

Une analyse de la dynamique des comportements de substitution de facteurs dans cinq branches de l'économie française

Jean-Claude BERTHELEMY,
Jean-Guy DEVEZEAUX de LAVERGNE,
Norbert LADOUX *

RÉSUMÉ. – Dans cette étude nous introduisons des termes d'ajustement dans une formulation translog classique. Nous obtenons ainsi une forme dynamique des parts relatives des facteurs de production. A la différence des autres études, nous considérons ici que les rigidités portent sur les volumes plutôt que sur les valeurs. La forme fonctionnelle retenue a été estimée pour cinq branches industrielles de l'économie française. Les résultats obtenus autorisent une analyse de l'évolution des élasticités de substitution sur 1959-1982 ainsi qu'une comparaison des élasticités de court et de long terme.

An Analysis of the Dynamics of Inputs Substitution in Five Sectors of French Economy

ABSTRACT. – In this study we introduce adjustment terms in the classic translog formulation. We thus obtain a dynamic form of the usual value shares of inputs. Unlike other studies of this type here we consider that quantities, but not values, are rigid. The retained functional form was estimated in five industrial sectors of French economy. The results thus obtained allow an analysis of the evolution over a period of time (1959-1982), as well as a comparison between the different sectors, of the elasticities of substitution in the long and short run.

* J. C. BERTHELEMY : École Normale Supérieure, Laboratoire d'Économie Politique, 45, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05; J. G. DEVEZEAUX DE LAVERGNE : Commissariat à l'Énergie Atomique, Département des Programmes, 31-33, rue de la Fédération, 75015 Paris et Université Paris-I, U.E.R. 06; N. LADOUX : Commissariat à l'Énergie Atomique, Département des Programmes, 31-33, rue de la Fédération, 75015 Paris et GREMAQ. Les auteurs remercient A. CHARMANT et R. LE VAN pour leur aide précieuse lors des calculs des élasticités de substitution.

1 Introduction

L'essor de la théorie de la dualité, fondée principalement par HOTELLING [1932], ROY [1947] et SHEPHARD [1953], a permis, dès les années soixante, l'estimation de fonctions de coûts duales reposant simultanément sur les données des niveaux des facteurs au sein du processus productif et sur les niveaux de leur prix. Une des conséquences pratiques du recours à la théorie de la dualité est la spécification de fonctions de production à plus de deux facteurs : l'énergie figure ainsi dans la quasi-totalité des études. Une des premières applications est par exemple le travail de NERLOVE [1963] sur le secteur électrique des USA.

Au cours des années soixante-dix se sont développés de façon concomitante des travaux théoriques (DIEWERT [1971], FUSS et MACFADDEN [1978], etc.) et économétriques. Ces derniers ont pour beaucoup utilisé la forme « translog » introduite par CHRISTENSEN, JORGENSON et LAU [1973].

Les premières estimations concernent tant des séries temporelles (HUDSON, JORGENSON [1977], BERNDT et WOOD [1975]) que des coupes instantanées (HALVORSEN et FORD [1977]), ou un panachage des deux (GRIFFIN et GREGORY [1976], FUSS [1977], SICKLES [1983]).

A la fin de la dernière décennie se sont développés des travaux qui ont tenté d'améliorer le modèle de base, en particulier par l'introduction de la dynamique dans les substitutions de facteurs (cf. BERNDT et SAVIN [1975] et surtout BERNDT, MORRISON et WATKINS [1981]). Les modèles présentés sont tous fondés sur des ajustements (éventuellement croisés) sur les parts des facteurs en valeur (pour application sur données françaises voir POUCHAIN [1980]).

La présente étude se démarque des précédentes par :

- le recours à une formulation dynamique où les rigidités portent sur les volumes. Elle se rapproche en cela de la traditionnelle distinction de générations de capital, plus sans doute que des interprétations en termes de coûts d'ajustements qui sous tendent généralement ce type de travail (cf. LUCAS [1967]). La définition des élasticités à court terme est, dans le cas présenté, bien plus réaliste que celle qui repose sur des retards en valeur, les fluctuations de prix provoquant alors des variations injustifiées des volumes;

- une estimation qui repose sur l'utilisation conjointe d'une technique inspirée de Cochrane et Orcutt et de variables instrumentales;

- une analyse détaillée des élasticités de substitution entre facteurs, reposant sur le calcul explicite de leurs valeurs à court et long terme. La difficulté provient de la non-cohérence de l'indice sous-jacent aux fonctions translog (indice de Divisia ou de Tornqvist) avec celui de la Comptabilité Nationale (indices de Paasche et Laspeyres).

2 Estimation : méthode et résultats

2.1. Approche duale de la production

La théorie de la dualité montre l'équivalence de la représentation de la technologie de l'entreprise à l'aide de fonctions de production ou de coût unitaire, sous réserve qu'elles soient continues, croissantes, homogènes de degré un et concaves.

Cette approche permet de s'affranchir, via le lemme de Shephard, des problèmes économétriques rencontrés lors de l'estimation d'approximation de deuxième ordre de la véritable fonction de production.

Ceci est à la base de nombreux travaux économétriques parmi lesquels on peut citer pour le cas français ARTUS et PEYROUX [1981], CAPROS, LADOUX, OUTREQUIN [1984], BERTHELEMY, DEVEZEAUX de LAVERGNE, LADOUX [1986] et KARADELOGLOU [1985].

L'approximation de la fonction de coût unitaire la plus couramment utilisée est la forme introduite par CHRISTENSEN, JORGENSON et LAU [1973].

Elle s'écrit :

$$(1) \quad \text{Log } P = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \text{Log } P_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} \text{Log } P_i \text{Log } P_j + \text{Log PROA}$$

Où P est le coût unitaire de production ou prix du produit X , P_i est le prix du facteur de production X_i , PROA est un indice de productivité exogène et neutre au sens de Hicks.

Les propriétés de ces fonctions sont connues.¹

Dans cet article, nous n'imposerons que les conditions d'homogénéité et de symétrie pour ne pas contraindre *a priori* les élasticités de substitution.²

La dérivation de (1) permet de définir les fonctions de demande de facteurs (cf. SHEPHARD [1953]) sous la forme :

$$(2) \quad W_i = \alpha_i + \sum_j \beta_{ij} \text{Log } P_j$$

Où :

$$(3) \quad W_i = \frac{P_i X_i}{PX} = \frac{\partial \text{Log } P}{\partial \text{Log } P_i}$$

1. Cf. en particulier, pour les contraintes de concavité, les études de HUDSON, JORGENSON [1977] et JORGENSON et FRAUMENI [1981].

2. BERNDT et WOOD [1985] montrent en particulier que les contraintes de concavité globales conduisent à une élasticité capital-énergie voisine de un.

2.2. Introduction d'un retard d'ajustement et du taux d'utilisation

Un système de production de type putty-putty suppose que la structure de production s'adapte instantanément aux conditions du marché mais cette hypothèse n'est pas conforme à la réalité.

En effet, si le mouvement des prix relatifs rend nécessaire des substitutions entre facteurs, celles-ci ne pourront principalement porter que sur les équipements qui vont être installés et sur les quantités de facteurs (travail, énergie, matériaux) qui seront utilisées sur ces équipements.

On caractérise généralement les contraintes techniques sous-jacentes du producteur à l'aide d'un modèle de type putty-clay.³

Mais cette approche est difficilement applicable au cas d'une fonction KLEM car il faudrait, entre autres, construire des séries de consommation et de prix de l'énergie et des matériaux utilisés sur la dernière tranche d'équipements.

La solution retenue ici, consiste à exprimer les parts relatives des facteurs dans la production en volume (coefficients techniques)⁴ comme une combinaison linéaire des parts relatives de la période précédente et des parts relatives optimales qui dérivent de la formulation putty-putty.

On a ainsi :

$$(4) \quad \frac{X_i}{\sum X_i} = \lambda_i \frac{X_{i(-1)}}{\sum X_{i(-1)}} + (1 - \lambda_i) \frac{X_i^*}{\sum X_i^*}, \quad i = K, L, E, M.$$

Afin d'être introduit dans une forme translog le mécanisme dynamique d'ajustement de l'équation (4) doit être exprimé en terme de part de facteur. Soit en multipliant par : $P_i \sum X_i / \sum P_i X_i$:

$$(5) \quad \frac{P_i X_i}{\sum P_i X_i} = \lambda_i \frac{P_i X_{i(-1)}}{\sum P_i X_{i(-1)}} \cdot \frac{\sum P_i X_{i(-1)} \sum X_i}{\sum P_i X_i \sum X_{i(-1)}} + (1 - \lambda_i) \frac{P_i X_i^*}{\sum P_i X_i^*} \cdot \frac{\sum P_i X_i^* \sum X_i}{\sum P_i X_i \sum X_i^*}$$

soit alors le terme :

$$(a) = \frac{\sum P_i X_{i(-1)} \sum X_i}{\sum P_i X_i \sum X_{i(-1)}}$$

On peut aussi l'écrire :

$$\begin{aligned} (a) &= \frac{\sum P_i X_{i(-1)} / \sum P_i X_i}{\sum X_{i(-1)} / \sum X_i} \\ &= \sum P_i \left(\frac{X_{i(-1)}}{\sum X_{i(-1)}} \right) / \sum P_i \left(\frac{X_i}{\sum X_i} \right) \end{aligned}$$

On reconnaît alors l'expression de l'indice de Paasche du prix des inputs au numérateurs dans la structure de l'année courante et au dénominateur dans celle de l'année précédente.

Au premier ordre on a :

$$\sum d\left(\frac{X_i}{\sum X_i}\right) = 0$$

et donc

$$\sum P_i \left(\frac{X_i}{\sum X_i}\right) \approx \sum P_i \left(\frac{X_{i-1}}{\sum X_{i-1}}\right)^5$$

Ainsi au premier ordre $(a) = 1$.

L'approximation de la translog nécessiterait en toute logique que cette égalité soit vérifiée au deuxième ordre mais dans la pratique on notera que le recours aux indices de Paasche et Laspeyres de la Comptabilité Nationale ne garantit pas une précision meilleure que le premier ordre : on s'en contentera donc.⁶

Ainsi on simplifiera l'équation (4) :

$$(6) \quad \frac{P_i X_i}{\sum P_i X_i} = \lambda_i \frac{P_i X_{i(-1)}}{\sum P_i X_{i(-1)}} + (1 - \lambda_i) \frac{P_i X_i^*}{\sum P_i X_i^*}$$

La contrainte d'additivité $\sum W_i = 1$ impose (cf. BERNDT et SAVIN [1975]) :

$$\lambda_i = \lambda, \quad \forall_i$$

Cette contrainte est aussi nécessaire dans la formulation putty-clay.

Cependant, les fluctuations de court terme du niveau de production imposant le recours à des générations d'équipements plus ou moins récentes, c'est-à-dire plus ou moins capitalistiques, la vitesse d'ajustement des différents facteurs de production à leur optimum n'est pas unique. En particulier, la spécification retenue, qui porte sur des ratios analogues à des coefficients techniques, n'intègre que mal les rigidités de court terme sur les niveaux des facteurs (la différence entre ces deux concepts portant sur la variation du niveau de production). Pour prendre en compte ces variations conjoncturelles (en fait l'écart par rapport au taux de croissance moyen), nous avons introduit dans les équations (5) le taux d'utilisation des capacités de production.

Il faut cependant admettre avec ARTUS et PEYROUX [1981] que cette solution est quelque peu *ad hoc*.

3. Cf. ARTUS et PEYROUX [1981].

4. Le coefficient technique du capital est le rapport du capital utilisé (capital disponible corrigé du taux d'utilisation des capacités de production) à la production.

5. De même on établirait une expression formellement analogue pour la part optimale X_i^* .

6. Un calcul nous a persuadé des très petites variations du terme (a) : de l'ordre du millième pour des fluctuations des parts de l'ordre de plusieurs pour cent.

En définitive les équations des parts relatives s'écrivent :

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} W_i = \lambda W d_i + \alpha_i + \sum_j \beta_{ij} \text{Log } P_j + \delta_i \text{Log } UT \\ i = K, L, E, M \end{array} \right. \quad (7)$$

avec

$$W d_i = \frac{P_i X_{i(-1)}}{\sum P_i X_{i(-1)}} \quad \text{et} \quad \sum \delta_i = 0$$

à long terme, $W_i = W d_i$ et $UT = \overline{UT}$ l'expression (7) devient alors :

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} W_i^{LT} = \frac{1}{1-\lambda} (\alpha_i + \sum_j \beta_{ij} \text{Log } P_j + \delta_i \text{Log } \overline{UT}) \\ i = K, L, E, M. \end{array} \right. \quad (7)$$

2.3. Choix de l'estimateur

Le système (7) précédent peut être estimé classiquement par la méthode de Zellner qui permet de tenir compte d'une éventuelle corrélation entre les résidus d'estimation des différents facteurs. Les contraintes d'additivité à 1 des parts des facteurs sont prises en compte en estimant trois équations sur les quatre que comporte le système KLEM (7), la dernière étant obtenue par solde. Les contraintes de symétrie apparaissent comme des contraintes linéaires sur les paramètres du système, qui peuvent être prises en compte sans difficulté dans la méthode de Zellner.

Les résultats obtenus présentent cependant un caractère insatisfaisant, car ils font apparaître une nette autocorrélation des résidus d'estimation de chacune des équations du système.

Cette autocorrélation des résidus peut se concevoir comme le résultat d'une spécification erronée du système, du moins quand il s'agit de l'appliquer à des séries macroéconomiques annuelles. En particulier, un tel système est inadéquat, même après l'introduction du facteur de retard décrit à l'équation (7), pour présenter les adaptations successives des générations d'équipement en fonction des conditions des marchés. Il permet malgré tout d'amender le système putty-putty dans ce qu'il a de plus extrême au regard des hypothèses de vitesse d'adaptation des parts des facteurs.

On considère que l'autocorrélation des résidus peut être estimée dans la forme :

$$(8) \quad \varepsilon_t = A \varepsilon_{t(-1)} + \omega_{it}$$

Où ω_{it} suit une loi normale centrée, telle que $\text{COV}(\omega_{it}, \omega_{it-1}) = 0$. Pour réduire sensiblement le nombre de paramètres à estimer nous supposons que la matrice A est diagonale ce qui impose, du fait de la contrainte d'additivité, que :

$$a_{ii} = a, \quad \forall i.$$

BERNDT et SAVIN [1975] montrent que la méthode de Zellner peut être appliquée à l'estimation d'un système d'équations singulier avec auto-corrélation des erreurs pourvu que l'estimation de la matrice des variances covariances des ω_{it} soit obtenue par la méthode des MCO appliquée à chaque équation séparément.

Cependant, une telle manière de procéder est inadéquate en présence de variables endogènes retardées dans l'ensemble des variables explicatives.⁸ Dans ce type de situation, la méthode de Cochrane-Orcutt peut être exploitée, mais après remplacement des variables endogènes retardées par des variables instrumentales (exogènes); on propose souvent d'utiliser une projection des variables endogènes retardées dans le sous-espace de variables exogènes retardées. Dans le cas que l'on étudie ici, il n'y a pas explicitement de variable endogène retardée dans le système, mais le vecteur $W d_t$ est, de manière comptable, une fonction du vecteur retardé W_{t-1} (et des prix P_t, P_{t-1}).⁹ Il paraît en conséquence approprié de remplacer le vecteur $W d_t$ par son estimation en fonction :

- des variables exogènes retardées $\text{Log } P_{t-1}$ et $\text{Log } UT_{t-1}$;
- des variables exogènes $\text{Log } P_t$.

L'estimation finalement retenue s'inspire donc directement d'une combinaison des méthodes de Zellner et de Cochrane-Orcutt :

i. estimation (par la méthode de Zellner), du système explicatif de $W d_t$:

$$(9) \quad W d_t = b + c \text{Log } P_t + d \text{Log } P_{t-1} + e \text{Log } UT_{t-1}$$

ii. estimation (par la méthode de Zellner) du système :

$$(10) \quad W_t = \lambda \widehat{W d}_t + \beta \text{Log } P_t + \delta \text{Log } UT_t + \alpha$$

où $\widehat{W d}_t$ est le résultat d'estimation obtenue à l'étape *i*.

Calcul des résidus correspondants ε_t .

iii. estimation de l'équation $\varepsilon_t = a \varepsilon_{t-1} + \omega_t$ par la méthode de Zellner (a étant un scalaire);

iv. transformation des variables du système (10) par l'opérateur $1 - aL$, et estimation du nouveau système (11) :

$$(11) \quad (1 - aL) W_t = (1 - aL) (\lambda \widehat{W d}_t + \beta \text{Log } P_t + \delta \text{Log } UT_t + \alpha)$$

7. Par abus de notation nous avons intégré le terme $(1 - \lambda)$ dans les paramètres α, β_j et δ .

8. Voir par exemple FULLER [1978].

9. En effet $W d_{it}$ s'écrit encore : $W d_{it} = \frac{W_{i(t-1)} P_{it} / P_{i(t-1)}}{\sum_i W_{i(t-1)} \times P_{it} / P_{i(t-1)}}$

2.4. Résultats des estimations

Le tableau 1 ci-dessous présente les résultats des estimations des parts relatives (7) pour cinq branches de l'économie française :

- Branche 2 : industries agro-alimentaires (U02).
- Branche 4 : industries des biens intermédiaires (U04).
- Branche 5 : industries des biens d'équipement (U05)
- Branche 6 : industries des biens de consommation (U06)
- Branche 7 : industries du bâtiment et des travaux publics (U07).

Les données proviennent de la Comptabilité Nationale.

Dans la branche 2, le terme UT n'apparaît pas significativement. Dans les autres branches, il influence négativement la part du travail (et positivement celle des consommations intermédiaires), ce qui correspond au mécanisme du cycle de productivité.

Le terme de retard Wd intervient significativement dans toutes les branches.

L'autocorrélation des résidus est forte et significative dans tous les cas à l'exception de la branche 4.

On a constaté, par ailleurs, que l'introduction de UT améliore souvent la significativité des paramètres.

3 Analyse des effets prix : élasticité de court et de long terme

3.1. Calcul théorique¹⁰

L'élasticité de substitution entre deux facteurs de production X_i et X_j est définie par la relation :

$$(12) \quad E_{ij} = \frac{d \text{Log } X_i}{d \text{Log } P_j} \Big|_{X=Cte, P_k=Cte, \forall k \neq j}$$

soit encore :

$$(13) \quad E_{ij} = \frac{d \text{Log } W_i}{d \text{Log } P_j} + \frac{d \text{Log } P}{d \text{Log } P_j}$$

TABLEAU 1

Résultats des estimations

	Constante	Wd	Log P _K /P _M	Log P _L /P _M	Log P _E /P _M	Log UT	a
<i>Branche 2 :</i>							
Facteur K.	0,013 (4,27)	0,723 (10,7)	0,014 (2,55)	0,002 (1,73)	-	-	0,334 (2,81)
Facteur L	0,034 (3,58)	0,723 (10,7)	0,002 (1,67)	0,019 (3,26)	-	-	0,334 (2,81)
Facteur E. .	0,002 (4,60)	0,723 (10,7)	-	-	0,003 (3,25)	-	0,334 (2,81)
<i>Branche 4 :</i>							
Facteur K.	0,073 (6,26)	0,477 (5,55)	0,046 (4,88)	0,006 (2,67)	-0,013 (-2,61)	-	0,119 (0,922)
Facteur L	1,089 (6,30)	0,477 (5,55)	0,006 (2,59)	0,024 (3,40)	-0,010 (-2,47)	-0,243 (-5,94)	0,119 (0,922)
Facteur E. .	0,030 (6,16)	0,477 (5,55)	-0,013 (-2,61)	-0,010 (-2,55)	0,031 (2,45)	-	0,119 (0,922)
<i>Branche 5 :</i>							
Facteur K.	0,032 (2,64)	0,680 (5,17)	0,029 (2,92)	0,012 (3,91)	-0,003 (-2,75)	-	0,248 (2,03)
Facteur L. .	0,962 (3,83)	0,680 (5,17)	0,012 (3,78)	0,016 (1,99)	0,002 (2,96)	-0,264 (-3,73)	0,248 (2,03)
Facteur E. .	0,004 (2,91)	0,680 (5,17)	-0,003 (-2,75)	0,002 (3,06)	-0,004 (-1,51)	-	0,248 (2,03)
<i>Branche 6 :</i>							
Facteur K	0,023 (3,81)	0,737 (10,0)	0,028 (3,72)	0,004 (1,94)	-	-	0,341 (2,82)
Facteur L. .	0,351 (3,15)	0,737 (10,0)	0,004 (88)	-0,010 (-1,81)	-	-0,104 (-2,79)	0,341 (2,82)
Facteur E. .	0,004 (3,89)	0,737 (10,0)	-	-	0,008 (3,03)	-	0,341 (2,82)
<i>Branche 7 :</i>							
Facteur K.	0,025 (3,76)	0,585 (4,95)	0,024 (3,84)	0,007 (2,29)	-0,002 (-1,67)	-	0,267 (2,09)
Facteur L. .	0,915 (2,39)	0,585 (4,95)	0,007 (2,22)	0,039 (3,92)	-0,005 (-3,08)	-0,242 (-2,09)	0,267 (2,09)
Facteur E. .	0,007 (3,65)	0,585 (4,95)	-0,002 (-1,67)	-0,005 (-3,18)	0,007 (2,45)	-	0,267 (2,09)

Lorsque le prix de l'output s'exprime sous la forme translog (1), cette expression devient :

$$(14) \quad E_{ij} = \frac{\beta_{ij} + W_i W_j}{W_i}, \quad i \neq j$$

et

$$(14') \quad E_{ii} = \frac{\beta_{ii} + W_i(W_i - 1)}{W_i}$$

10. Les calculs sont détaillés en annexe.

Cependant, ce résultat n'est pas entièrement compatible avec le système de prix fourni par la Comptabilité Nationale.

La forme translog (1) constitue en effet un indice de prix de l'output de type Divisia¹¹ alors que les comptables nationaux utilisent des indices de type Paasche.

Ainsi, le prix de l'output devrait s'écrire :

$$P = \frac{1}{\text{PROA}} \times \frac{\sum P_i X_i}{\sum X_i}$$

Soit :

$$(15) \quad P = \frac{1}{\text{PROA}} \times \frac{1}{\sum (W_i/P_i)}$$

Dans ce cas, l'élasticité de substitution E_{ij} s'exprime sous la forme :

$$(16) \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{W_i} + P \cdot \text{PROA} \left[\frac{W_j}{P_j} - \sum_i \frac{\beta_{ij}}{P_i} \right], \\ i \neq j \end{array} \right.$$

et

$$E_{ii} = \frac{\beta_{ii}}{W_i} + P \cdot \text{PROA} \left[\frac{W_i}{P_i} - \sum_k \frac{\beta_{ki}}{P_k} \right] - 1$$

Au point $P_i = 1, \forall_i$, les relations (14) et (16) coïncident. En tout autre point l'utilisation de la formule (14) introduit un biais δ_{ij} dont la valeur est :

$$(17) \quad \delta_{ij} = P \cdot \text{PROA} \left[\frac{W_i}{P_j} - \sum_i \frac{\beta_{ij}}{P_i} \right] - W_j$$

On constate que cette expression est homogène de degré 0 dans les prix. L'introduction du terme de retard $W d_i$ dans les équations des parts relatives des facteurs complique encore l'expression de E_{ij} .

On a en effet dans ce cas :

$$(18) \quad E_{ij} = -\lambda \frac{W d_i W d_j}{W_i} + \frac{\beta_{ij}}{W_i} + \text{PROA} \cdot P \times \left[\frac{W_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} + \lambda W d_j \left(\sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \frac{1}{P_j} \right) \right], \quad i \neq j$$

$$(18') \quad E_{ii} = \lambda \frac{W d_i (1 - W d_i)}{W_i} + \frac{\beta_{ii}}{W_i} + \text{PROA} \cdot P \times \left[\frac{W_i}{P_i} - \sum_k \frac{\beta_{ki}}{P_k} + \lambda W d_i \left(\sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \frac{1}{P_i} \right) \right] - 1 \quad 12$$

La formule (16) appliquée à l'expression de long terme des parts relatives donne l'élasticité de long terme.

La formule (18) appliquée à l'expression de court terme des parts relatives (7) donne l'élasticité de court terme.

3.2. Résultats et commentaires

L'introduction du terme de retard, Wd , nous a permis de calculer des élasticités de court et de long terme.

Ce calcul a été effectué sur la base des données historiques mais cette manière de procéder peut être considérée comme relativement neutre sur la valeur des élasticités compte tenu de la qualité de l'ajustement réalisé.¹³

*La valeur des coefficients de retard*¹⁴ ne dépasse pas 0,74 ce qui signifie d'après ce que nous avons dit plus haut que l'hypothèse putty-clay dans son acception la plus restrictive¹⁵ doit être rejetée.

On peut interpréter la variabilité des coefficients de retard comme une plus ou moins grande facilité d'adaptation des différentes branches aux conditions du marché.

Il apparaît ainsi que les IAA et les industries des biens de consommation sont les plus rigides alors que les industries des biens intermédiaires semblent relativement flexibles.

Dans ce dernier cas on peut supposer que ce résultat est expliqué en grande partie par des effets structurels qui sont devenus importants après 1975 mais dont l'impact sur les quantités de facteurs pèse néanmoins lourdement sur la valeur des paramètres à estimer.¹⁶

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus pour chacune des branches étudiées.

Nous présentons successivement les élasticités propres en 1970 (tableau 2) et, avec plus de détails, les élasticités croisées de long terme pour deux années : 1970 et 1982¹⁷ (tableau 4).

Auparavant, on peut remarquer que les élasticités de court terme, non présentées ici, sont en général voisines de $(1-\lambda)$ fois les élasticités de long terme (λ étant le coefficient de retard).

11. Cf. FUSS [1977], DIEWERT [1976], J. G. DEVEZEAUX [1986].

12. On peut remarquer que l'introduction du terme Wd_i pose problème car on ne sait pas intégrer les équations des parts relatives.

13. Les parts optimales de long terme peuvent différer cependant plus nettement des séries historiques : le calcul des élasticités de long terme en sera parfois affecté (cf. note du tableau 2).

14. Ce sont les coefficients associés à Wd .

15. En supposant que les substitutions entre facteurs ne peuvent intervenir que sur la dernière génération de capital et que le déclasserement est rigide.

16. Cette période a été également marquée par de fortes variations de prix.

17. Certains commentaires qui suivront font référence à des années non présentées en tableau 4 : nous précisons alors toujours les valeurs en cause.

Élasticités propres

On constate dans le tableau 2 que les élasticités propres ont en général le signe négatif attendu malgré l'absence des contraintes de concavité.

TABLEAU 2

Élasticités propres en 1970

Branche	2		4		5		6		7	
	CT	LT	CT	LT	CT	LT	CT	LT	CT	LT
Capital	-0,09	-0,20	-0,15	-0,29	-0,05	-0,14	-0,01	-0,01	-0,11	-0,19
Travail	-0,12	-0,46	-0,29	-0,56	-0,15	-0,50	-0,21	-0,82	-0,14	-0,35
Énergie	-0,06	-0,02*	-0,04	-0,04	-0,64	-1,80	+0,10	+0,47	-0,15	-0,24
Matériaux	-0,02	-0,08	-0,13	-0,25	-0,03	-0,10	-0,06	-0,21	-0,08	-0,18

* Calculée sur la base des séries historiques, on a pour cette année une élasticité-prix de long terme inférieure à l'élasticité de court terme suite à la forte fluctuation sur W_E en 1969 (ce cas est exceptionnel).

L'élasticité énergie dans la branche des biens de consommation fait cependant exception mais son évolution dans le temps est malgré tout cohérente puisqu'elle augmente régulièrement jusqu'en 1973 pour décliner ensuite jusqu'à devenir négative dès 1980.

C'est pour l'énergie que l'élasticité-prix propre présente la plus forte dispersion : elle varie à long terme de $-0,02$ à $-1,80$ (cette dernière valeur étant peu fiable du fait de la faible significativité de β_{EE} dans la branche 5). Il reste que l'effet de l'augmentation du prix de l'énergie a provoqué des réactions fort diverses suivant les branches, la moyenne des effets s'établissant aux environs de $-0,3$ pour l'élasticité de long terme.

On constate aussi une certaine dispersion des résultats pour les matériaux mais dans une fourchette cependant nettement plus étroite : $-0,02$ à $-0,33$ à long terme. Par contre les élasticités-prix du travail et du capital sont les plus stables et indiquent une sensibilité plus nette du travail (élasticité moyenne de $-0,5$ à long terme contre $-0,2$ pour le capital).

Enfin l'élasticité-prix propre du travail dans la branche des biens de consommation peut paraître relativement élevée.

Elle est à rapprocher d'un terme β_{LL} négatif, à comparer à ceux des autres branches toujours positifs (mais la différence en terme de significativité n'est pas très nette).

En règle générale, on constate que l'élasticité-prix propre du travail est assez forte, plus que celle du capital. Il faut analyser ce résultat en rappelant que la fonction de production retenue intègre plus de facteurs de production que les analyses traditionnelles, ce qui n'est pas sans conséquences sur les élasticités, y compris les élasticités-prix propres.

Élasticités croisées

L'examen des élasticités croisées montre que travail-capital et travail-énergie sont substituables dans toutes les branches, alors que capital et énergie

sont plutôt complémentaires. Enfin énergie et travail sont généralement substituables. Pour les élasticités relatives aux matériaux on renvoie au tableau 3.

TABLEAU 3

Complémentarité et substitutalité

	K-L		E-L		M-L		K-E		K-M		E-M	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Branche 2	X		X		X		X		X		X	
Branche 4	X		X		X			X	X		X	
Branche 5	X		X		X			X	X		X	
Branche 6	X		X		X		X		X			X
Branche 7	X			X	X		X		X		X	

S = Substituable.
C = Complémentaire.

Deux branches ont une élasticité capital-travail plus faible que les autres :

- les IAA;
- la branche des biens intermédiaires.

On remarque que dans les IAA cette élasticité est associée à un terme de retard élevé (0,72) et à une part relative du capital dans le coût total de production faible (de l'ordre de 7 %). Cela laisse supposer une certaine rigidité des comportements dans cette branche quant à l'adoption de nouvelles technologies. Dans la branche des biens intermédiaires où l'on observe tout le contraire, soit une part du capital élevée (16 %) et un terme de retard petit (0,48), la valeur de EKL appelle d'autres justifications.

Cette branche est en effet très hétérogène puisqu'elle comprend aussi bien la sidérurgie qui est très capitalistique que les industries du papier-carton qui le sont beaucoup moins.

L'interprétation de EKL doit donc obligatoirement passer par l'étude d'effets de structure d'autant plus importants que certains secteurs des biens intermédiaires ont été fortement restructurés ces dernières années.

Le cas de la branche 6 est intéressant car on y trouve une évolution opposée des élasticités capital-travail et capital-énergie qui sont par ailleurs toutes deux positives. On constate ainsi une baisse régulière et assez nette de EKL (0,57 en 1962 contre 0,33 en 1982) alors que EKE augmente sensiblement en fin de période (0,02 en 1974 contre 0,04 en 1982).

Le comportement des entrepreneurs, appartenant à la branche des biens de consommation, s'est donc modifié au cours du temps.

Ceux-ci sont devenus plus attentifs à l'évolution des prix énergétiques alors que leur sensibilité au prix du travail s'atténuait.

On arrive à une conclusion similaire à l'examen des élasticités énergie-travail (EEL) et travail-énergie (ELE).

EEL diminue en effet de plus de la moitié entre 1962 et 1982 alors que ELE double sur la même période.

TABLEAU 4

Élasticités croisées de long terme pour les cinq branches (1970 et 1982)

Branche	Année	EKL	ELK	EEL	ELE	EML	ELM	EKE	EEK	EKM	EMK	EEM	EME
U02.....	1970	0,32	0,11	0,20	0,01	0,10	0,34	0,01	0,07	-0,12	-0,01	-0,26	ε
	1982	0,29	0,12	0,18	0,02	0,06	0,41	0,02	0,09	-0,07	ε	0,14	ε
U04.....	1970	0,35	0,20	-0,01	ε	0,21	0,36	-0,09	-0,21	0,02	0,01	0,27	0,04
	1982	0,31	0,15	0,01	0,05	0,12	0,46	-0,14	-0,13	-0,17	-0,04	0,43	0,08
U05.....	1970	0,65	0,23	0,83	0,03	0,17	0,24	-0,07	-0,58	-0,45	-0,11	1,54	0,04
	1982	0,64	0,20	0,52	0,04	0,02	0,42	-0,10	-0,35	-0,71	-0,13	1,34	0,06
U06.....	1970	0,47	0,18	0,31	0,02	0,35	0,62	0,02	0,12	-0,45	-0,10	-0,91	-0,04
	1982	0,33	0,18	0,18	0,04	0,22	0,74	0,04	0,13	-0,50	-0,09	-0,13	-0,02
U07.....	1970	0,65	0,11	-0,07	ε	0,23	0,24	-0,04	-0,14	-0,42	-0,07	0,45	0,02
	1982	0,68	0,09	-0,03	ε	0,12	0,37	-0,08	-0,11	-0,84	-0,10	0,57	0,03

Dans toutes les autres branches, à l'exception de la branche 2, le capital et l'énergie sont complémentaires.

C'est le résultat qui est obtenu pour le secteur industriel dans son ensemble dans toutes les études dont nous avons connaissance¹⁸ y compris celles qui utilisent une fonction de production putty-clay comme celle de ARTUS et PEYROUX [1981].

Quant aux études sectorielles, peu nombreuses, elles font généralement ressortir une assez grande disparité sectorielle¹⁹ à l'exception des travaux de FAUBRY *et al.* [1985] pour lesquels capital et énergie sont complémentaires pour les trois branches industrielles (U04, U05 et U06).

Les élasticités correspondantes, EKE et EEK, sont faibles en valeur absolue dans toutes les branches, les plus fortes étant celles de la branche des biens d'équipement.

Dans cette branche, la nette complémentarité capital-énergie associée à une substitution capital-travail importante ($EKL=0,65$ en 1970) implique une substitution énergie-travail également élevée ($EEL=0,83$ à long terme en 1970).

La forte part relative du travail (35 % environ) et la faible part relative de l'énergie (2 % environ) dans le coût total de production y élargissent encore le champ des possibilités de substitution énergie-travail. On remarque cependant que ces possibilités décroissent dans le temps comme d'ailleurs les possibilités de substitution capital-travail ($EKL=0,74$ en 1962 contre 0,64 en 1982 et $EEL=0,99$ en 1970 contre 0,52 en 1982).

Le capital et les matériaux sont complémentaires dans toutes les branches.²⁰

L'évolution de l'élasticité EKM est particulièrement intéressante dans le BTP. Elle triple en effet en valeur absolue entre 1966 et 1982 ($-0,26$ à $-0,84$).

Le capital et les matériaux sont donc de plus en plus étroitement associés dans le processus de production de la branche, les industries du BTP s'orientant vraisemblablement vers des techniques de plus en plus élaborées concomitantes d'une intensité capitalistique croissante.

L'énergie et les matériaux enfin, ne sont complémentaires que dans les IAA et la branche des biens de consommations.

C'est un résultat similaire qui avait été obtenu dans l'étude de CAPROS, LADOUX, OUTREQUIN [1984].

Concernant la branche des biens intermédiaires, un tel résultat n'a pas de quoi surprendre : un niveau élevé de consommation d'énergie a amené à des transformations techniques et structurelles (cimenteries, sidérurgie) qui ont substitué des matières premières (y compris nationales) à de l'énergie

18. Il faut cependant exclure les études sur données en coupes comme celles de GRIFFIN et GREGORY [1976] et ÖZATALAY, GRUBAUGH, VEACH LONG II [1981].

19. Cf. CAPROS, LADOUX, OUTREQUIN [1984], MARCHON, VAN PETERSEN [1981], GOUSTY, LESOURD et RUIZ [1985].

20. A l'exception de la branche 4 où ils deviennent substituables en milieu de période.

importée. Pour la branche « Bâtiment, Travaux Publics », l'essor du préfabriqué explique, en partie, un résultat analogue. Par contre, l'interprétation de la substitutalité qui prévaut aussi pour la branche des biens d'équipement nécessiterait une étude plus poussée.

Conclusion

Le présent travail a montré comment il est possible de spécifier, et d'estimer par une technique originale, un système complet, simultané et dynamique de demande de facteurs où, contrairement aux autres études, l'ajustement ne porte pas sur les parts en valeur, mais sur les parts en volume des facteurs.

Dans le cas usuel, on postule en effet de façon implicite qu'une élasticité unitaire lie tous les facteurs à court terme : des parts rigides en valeur sont le propre d'une fonction de type Cobb-Douglas. On conçoit donc que spécifier des fonctions à parts rigides en valeur ne permette pas d'appréhender une dynamique nettement plus réaliste portant sur des volumes. La spécification proposée ici préfère supposer que les facteurs sont dans une combinaison rigide à court terme (complémentarité) et s'en écartent par la suite.

Outre les résultats commentés pour cinq branches de l'économie française, cette approche nous semble porteuse des conséquences suivantes :

- l'hypothèse putty-clay à déclassement fixe est apparue infirmée par les valeurs des coefficients de retard obtenus. Ainsi les modèles putty-clay doivent-ils sans doute une grande part de leur validité aux mécanismes d'ajustement dont ils disposent : déclassement endogène et cycle de productivité;²¹

- l'écriture de systèmes dynamiques semble être une voie majeure pour tester le jeu de substitution entre capital et énergie (cf. GRIFFIN [1981]). La spécification présentée postulant une certaine complémentarité à court terme, il aurait pu en résulter une substituabilité à long terme par rejet des mécanismes de substitution éventuels (même faibles) dans l'expression de l'adaptation dynamique. Il n'en est cependant rien, ce qui nous semble conforter la complémentarité entre ces facteurs;

- la nécessité de l'insertion d'un système simultané de demande de facteurs au sein d'une comptabilité, dont l'indice n'est pas l'indice exact de la fonction de production, nous a permis de mettre en évidence un « biais de simulation » affectant les élasticités dont nous avons fourni les expressions à court et long terme. DEVEZEAUX [1986] montre l'importance de ce point pour la modélisation.

Un développement de cette approche pourrait consister en l'écriture d'une fonction de court terme suivant les propositions théoriques de MCFADDEN [1978] ou STAPLETON [1981]. Une possibilité intéressante serait d'extrapoler les développements de BERNDT et HESSE [1985] de telle sorte qu'une fonction de court terme à capital fixe permette de révéler les paramètres de long terme.

21. Dans ce dernier cas la cohérence théorique avec le modèle pose cependant problème.

Calcul théorique des élasticités de substitution

On a :

$$E_{ij} = \frac{d \text{Log } W_i}{d \text{Log } P_j} + \frac{d \text{Log } P}{d \text{Log } P_j}, \quad i \neq j$$

$$E_{ii} = \frac{d \text{Log } W_i}{d \text{Log } P_i} + \frac{d \text{Log } P}{d \text{Log } P_i} - 1$$

Si le prix de l'output s'exprime sous la forme (15) :

$$\begin{aligned} d \text{Log } P &= -d \text{Log} \left(\sum_k \frac{W_k}{P_k} \right) \\ &= -\text{PROA} \cdot P \sum_k \left(\frac{d W_k}{P_k} - \frac{W_k}{P_k} \frac{d P_k}{P_k} \right) \end{aligned}$$

et comme $d P_k = 0, \forall k \neq j$

$$d \text{Log } P = \text{PROA} \cdot P \left(\frac{W_j}{P_j} \frac{d P_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} \frac{d P_j}{P_j} \right)$$

d'où :

$$\frac{d \text{Log } P}{d \text{Log } P_j} = \text{PROA} \cdot P \left(\frac{W_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} \right)$$

Soit enfin :

$$E_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{W_i} + \text{PROA} \cdot P \left(\frac{W_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} \right)$$

et :

$$E_{ii} = \frac{\beta_{ii}}{W_i} + \text{PROA} \cdot P \left(\frac{W_i}{P_i} - \sum_k \frac{\beta_{ki}}{P_k} \right) - 1$$

Si le prix de l'output s'exprime sous la forme (15) et les parts relatives sous la forme (7) :

$$\begin{aligned} d W_i &= \lambda d W d_i + \beta_{ij} \frac{d P_j}{P_j} \\ d W d_k &= d \left[\frac{P_k X_{k(-1)}}{\sum P_k X_{k(-1)}} \right] \\ &= \frac{X_{k(-1)} d P_k}{\sum P_k X_{k(-1)}} - \frac{P_k X_{k(-1)}}{\sum P_k X_{k(-1)}} \frac{\sum X_{k(-1)} d P_k}{\sum P_k X_{k(-1)}} \end{aligned}$$

et comme $dP_k=0, k \neq j$

$$dW d_j = W d_j (1 - W d_j) \frac{dP_j}{P_j} \quad \text{si } k=j$$

et

$$dW d_k = -W d_k W d_j \frac{dP_j}{P_j} \quad \text{si } k \neq j$$

d'où :

$$dW_i = \lambda W d_i (1 - W d_i) \frac{dP_i}{P_i} + \beta_{ii} \frac{dP_i}{P_i}$$

et

$$dW_i = -W d_i W d_j \frac{dP_j}{P_j} + \beta_{ij} \frac{dP_j}{P_j}, \quad i \neq j$$

or,

$$d \text{Log } P = \text{PROA. } P \left[\frac{W_j}{P_j} \frac{dP_j}{P_j} - \sum_k \frac{dW_k}{P_k} \right]$$

soit :

$$d \text{Log } P = \text{PROA. } P \left[\frac{W_j}{P_j} \frac{dP_j}{P_j} + W d_j \frac{dP_j}{P_j} \sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \lambda \frac{W d_j}{P_j} \frac{dP_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} \frac{dP_j}{P_j} \right]$$

soit :

$$\frac{d \text{Log } P}{d \text{Log } P_j} = \text{PROA. } P \left[\frac{W_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} + \lambda W d_j \left(\sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \frac{1}{P_j} \right) \right]$$

d'où :

$$E_{ij} = -\lambda \frac{W d_i W d_j}{W_i} + \frac{\beta_{ij}}{W_i} + \text{PROA. } P \left[\frac{W_j}{P_j} - \sum_k \frac{\beta_{kj}}{P_k} + W d_j \left(\sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \frac{1}{P_j} \right) \right],$$

$i \neq j$

$$E_{ii} = \lambda \frac{W d_i (1 - W d_i)}{W_i} + \frac{\beta_{ii}}{W_i}$$

$$+ \text{PROA. } P \left[\frac{W_i}{P_i} - \sum_k \frac{\beta_{ki}}{P_k} + \lambda W d_i \left(\sum_k \frac{W d_k}{P_k} - \frac{1}{P_i} \right) \right] - 1$$

● Références bibliographiques

- ARTUS, P. et PEYROUX, C. (1981). — « Fonctions de production avec facteur énergie : estimation pour les grands pays de l'OCDE », *Annales de l'INSEE*, n° 44.
- BERTHELEMY, J. C. et DEVEZEUX DE LAVERGNE, J. G. (1985). — « Le modèle MELODIE : un modèle énergétique de long terme pour l'économie française », *Mimeo*, CEA, Département des Programmes.
- BERNDT, E. et HESSE, M. (1985). — « Energy Prices Increases, Capacity Utilisation and Productivity Growth in the Manufacturing Sectors of OECD Countries », BAIER, M., éd., IAEE, GEE, *Report of the IAEE Conference*.
- BERNDT, E., MORRISON, C. et WATKINS, G. (1981). — « Dynamic Models of Energy Demand: An Assessment and Comparison », BERNDT et FIELD éd., *Modeling and Measuring Natural Resource Substitution*, p. 260-289, MIT Press, Cambridge MA.
- BERNDT, E. et SAVIN, E. (1975). — « Estimation and Hypothesis Testing in Singular Equation Systems with Autoregressive Disturbances », *Econometrica*, 43, n° 5-6.
- BERNDT, E. et WOOD, D. (1975). — « Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy », *Review of Economics and Statistics*, 57, n° 3.
- BERNDT, E. et WOOD, D. (1985). — *Energy Price Shocks and Productivity Growth in US Manufacturing*, MIT Press, Cambridge MA.
- BERTHELEMY, J. C., DEVEZEUX DE LAVERGNE, J. G. et LADOUX, N. (1986). — « MELODIE : modèle d'interaction énergie-économie pour la planification dans le long terme », *Conférence Mondiale de l'Énergie*, Cannes, octobre 1986.
- CAPROS, P., LADOUX, N. et OUTREQUIN, Ph. (1984). — « Prix de l'énergie et comportement des industriels », *Économie et Société*, Cahiers de l'ISMEA, série EN n° 1.
- CHRISTENSEN, L., JORGENSEN, D. W. et LAU, L. (1973). — « Transcendental Logarithmic Production Frontiers », *Review of Economics and Statistics*, 55, n° 1.
- DEVEZEUX DE LAVERGNE, J. G. (1986). — « Consommation d'énergie et croissance économique : un essai d'analyse économique et économétrique », *Thèse d'État*, Paris-I, UER 06.
- DIEWERT, E. (1971). — « An Application of the Shephard Duality Theorem, a Generalized Leontief Production Function », *Journal of Political Economy*, 69, n° 3.
- DIEWERT, E. (1976). — « Exact and Superlative Index Numbers », *Journal of Econometrics*, n° 4.
- FAUBRY, E., MONCOMBLE, J. E., VIDAL DE LA BLACHE, O. et ZAGAME, P. (1984). — « Le modèle Hermes-France », *Économie et Prévision*, n° 66, p. 3-29.
- FULLER (1978). — *Introduction to Time Series*, New York, Wiley and Sons.
- FUSS, M. (1977). — « The Demand for Energy in Canadian Manufacturing, and Example of the Estimation of Production Structures with Many Inputs », *Journal of Econometrics*, n° 5.
- FUSS, M. et MCFADDEN, D. (1978). — *Production Economics*, Amsterdam, North-Holland.
- GOUSTY, LESOURD et RUIZ (1985). — « Progrès technologique et substitutions entre énergie et autres facteurs de production. Application à deux cas de branches : les biens d'équipement et le bâtiment », FERICELLI et LESOURD éd., *Énergie : Modélisation et économétrie*, Economica.

- GRIFFIN, J. (1981). — « The Energy-Capital Complementarity Controversy: A Progress Report on Reconciliation Attempts », BERNDT et FIELD éd., *Modeling and Measuring Natural Resources Substitution*, MIT Press, p. 70-80.
- GRIFFIN, J. et GREGORY, P. (1976). — « An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses », *American Economic Review*, 66, n° 5, décembre 1976.
- HALVORSEN, R. et FORD, J. (1977). — « Substitution Among Energy, Capital and Labor Inputs in US Manufacturing », PINDYCK, R. S. éd., *Advances in the Economics of Energy and Resources*, 1, Greenwich, Conn.
- HOTELLING, H. (1932). — « Edgeworth's Taxation Paradox and the Nature of Demand and Supply Functions », *Journal of Political Economy*, n° 40.
- HUDSON, E. et JORGENSEN, D. (1977). — « The Long Term Interindustrial Model: a Simulation Model for Energy and Economic Analysis », Final Report to Applied Economic Division, Federal preparedness agency, general services administration, Data resources incorporated (DRI) 1750 Cambridge street, Cambridge, Massachusetts, 02138.
- JORGENSEN, D. W. et FRAUMENI, B. (1981). — « Relative Prices and Technical Change », BERNDT, E. R. et FIELD, B. C. éd., *Modeling and Measuring Natural Resource Substitution*, MIT Press, Cambridge MA.
- KARADELOGLOU, P. (1985). — « Détermination simultanée des prix et des volumes dans le processus productif : une étude empirique », *Annales de l'INSEE*, n° 58, 1985.
- LUCAS (1967). — « Adjustment Costs and the Theory of Supply », *Journal of Political Economics*, n° 75, p. 321-334.
- McFADDEN, D. (1978). — « Cost, Reserves and Profit Functions », FUSS et MACFADDEN éd., *Production Economics*, 1, Amsterdam.
- MARCHON, M. et VAN PETERSEN, A. (1981). — « Impact de la substitution entre facteurs causée par le changement du prix relatif de l'énergie », *Rapport de Recherche*, n° 81-82, École des Hautes Études Commerciales (HEC).
- NERLOVE, M. (1963). — « Returns to Scale in Electric Supply », CHRIST, C. éd., *Measurement in Economics: Studies in Mathematical Economics and Econometrics in Memory of Y. Greenfeld*, Stanford University Press.
- ÖZATALAY, GRUBAUGH et VEACH LONG II (1979). — « Energy Substitution and National Energy Policy », *American Economic Review*, 69, n° 2.
- POUCHAIN, M. (1980). — « Estimations de demande de facteurs en terme d'ajustements croisés », *Annales de l'INSEE*, n° 38-39, p. 259-285.
- ROY, R. (1942). — *De l'utilité*, Hermann, Paris.
- SHEPHARD, R. W. (1953). — *Cost and Production Functions*, Princeton University Press, Princeton.
- SICKLES, R. (1983). — *A Non Linear Multivariate Error Component Analysis of Technology and Specific Factor Productivity Growth with an Application to the U.S. Airlines*, University of Pennsylvania/NBER, février 1983.
- STAPLETON, D. (1981). — « Inferring Long-Term Substitution Possibilities from Cross-Section and Time-Series Data », BERNDT et FIELD éd., *Modeling and Measuring Natural Resources Substitution*, p. 93-118, MIT Press, Cambridge MA.