifs de  $-0,10$  environ. Si la somme des effets prix est significativement différente de 0, en revanche la structure des retards est arbitraire et le délai moyen ne peut être estimé de manière satisfaisante. En conséquence, l'estimation par les moindres carrés ordinaires avec un retard d'un an pour les effets prix est suffisante. Son pouvoir explicatif est de 89 %, mais les résidus présentent une autocorrélation du premier ordre positive de 0,7 qui ne peut être corrigée de manière satisfaisante par une méthode de type Cochrane-Orcutt (TABLEAU 8).

Selon les tests, toutes les séries sont intégrées d'ordre 1 avec tendance déterministe et constante. Il est donc possible d'envisager une relation de long terme de co-intégration entre ces variables. Nous l'avons estimée par les moindres carrés ordinaires (TABLEAU 9).

TABLEAU 9

Relations de co-intégration : variable dépendante LDIS \*

Variables	EQ1	EQ2
STRU	- 0,19 (0,20)	-
LPIBT	0,28 (0,10)	0,20 (0,06)
LPR (- 1)	- 0,12 (0,05)	- 0,10 (0,05)
Tendance	- 0,014 (0,0027)	- 0,013 (0,0018)
Constante	- 11,57 (0,87)	- 10,85 (0,45)
R <sup>2</sup>	0,90	0,89
DW	0,71	0,68
Test DF	- 3,15	- 3,10
Valeur critique (5 %)	- 4,16	- 3,80
I (1)	ambigu	non
Conclusion	ambigu	acceptée

\* Moindres carrés ordinaires (MCO) ; période d'estimation : 1953-1996 ;

valeurs critiques données pour 500 points avec constante et tendance par la table de Phillips-Ouliaris, voir Hamilton (table B9, cas 3, p. 766). À 10 % les valeurs critiques pour 3 et 2 variables explicatives sont  $-3,84$  et  $-3,52$ . Le nombre de retards optimal est de 3 et maximise la vraisemblance.

Ces relations montrent qu'on peut accepter une relation de co-intégration faisant dépendre à long terme le taux d'intensité énergétique primaire du PIB par tête, des prix relatifs et d'une tendance du progrès technique. En revanche, l'effet de structure n'est pas significatif à long terme, sans doute parce que le progrès technique est prépondérant et que le niveau d'agrégation choisi est trop grossier. On estime ensuite la relation de court terme par un modèle à correction d'erreur. La formule adoptée (en faisant apparaître les signes des coefficients) est la suivante :

$$DLDIS = a1 * DSTRU - a2 * DLPIBT - a3(L) * DLPR - a4 * U(1)$$

L'estimation par les moindres carrés ordinaires (EQ2) montre qu'à court terme, l'élasticité de la variation de l'intensité énergétique primaire a une élasticité de 0,48 par rapport à l'effet de structure, de  $-0,26$  par rapport aux variations du PIB par tête et de  $-0,22$  par rapport aux variations des prix relatifs. Cela montre que la demande d'énergie est relativement rigide à court terme et qu'elle est peu sensible à la richesse à court terme. Toutefois l'estimation est peu précise puisqu'elle n'explique que 33 % de la variance.

TABLEAU 10

	Relations de court terme : variable DLDIS *							
	EQ2	EQ2	EQ2	EQ2**	EQ1	EQ1	EQ1	EQ1**
DSTRU	0,62 (0,278)	0,57 (0,26)	0,51 (0,27)	0,48 (0,26)	0,61 (0,26)	0,56 (0,26)	0,48 (0,27)	0,46 (0,26)
DLPIBT	- 0,24 (0,11)	- 0,25 (0,11)	- 0,25 (0,11)	- 0,26 (0,11)	- 0,24 (0,12)	- 0,24 (0,11)	- 0,25 (0,11)	- 0,26 (0,11)
DLPR	-	- 0,12 (0,08)	-	- 0,22 (0,11)	-	- 0,12 (0,08)	-	- 0,23 (0,10)
DLPR (- 1)	-	-	- 0,12 (0,08)	-	-	-	- 0,13 (0,08)	-
U (- 1)	- 0,34 (0,12)	- 0,30 (0,12)	- 0,35 (0,12)	- 0,30 (0,12)	- 0,35 (0,12)	- 0,30 (0,12)	- 0,36 (0,12)	- 0,30 (0,12)
R <sup>2</sup>	0,26	0,30	0,30	0,33	0,25	0,30	0,30	0,33
DW	1,48	1,49	1,41	1,34	1,50	1,50	1,42	1,34

\* Moindres carrés ordinaires (MCO) ; période d'estimation : 1953-1996.  
\*\* Prix pondérés par 0,6\*DLPR+0,4\*DLPR(-1).

Ainsi une méthode de co-intégration aboutit à une tendance très élevée, à une élasticité-revenu de la demande d'énergie nettement supérieure à 1 et à une élasticité-prix à long terme significativement négative. À court terme, l'élasticité-revenu est significativement plus faible mais reste plus élevée que 1. Cela signifie que dans les périodes d'expansion ou de récession de court terme, la demande d'énergie est plus rigide que le PIB alors que dans les périodes de moyen terme, sa croissance est plus sensible que la croissance du PIB.

## Le coût d'usage du capital et l'effet de rigueur climatique

Cette approche est centrée sur le coût relatif de l'énergie par rapport au capital. Plus précisément, afin de choisir la technique de production, les entreprises doivent répartir sur la durée de vie du capital le coût de l'énergie. Ainsi, en raison de l'irréversibilité de l'investissement telle qu'on peut la modéliser dans un modèle Putty-Clay, le choix de la technique de production doit s'effectuer en fonction du prix anticipé de l'énergie. Le coût d'usage relatif du capital est calculé comme le rapport du prix du capital actualisé au prix de l'énergie :

$$CUK = \frac{P_E}{p_K(r - \hat{p}_E + \delta)}$$

où  $P_E$  est le prix de l'énergie,  $p_K$  est le prix du capital,  $r$  est le taux d'intérêt,  $\delta$  est le taux d'amortissement du capital et  $\hat{p}_E$  est le taux de croissance anticipé du prix de l'énergie. Ce dernier est calculé par une formule adaptative à partir des taux de croissance du prix de l'énergie sur 4 années tandis que le prix du capital est approximé par le prix du PIB marchand.

Le prix relatif de l'énergie  $p_E/p_K$  devrait avoir un effet négatif sur l'intensité énergétique. De plus un taux d'intérêt élevé augmente le coût du capital et réduit le coût actualisé de l'énergie lorsqu'on escompte le coût de l'énergie dans le futur en fonction du capital utilisé. Ainsi le taux d'intérêt devrait avoir un impact positif sur la demande d'énergie des entreprises. De même, une anticipation de croissance du prix de l'énergie réduit le coût actualisé du capital et doit avoir un effet négatif sur la demande d'énergie. Selon les tests de racine unitaire, le coût relatif des facteurs est une variable intégrée d'ordre 1. Mais le test de la relation d'intégration montre que le coût d'usage relatif du capital a un effet positif sur la demande d'énergie avant la seconde guerre mondiale. Ce signe est l'opposé du signe attendu et l'équation ne peut donc être retenue. Sur l'après-guerre, le coût d'usage n'est jamais significatif. Les entreprises n'ont en effet pas anticipé correctement les prix de l'énergie lors des chocs pétroliers. Ainsi, la croissance de l'intensité énergétique eut été plus faible avant 1975 et plus forte après le contre-choc pétrolier si les anticipations avaient été correctes et si la demande d'énergie correspondait à ce modèle. Les résultats sont donc négatifs : le taux d'intérêt réel et le taux de croissance anticipé du prix de l'énergie n'ont pas eu d'effet significatif sur la demande d'énergie sur les 35 dernières années.

Les séries utilisées pour les estimations ne sont pas corrigées des effets de rigueur climatique. Or les observations montrent que les fluctuations de court terme de la demande d'énergie dépendent du climat. En outre, la part de la consommation des ménages pour le chauffage augmente au cours du temps. Les ménages chauffent plus leur logement, rendant la demande globale d'énergie plus sensible au climat. Il faudrait donc estimer un modèle du type :

$$\frac{E}{PIB} = \left( \frac{E}{PIB} \right)^d (1 + \alpha \text{RIGUEUR})$$

où *RIGUEUR* est la correction pour les effets climatiques calculée en « degré-jour unifié » par rapport à une norme moyenne, et  $\frac{E}{PIB}$  ainsi  $\left( \frac{E}{PIB} \right)^d$  que sont les intensités énergétiques observées et désirées pour une norme moyenne de climat.

En passant en logarithme, on obtient :  $\text{Log} \left( \frac{E}{PIB} \right) = \text{Log} \left( \frac{E}{PIB} \right)^d + \alpha \text{RIGUEUR}$ .

Il suffit donc d'ajouter la variable explicative *RIGUEUR* aux équations estimées précédemment. Il reste cependant à tester si l'effet climatique a un impact à court terme ou à long terme. Les résultats sont malheureusement très décevants. La variable *RIGUEUR* n'est pas intégrée d'ordre 1 comme les autres, mais dans une équation économétrique de long terme, elle a un effet significativement positif alors qu'elle n'est jamais significative dans les équations de court terme. Elle prend en compte un effet de tendance qui ne peut être que l'évolution à long terme de la part du chauffage des ménages dans la demande globale d'énergie. En contrôlant la régression par l'effet de rigueur, les autres coefficients sont assez stables : l'élasticité au PIB par tête est de 1,11, celle aux prix relatifs de -0,13 et la tendance est de -1 %. La spécification adoptée est robuste.

## Conclusion

La principale difficulté pour estimer l'intensité énergétique est de prendre en compte le progrès technique, les effets de structure et le coût relatif d'usage de l'énergie. Pour les États-Unis, comme pour la France, le coût d'usage relatif de l'énergie par rapport au capital n'est pas significatif. À cela, une explication hors modèle : les anticipations de croissance des prix de l'énergie ne sont pas rationnelles ; elles sont basées sur les anticipations de long terme que formulent les organismes publics, avec ou sans modèle, le Department of Energy aux États-Unis, le Commissariat général du Plan ou le CIREN en France, etc. Selon les résultats économétriques, ces organismes n'auraient pas été crédibles, au sens où les entreprises n'ont pas toujours utilisé ces prévisions de croissance des prix de l'énergie pour choisir la technique de production, sans doute parce qu'elles variaient trop au cours du temps par rapport à la durée de vie des équipements. Les États-Unis auraient dû faire plus d'économies d'énergie et les choix techniques de la France dépendaient plus d'une décision macroéconomique : le taux de change bas était cohérent avec la substitution au nucléaire, tandis que l'Allemagne choisissait un taux de change élevé pour accroître ses termes de l'échange et payer moins cher les produits pétroliers.

La question du progrès technique n'est-elle pas enflée parce qu'on ne tient pas compte des effets de structure ? Des études statistiques françaises et internationales montrent que l'effet de structure du PIB est faible. Ces travaux statistiques ont toutefois l'inconvénient de ne pas isoler le progrès technique puisqu'ils rejettent dans l'effet de contenu l'ensemble des explications économiques hors effet de structure. Des travaux économétriques ont été effectués pour les États-Unis. Menés sectoriellement pour tenir compte de l'effet de structure, ils montrent que la tendance du progrès technique est faible et variable selon les secteurs. Les élasticités-prix et revenu sont aussi très différentes selon l'utilisation. Ces résultats soulignent la difficulté à séparer les variables économiques de la tendance et des effets de structure.

Selon nos tests économétriques sur longue période pour la France, avant comme après la seconde guerre mondiale, l'élasticité de la demande, mesurée par l'intensité énergétique primaire, au revenu sur longue période est de l'ordre de 1,2 à 1,3, alors que l'élasticité négative aux prix relatifs est environ de 0,1. Cela signifie d'abord que l'énergie est un produit de luxe au sens où la croissance de sa demande est supérieure à la croissance des revenus. Cela signifie aussi qu'une hausse du prix relatif de l'énergie de 10 % fait baisser l'intensité énergétique de 1 % (une hausse durable de 20 % du prix des produits pétroliers et du gaz provoque une baisse de la demande de 1,2 % avec la structure de 1996). Par ailleurs une croissance durable plus forte de 1 % augmente la croissance de la demande d'énergie primaire en TEP de 1,2 à 1,3 %. Si l'effet de structure est crucial pour expliquer la demande d'énergie avant 1938, il n'en est pas de même après 1949, en raison sans doute de la diversification des ressources énergétiques et de l'appareil industriel. Enfin, il est apparu depuis la seconde guerre mondiale une tendance de progrès technique dans l'utilisation de l'énergie qu'on peut évaluer à 1,0 % sur longue période. En moyenne, l'intensité énergétique observée baisse de 0,7 % par an mais la tendance est de - 1,0 % par an. Cette dernière recouvre le progrès technique, l'effet de structure et les économies volontaires d'énergie.

Certes, cette tendance est fortement corrélée à l'effet de structure depuis 1970, ce qui en rend la mesure imprécise. Les plans sidérurgiques et le développement des services sont par exemple concomitants des chocs pétroliers. Dans la perspective d'une discussion sur les économies d'énergie à long terme (qu'elles soient obtenues par les prix ou par des normes), les estimations économétriques robustes sur longue période prennent tout leur sens.

P. V.

#### RÉFÉRENCES

- Agence internationale de l'énergie-AIE (1997), *Indicators of Energy Use and Efficiency*, OCDE/AIE et Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL).
- Bhattacharyya S.C. (1996), « Applied General Equilibrium Models for Energy Studies: a Survey », *Energy Economics*, vol. 18, n° 3, juillet, pp. 145-164.
- Beaver R.D. (1993), « Structural Comparison of the Models in EMF 12 », *Energy Policy*, mars, pp. 238-248.
- Beaver R.D. & H.G. Huntington (1992), « A Comparison of Aggregate Energy Demand Models for Global Warming Policy Analysis », *Energy Policy*, juin, pp. 568-574.
- Chateau B. & B. Lapillonnie (1977), *La prévision à long terme de la demande d'énergie : le modèle MEDEE*, collection énergie et société, CNRS, Paris.
- Conseil mondial de l'énergie-CME (1993), *L'énergie pour le monde de demain*, Édition Technip, Paris, chapitres 1 et 2.
- DMS (1987), « DMS-4, modèle dynamique multi-sectoriel », *collection de l'INSEE*, série C, n° 139, INSEE, Paris, juillet.
- Fourastié J. (1970), *Documents pour l'élaboration d'indices de coûts de la vie en France de 1910 à 1965*, Mouton, Paris.
- Furtado A.T. & S.B. Suslick (1993), « Forecasting of Petroleum Consumption in Brazil Using the Intensity of Energy Technique », *Energy Policy*, pp. 958-968, septembre.
- Hamilton J.D. (1994), *Time Series Analysis*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Hourcade J.-C. (1993), « Modelling Long-Run Scenarios: Methodology Lessons from a Prospective Study on Low CO<sub>2</sub> Intensive Country », *Energy Policy*, vol. 21, n° 3, mars, pp. 309-326.
- Howarth R.B., L. Schipper & B. Andersson (1993), « The Structure and Intensity of Energy Use: Trends in Five OECD Nations », *The Energy Journal*, vol. 14, n° 2, pp. 27-45.
- Houthakker H.S. & L.D. Taylor (1970), *Consumer Demand in the United States*, Harvard University Press.
- Houthakker H.S. & M. Kennedy (1979), « A Long Run Model of World Energy Demands, Supplies, and Prices », dans *Directions in Energy Policy: A Comprehensive Approach to Energy Resource Decision Making*, sous la direction de B. Kursunoglu & A. Perlmutter, Ballinger, Cambridge, MA.
- Humphrey W.S. & J. Stanislaw (1979), « Economic Growth and Energy Consumption in the UK, 1700-1975 », *Energy Policy*, mars, pp. 29-42.
- INSEE (1993), « Le produit national brut : sources et méthodes », (partie 3, chap. 5, les consommations intermédiaires), *INSEE méthodes*, n° 34-35-36, pp. 125-130.
- Jorgenson D.W. & P.J. Wilcoxon (1993), « Reducing US Carbon Emissions: an Econometric General Equilibrium Assessment », *Resources and Energy Economics*, vol. 15, pp. 7-25.
- Kauffmann R.K. (1994), « The Effect of Expected Energy Prices on Energy Demand: Implications for Energy Conservation and Carbon Taxes », *Resources and Energy Economics*, vol. 16, pp. 167-188.



- Markovitch T.J. (1966), « L'industrie française de 1789 à 1964 », *Cahiers de l'ISMEA*, AF6, n° 174, juin, chapitre VIII, Énergie.
- Martin J.-M. (1988), « L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés : les évolutions de très longue période livrent-elles des enseignements utiles ? », *Économies et Sociétés*, Revue de l'ISMEA, vol. 4, pp.9-27.
- Martin J.-M., B. Chateau, P. Criqui, & B. Lapillone (1984), « La diminution de la consommation d'énergie en France : réaction conjoncturelle ou inflexion de tendance sur longue période », *Revue de l'énergie*, n° 363, avril, pp. 18-191.
- Masih A.M.M. & R. Masih (1996), « Energy Consumption, Real Income and Temporal Causality: Results from a Multi-Country Study Based on Cointegration and Error-Correction Modelling Techniques », *Energy Economics*, vol. 18, n° 3, juillet, pp. 165-183.
- Rouchet J. (1997a), *La consommation d'énergie en France sur longue période*, I-Sources et méthodes, Direction générale de l'énergie et des matières premières, n° 320, octobre.
- \_\_\_\_\_ (1997b), *La consommation d'énergie en France sur longue période*, II-Résultats, Direction générale de l'énergie et des matières premières, n° 321, octobre.
- Schipper L. & S. Myers (1993), « Using Scenarios to Explore Future Energy Demand in Industrialized Countries », *Energy Policy*, vol. 21, n° 3, mars, pp. 264-275.
- Stevens P. (1995), « The Determination of Oil Prices: a Diagrammatic Interpretation », *Energy Policy*, vol. 23, n° 10, octobre, pp. 861-870.
- Vallet D. (1978), « Les ménages », dans *DMS* par D. Fouquet, J.-M. Charpin, H. Guillaume, P.-A. Muet et D. Vallet, INSEE, n° 64-65, Paris.
- Wirl F. (1991), « Energy Demand and Consumer Price Expectations: an Empirical Investigation of the Consequences from the Recent Oil Price Collapse », *Resources and Energy*, vol. 13, n° 3, pp. 241-262.

