AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

**Analyse économétrique
du secteur forestier :
un bilan de l'expérience américaine**

J. BUONGIORNO

Depuis son début modeste au milieu des années cinquante, l'approche quantitative appliquée à l'analyse du secteur forestier a pris de plus en plus d'importance aux Etats-Unis. Cet accroissement remarquable est dû en partie à l'initiative des chercheurs, mais aussi aux institutions et au cadre législatif établi par le Congrès pour les forêts dans la deuxième moitié des années soixante-dix (*National Forest Management Act* de 1976 et *Resources Planning Act* de 1978).

L'objet de cet article est de retracer le développement des modèles économétriques du secteur forestier aux Etats-Unis, de leur début jusqu'à nos jours. Il présente les auteurs, leurs méthodes et les raisons qui ont conduit au choix de problèmes spécifiques et de structures particulières ⁽¹⁾. Les modèles qui n'utilisent pas, au moins pour une part, des techniques statistiques dans l'estimation des paramètres, ont été exclus. En particulier, il ne sera rien dit des systèmes entrées-sorties, ni du vaste domaine des modèles économiques de planification forestière.

Malgré cette restriction, l'article n'est pas une revue exhaustive de tous les travaux réalisés en économétrie appliquée au secteur forestier. Un choix, inévitablement arbitraire, a été fait des travaux qui semblaient révélateurs de certaines tendances à une époque donnée. L'article se conclut par une réflexion sur les orientations vers lesquelles devrait se diriger la recherche future afin de produire, avec l'outil économétrique, des modèles toujours plus utiles aux responsables du secteur forestier.

LES PRÉCURSEURS

Bien que l'étude des échanges et des prix ait toujours été un élément central de l'économie forestière aux Etats-Unis, l'utilisation des méthodes statistiques et économétriques rigoureuses dans ce domaine est relativement récente. L'un des premiers travaux est dû à Gregory (1960) qui développa un modèle économétrique du marché des parquets. Le modèle était récuratif et basé sur des données mensuelles. Des équations linéaires étaient spécifiées pour la demande, l'offre, et le prix des parquets. Les équations étaient estimées par la méthode des moindres carrés. L'équation des prix, à la différence de nombreux travaux qui ont suivi, ne résultait pas de la solution du système offre-demande, mais était spécifiée séparément. Le prix un mois donné était fonction, entre autres variables, du prix du mois précédent (ce qui prouve bien que les spécifications dynamiques n'ont rien de nouveau). Gregory révisa son modèle en 1965, réalisant ainsi l'une des premières analyses de changement de structure dans le marché des bois.

Le travail de Gregory, publié dans *Forest Science*, suscita un intérêt considérable, car il démontrait que les méthodes économétriques modernes appliquées au secteur forestier pouvaient livrer des résultats intéressants et utiles. Ceci avait déjà été perçu par Pringle, forestier biométricien devenu

⁽¹⁾ Le travail conduisant à cet article a été financé en partie par l'Université du Wisconsin, *School of Natural Resources* et par le projet McIntire-Stennis n° 2855.

économiste, qui écrivit en 1954 une thèse, à l'université de Syracuse, sur l'estimation économétrique de la demande du papier journal aux Etats-Unis (toutes les régressions furent exécutées sur une calculatrice électrique !).

PREMIÈRE GÉNÉRATION

Bien que la thèse de Pringle n'ait malheureusement jamais été publiée, elle influença certainement McKillop, ancien élève de Pringle, qui soutint quelques années plus tard, à Berkeley, une thèse d'où sortit l'un des ouvrages les plus souvent cités dans l'analyse économétrique du secteur forestier (McKillop, 1967). McKillop se servit, comme Pringle, de données annuelles. Mais au lieu de se concentrer sur un produit, il décida, peut-être inspiré par les modèles macroéconomiques géants de l'époque, de modéliser l'ensemble de la filière bois : offre, demande et prix des grumes, des sciages, des papiers et cartons et des contreplaqués. McKillop se servit d'un système d'équations simultanées d'offre et de demande, estimées par la méthode des moindres carrés à deux étapes. Il obtenait ainsi des estimateurs biaisés, mais au moins convergents. Une fois le modèle estimé, McKillop produisait des prévisions de prix et de quantités, soit en résolvant les équations structurelles, soit en estimant les formes réduites (variables endogènes en fonction des variables exogènes).

Parmi les études de cette génération, on peut aussi noter celles que Simpson et Halter (1963) effectuèrent à Corvallis (Orégon), concernant le contreplaqué de sapin de Douglas, produit majeur de leur région. Leur travail ressemble à celui de Gregory. Comme lui, ils s'intéressèrent aux évolutions à court terme, utilisant des données trimestrielles. Une équation de prix, analogue à celle de Gregory, était formulée séparément de celles d'offre et de demande, et les prévisions de prix, production et commandes étaient obtenues à partir de formes réduites.

Après sa thèse, McKillop réalisa une étude du marché des sciages de séquoia en Californie du Nord (McKillop, 1969). Comme Simpson, Halter, et Gregory, il essaya de modéliser la structure du marché pour obtenir des prévisions à court terme. S'inspirant de Gregory, et peut-être marqué par son expérience de thèse avec des équations simultanées, il opta pour un système de six équations récursives, permettant une estimation par les moindres carrés ordinaires. Les prévisions qu'il obtenait à partir des formes réduites étaient aussi bonnes (mauvaises) que celles données par la solution des formes structurelles.

L'incertitude quant à la meilleure approche pour la prévision se manifeste par le fait qu'à la même époque, Teeguarden et McKillop (1969), en préparant des prévisions à long terme du prix sur pied du pin Ponderosa en Californie, se servaient d'une seule équation, forme réduite expliquant le prix en fonction de variables exogènes. Toutes les variables explicatives se référaient au côté demande, et le modèle se révélait très bon pour expliquer les fluctuations de prix.

DEUXIÈME GÉNÉRATION

Alors que McKillop (1967) avait estimé des équations d'offre et de demande pour un grand nombre de produits, F. G. Adams et Blackwell (1973) décidèrent de modéliser l'industrie des sciages résineux à diverses étapes de la production, détaillant les relations entre produits finis et consommations intermédiaires. Leur modèle est intéressant pour la relation formelle qu'il introduisait entre le secteur des sciages et le reste de l'économie, représentée par un modèle économétrique commercial (*Wharton Econometric Forecasting Associates Annual and Industry Model*). De cette manière, ils étaient capables de calculer des prévisions pour le secteur en accord avec les changements macro-économiques prévus par le groupe Wharton.

Darius Adams, un élève de McKillop, développa pour sa thèse de doctorat un modèle économétrique trimestriel des marchés du bois dans la région du sapin de Douglas, forêts appartenant en partie au gouvernement fédéral. Son but était de prévoir quels seraient les effets des changements du volume offert dans les forêts fédérales sur le prix du bois dans la région (Adams, 1974). Ses simulations suggéraient qu'une politique de stabilisation des prix par le contrôle du volume offert avait peu de chance de succès.

Malheureusement, Robinson (1974) publia, presque simultanément, des résultats diamétralement opposés. A partir d'un modèle à huit équations représentant les marchés des sciages dans la région du sapin de Douglas, et dans le Sud, il concluait que les élasticités de la demande et de l'offre pour le sapin de Douglas sur pied étaient très faibles. Donc, si la demande demeurerait stable, une augmentation substantielle de l'offre venant des forêts fédérales entraînerait une diminution considérable des prix.

LES DIX DERNIÈRES ANNÉES

Travaux de synthèse

Les publications des dix dernières années peuvent se diviser en deux catégories : travaux d'analyse et de synthèse. Une grande partie de la recherche aux Etats-Unis a eu pour but de produire des outils pour l'examen des politiques forestières. La source principale de crédits a été le Service forestier (*USDA Forest Service*). Il n'est donc pas surprenant que les travaux de synthèse aient fait l'objet d'une attention particulière. Les mieux connus, ceux qui ont conduit à des modèles couvrant l'ensemble du secteur forestier, ont été le résultat de décisions du Congrès américain, concrétisées par la loi sur la planification des ressources renouvelables (*Resources Planning Act*, ou RPA) de 1978. Le RPA exige que le Service Forestier revoie périodiquement (tous les dix ans, avec mise à jour tous les cinq ans) la situation forestière du pays, et qu'il prévoie sur 30 ans l'évolution de l'offre, de la demande et des prix de toutes les ressources forestières.

Le premier rapport pour le RPA (*USDA Forest Service*, 1982) donnait effectivement non seulement des prévisions de production et de consommation, mais aussi pour la première fois des prévisions de prix cohérents avec ces quantités. Ces prévisions étaient obtenues avec le modèle d'évaluation du marché du bois (*Timber Assessment Market Model*, ou *Tamm*) mis au point par Adams et Haynes (1980). Ce premier modèle *Tamm* considérait en détail les secteurs des sciages et des contreplaqués de bois résineux. Les Etats-Unis et le Canada étaient divisés en onze régions d'offre et neuf régions de demande, afin d'avoir des résultats, en particulier des prix, utilisables dans la planification de la production forestière de chaque région. Une planification des forêts fédérales basée sur des principes économiques est en fait requise par la loi sur l'aménagement des forêts nationales (*National Forest Management Act*, ou *NFMA*) de 1976.

Le premier modèle *Tamm* comprenait essentiellement des équations d'offre et de demande des divers produits forestiers dans chaque région. Les équations comportaient des variables reliant les divers stades du marché. Par exemple, l'offre de bois sur pied dans une région était fonction du prix, mais aussi des stocks forestiers disponibles dans la région. L'évolution des stocks était prévue à partir du modèle *Tras* de Larson et Goforth (1970). L'équilibre entre quantités offertes et demandées dans les diverses régions donnait les prix, compte tenu des coûts de transport entre régions. L'équilibre était calculé chaque année par l'algorithme de "programmation réactive" de King et Ho (1972), développé à l'Université de Caroline du Nord. Haynes s'était déjà servi de cet algorithme dans sa thèse de doctorat pour modéliser l'industrie des sciages (Haynes, 1977). Le modèle *Tamm* a subi plusieurs modifications en vue du dernier plan du RPA (*USDA Forest Service*, 1989). En particulier, la filière des bois feuillus fait maintenant partie du modèle, ainsi que la demande pour les bois de pâte (Adams et Haynes, 1986).

Toutefois, la plus grande partie de l'analyse du secteur pâtes et papiers en vue du RPA a été faite à partir du modèle *Papyrus* (Gilles et Buongiorno, 1987). Le modèle *Papyrus* utilise la même partition régionale que *Tamm*. Quatorze produits, allant des bois de pâte jusqu'aux papiers et cartons, en passant par les pâtes et les papiers recyclés, figuraient dans le modèle initial. Les versions courantes sont encore plus détaillées.

Le but du modèle était de donner des prévisions à long terme de la production, de la consommation, des importations, des exportations et des prix dans chaque région. Le modèle consiste en équations économétriques pour la demande des produits finis et pour l'offre de bois. Les étapes intermédiaires de transformation et de transport sont représentées par des coefficients entrée-sortie permettant une description détaillée des techniques de transformation. La structure mathématique du modèle est résumée dans l'annexe 1.

Papyrus est donc un modèle hybride, technico-économétrique. La synthèse entre les activités d'offre, de demande et de transport est réalisée par un programme non-linéaire (Samuelson, 1952). La fonction d'objectif est l'intégrale du surplus des producteurs et des consommateurs diminuée du coût des transports. Les contraintes définissent l'égalité offre-demande

pour chaque région et les capacités de production. Les solutions primales et duales donnent l'équilibre à court terme (typiquement dans l'intervalle d'un an) des prix et des quantités échangées. Le changement de capacité d'une année à l'autre est fonction de la production passée et du prix fictif de la capacité, obtenu dans la solution de l'équilibre à court terme. Ce système de programmation récursive (Day, 1973) combine l'optimisation à court terme de la théorie des marchés avec celle de la prévision imparfaite des décideurs. Le modèle *Papyrus*, et le logiciel *Pelps* qu'il utilise (Calmels *et al.*, 1989) ont été appliqués récemment à plusieurs études du secteur pâtes et papiers aux Etats-Unis, en particulier pour prévoir les effets de changements dans les techniques de production (Ince *et al.*, 1987). La représentation détaillée des activités productrices se prête bien à de telles études.

Bien que les modèles *Tamm* et *Papyrus* soient parmi les plus utilisés aux Etats-Unis dans le secteur public, plusieurs autres ont été développés durant les dix dernières années. On peut les classer en trois catégories, suivant leur couverture géographique : modèles régionaux, nationaux et internationaux. Parmi les premiers, on note le modèle de Berk (1979), remarquable par sa contribution théorique à l'explication de l'offre à long terme des bois sur pied. Ceux de Brooks (1985) et de Newman (1987) résultaient d'un désir de raffiner l'analyse du RPA pour le Sud des Etats-Unis, région qui a acquis durant les vingt dernières années une importance primordiale dans l'économie forestière américaine. Le modèle de Newman est particulièrement intéressant parce qu'il quantifiait pour la première fois, par des techniques économétriques (moindres carrés à trois étapes), les relations de complémentarité et de substitution entre grumes de sciages et bois de pâte. Le côté offre de cette relation fut analysé avec plus de détails par Greber et Wisdom (1985) à l'aide des méthodes de programmation quadratique, toujours avec des données provenant du Sud des Etats-Unis. Leur modèle permettait de prévoir en particulier l'effet d'une augmentation des prix du bois de feu sur les marchés des bois industriels.

Parmi les modèles nationaux, on peut noter celui de Luppold (1984) pour les sciages de bois feuillus, qui comprenait trois équations relativement simples expliquant l'offre et la demande totale des Etats-Unis. En contraste, le modèle de Kaltenberg et Buongiorno (1986) essayait d'expliquer les taux de croissance des industries des papiers et cartons dans huit régions. Les résultats suggéraient que la croissance rapide des industries papetières dans le Sud et dans l'Ouest avait été causée surtout par la rapide croissance économique et démographique de ces régions, le côté offre (coûts) ayant joué un moindre rôle.

L'un des projets les plus ambitieux des dernières années a été le développement, à l'Institut pour l'Application de l'Analyse des Systèmes, à Vienne, d'un modèle global du commerce des produits forestiers (*Global Trade Model*, ou *Gtm*, voir Kallio *et al.*, 1987). Bien qu'il s'agisse là d'un travail vraiment international, le projet a certainement été influencé par l'expérience américaine. En particulier, la structure mathématique et la méthode de solution du *Gtm* ressemblent fortement à celles de *Papyrus*, en raison de la participation de l'auteur et de Gilless au projet *Gtm* au

moment du choix de la méthodologie, et aussi en raison de l'expertise de Markku Kallio et Dennis Dykstra en matière d'optimisation.

Parmi les autres modèles de synthèse à caractère international, on peut noter celui d'Adams (1985), qui appliquait essentiellement la méthode du *Tamm* au commerce des grumes et sciages entre l'Afrique et l'Europe. Cette étude fut reprise par Schirmer et Buongiorno (1985) et étendue à la région Asie-Pacifique. Leur méthode consistait en un modèle où l'offre des sciages dépendait du prix des grumes, avec un délai. Cette hypothèse permettait de séparer l'équilibre global en deux phases : l'équilibre dans le secteur sciage déterminait le prix des sciages et la demande de grumes ; l'équilibre dans le secteur grumes déterminait le prix et l'offre de grumes, sujet à la demande de grumes dans divers pays. Cette décomposition et un algorithme de programmation quadratique garantissaient la convergence. Des méthodes semblables étaient utilisées par Boyd et Krutilla (1987) pour prévoir l'effet de restrictions proposées par les Etats-Unis sur les importations de sciages résineux en provenance du Canada.

En plus des modèles décrits plus haut, tous développés avec des crédits publics, quelques modèles ont aussi été produits par des firmes privées. L'un des plus connus est celui de *Resource Information Systems Incorporated* (RISI), successeurs de *Data Resources Incorporated* (DRI). Depuis longtemps, DRI et RISI ont publié des prévisions à court et moyen terme des marchés du bois, basées sur le modèle économétrique *Forsim* (voir Veltkamp *et al.*, 1983). Les prévisions sont faites chaque trimestre. Ce ne sont pas toujours des prévisions économétriques pures, l'opinion d'experts étant parfois utilisée pour modifier les prévisions du modèle. La disponibilité de prévisions suivies sur de longues périodes a permis de comparer la précision des prévisions de prix produites par *Forsim* avec celles des marchés à terme de Chicago. Les prix des marchés à terme produisent en effet des prévisions non biaisées des prix courants. Les résultats ne donnaient pas un avantage évident à la méthode économétrique. En fonction du produit et de la longueur des prévisions, *Forsim* était quelquefois plus précis que les marchés à terme, mais il l'était parfois moins, et il n'y avait souvent aucune différence significative entre les erreurs des deux méthodes (Buongiorno *et al.*, 1984).

Travaux d'analyse

La construction des modèles de synthèse décrits plus haut a demandé de nombreuses analyses, afin de déterminer la forme des équations et la valeur des paramètres. En fait, bien des faiblesses des modèles de synthèse sont dues à une connaissance très superficielle des lois économiques fondamentales. Par exemple, les élasticités de la demande des produits forestiers par rapport aux prix sont mal connues. Le tableau 1 montre que, suivant l'étude, l'élasticité par rapport au propre prix du produit varie de 0,0 à 0,91 pour les sciages, et de 0,48 à 0,95 pour le contreplaqué. Les différences proviennent en partie des données utilisées, en partie des théories proposées et en partie des méthodes d'estimation.

Concernant les données, on s'est souvent servi de séries chronologiques, le plus souvent annuelles. Or, du point de vue statistique, il n'y a rien de pire que de telles données. En général, elles varient très peu, et elles ont souvent les mêmes tendances, si bien qu'elles sont corrélées même s'il n'y a aucun lien de causalité entre elles. En plus, la multicollinéarité évidente dans les variables explicatives de ces modèles conduit à des paramètres instables à grands écarts-types. Pour pallier ces inconvénients, des séries chronologiques provenant de divers pays ou régions ont été utilisées avec quelque succès pour mesurer l'élasticité de la demande de produits forestiers (voir Buongiorno, 1978 ; Laarman, 1984 ; Baudin et Lundberg, 1987). L'idée principale de cette approche est d'utiliser la variation entre pays, en plus de la variation chronologique au sein d'un pays, pour arriver à des élasticités non seulement plus précises, mais aussi plus générales, puisque si l'estimation est bien menée, le modèle développé devrait s'appliquer à tous les pays considérés. La variabilité des données peut être accrue en se servant de données mensuelles. Chou et Buongiorno (1983) donnent un exemple de cette approche, pour mesurer l'élasticité de substitution entre les importations américaines de contreplaqué de diverses origines.

Tableau 1. Valeurs estimées des élasticités de la demande pour les sciages et contreplaqués de bois résineux, et des élasticités par rapport au prix d'autres produits

Produit		Références
Sciages	Contreplaqués	
A) Elasticité par rapport au propre prix		
0,0		Adams et Blackwell (1973)
-0,08		Mills et Manthy (1974)
-0,87**		Robinson (1974)
-0,08*	-0,48**	Adams (1977)
-0,17	-0,67**	McKillop <i>et al.</i> (1980)
-0,36 (a)	-0,51** (a)	Adams et Haynes (1980)
-0,91**	-0,95**	Rockel et Buongiorno (1982)
B) Elasticité par rapport au prix d'autres produits		
0,53** Contreplaqués		Mills et Manthy (1974)
0,28 Carton construction		<i>id.</i>
0,14 Contreplaqués	0,06 Carton construction	McKillop <i>et al.</i> (1980)
0,37 Acier		<i>id.</i>
0,02 Aluminium		<i>id.</i>
0,05** Contreplaqués	0,09** Sciages	Rockel et Buongiorno (1982)
0,05* Autres panneaux	0,05* Autres panneaux	<i>id.</i>
0,12** Autres matériaux	0,12** Autres matériaux	<i>id.</i>

* Coefficient différent de zéro au seuil de confiance de 0,05.

** Coefficient différent de zéro au seuil de confiance de 0,01.

(a) Moyenne des élasticités dans six régions.

Parce qu'elles sont nombreuses, les données mensuelles se prêtent à d'autres modes d'analyse que l'économétrie classique. En particulier, les méthodes de test de causalité peuvent être employées pour obtenir des mesures de rétroaction, et des multiplicateurs, entre certaines variables du secteur forestier. Par exemple, les résultats de ces méthodes ont suggéré que les variations du volume offert dans les forêts fédérales du Nord-Ouest n'ont pas influencé le prix des arbres sur pied (Buongiorno *et al.*, 1985). Des méthodes similaires ont aussi permis de mesurer la part des variations du taux de change et de la hausse des prix aux États-Unis sur l'augmentation des importations de sciages venus du Canada (Buongiorno *et al.*, 1988).

A part une amélioration des données, et des techniques statistiques, les travaux d'analyse de ces dix dernières années se distinguent par une amélioration des fondements théoriques des modèles. En particulier, les études de production se servent presque exclusivement de formes flexibles, telles que les translogarithmiques. Ces formes, couplées à la théorie de la dualité entre coûts et production, ont permis de mesurer les élasticités de substitution, les biais des changements techniques, et les fonctions de demande pour les intrants. Les études de ce genre incluent, aux États-Unis, celles de Stier (1980), de De Borger et Buongiorno (1985) résumée dans l'annexe 2, de Merrifield et Singleton (1986) et d'Abt (1987); et au Canada, celles de Nautiyal et ses collaborateurs à l'Université de Toronto (voir par exemple Nautiyal et Singh, 1986).

L'AVENIR

Une revue, même superficielle, des résultats obtenus par l'application des méthodes économétriques à l'étude du secteur forestier américain, démontre incontestablement un certain succès, qui est avant tout opérationnel. Plusieurs, parmi les études réalisées, ont conduit à des modèles qui sont effectivement utilisés. Comme on l'a vu plus haut, les décisions du Congrès relatives au *Resources Planning Act* et au *National Forest Management Act* ont fourni un environnement idéal pour le développement de ces modèles : ces lois les ont motivés, ont aidé à définir les problèmes, ont fourni au moins une partie des moyens nécessaires, et enfin ont créé une audience de décideurs prête, par nécessité, à critiquer, mais aussi à se servir des modèles produits par les chercheurs. Il s'agit là d'une situation assez nouvelle. Lors de ma première présentation d'une étude économétrique à Syracuse en 1968, W. A. Duerr, pourtant un champion de l'approche quantitative, m'avertit que les responsables du Service Forestier de Washington ne voulaient même pas entendre parler de ce genre de choses.

Il y a, à présent, aux États-Unis un retour du scepticisme quant à l'efficacité des méthodes quantitatives, surtout en ce qui concerne les programmes d'optimisation pour la planification des forêts. Pour les modèles économétriques, il ne semble pas que la prise de conscience des imperfections conceptuelles et méthodologiques des modèles existants aient conduit à leur rejet. Au contraire, les publications et les conférences récentes démontrent une volonté manifeste d'aller de l'avant, avec la

conviction qu'une approche quantitative est nécessaire au progrès de l'économie forestière. A part cette volonté essentielle, qui existe, le succès futur de l'approche économétrique dans l'étude du secteur forestier dépend de trois éléments : (1) des travaux rigoureux d'analyse, (2) un effort accru vers l'abstraction et la simplicité, (3) la prise de conscience de l'importance des données et du besoin de tester impitoyablement les théories sur les données.

En raison du contexte dans lequel elle s'est développée aux Etats-Unis, la modélisation du secteur forestier a peut-être exagéré l'importance des travaux de synthèse. Un modèle grandiose incluant tous les aspects du secteur forestier est peut-être facile à vendre. Fasciné par l'ampleur et les détails du modèle, le client conclut qu'il doit être juste. Néanmoins, cette approche holistique peut être inefficace, et même dangereuse. En pratique, tout ne dépend pas de tout, même en économie. On peut très bien analyser certaines parties du secteur forestier en ignorant le reste. La solution, bien sûr, réside dans une définition serrée du problème à résoudre. Un modèle partiel, centré sur un problème bien défini, a certainement plus de chance de succès qu'un modèle prétendu global mais dont on ne tirera que de médiocres prévisions particulières. Quels qu'ils soient, les modèles futurs devront être basés sur des analyses toujours plus rigoureuses. Cela semble nécessaire pour arriver à des élasticités partielles précises, ces paramètres clés des modèles économétriques.

Les modèles de l'avenir devront être simples, plus simples que beaucoup de ceux développés à ce jour, avec aussi peu de variables et de paramètres que possible. Une stricte parcimonie de paramètres est essentielle pour l'efficacité des outils statistiques. Simplicité implique aussi généralité, le but étant d'aboutir à des modèles capables d'expliquer l'évolution des marchés dans des conditions très diverses. Une telle simplicité n'est évidemment pas facile à obtenir. Elle demande une exploration continue des méthodes nouvelles, et aussi l'utilisation de bases de données plus variées.

Des modèles simples avec des données abondantes et affinées, et des méthodes sophistiquées, devraient produire une moisson de faits nouveaux sur lesquels on pourra enfin construire des modèles solides. L'un des problèmes des travaux économétriques passés, en matière forestière comme ailleurs, c'est qu'en général, ils ont eu tendance à vouloir, coûte que coûte, confirmer des hypothèses dérivées de la théorie économique néo-classique. Pourtant, obtenir des faits solides qui rejettent l'hypothèse classique est une source au moins aussi importante de progrès que l'accumulation de résultats douteux en faveur de l'hypothèse. Les techniques d'analyse des séries chronologiques modernes qui ont commencé à être appliquées devraient aider à établir de tels faits.

En résumé, pour continuer avec succès, la recherche économétrique dans le secteur forestier, américain notamment, devra augmenter sensiblement le travail d'analyse pour aboutir à des modèles dont chaque partie soit basée sur des théories testées rigoureusement sur les données. Ce faisant, il faudra néanmoins continuer à produire des modèles de synthèse dont les décideurs puissent se servir, en les avertissant bien des imperfections inévitables des modèles courants.

BIBLIOGRAPHIE

- ABT (R. C.), 1987 — An analysis of regional factor demand in the US lumber industry, *Forest Science*, 33 (1), pp. 164-173.
- ADAMS (D. M.), 1974 — Forest product prices and national forest timber supply in the Douglas-fir region, *Forest Science*, 20, pp. 243-259.
- ADAMS (D. M.), 1977 — *Effect of national forest timber harvest on softwood stumpage, lumber, and plywood markets ; an econometric analysis*, Corvallis, Oregon State University, Forest Research Laboratory, Research Bulletin 15.
- ADAMS (D. M.), 1985 — A spatial equilibrium model of African-European trade in tropical logs and sawnwood, *Forest Ecology and Management*, 13, pp. 265-287.
- ADAMS (D. M.) et HAYNES (R. W.), 1980 — *The 1980 softwood timber assessment market model : structure, projections, and policy simulation*, Bethesda, MD, Society of American Foresters, Forest Science Monograph 22.
- ADAMS (D. M.) et HAYNES (R. W.), 1986 — Development of the timber assessment market model system for long-range planning by the United States Forest Service, *Proceedings of the 18th IUFRO World Congress, Division 4 : Planning, Economics, Growth and Yield, Management Policy*, pp. 158-169.
- ADAMS (F. G.) et BLACKWELL (J.), 1973 — An econometric model of the United States forest products industry, *Forest Science*, 19, pp. 82-96.
- BAUDIN (A.) et LUNDBERG (L.), 1987 — A world model of the demand for paper and paperboard, *Forest Science*, 33 (1), pp. 185-196.
- BERK (P.), 1979 — The economics of timber : a renewable resource in the long run, *Bell Journal of Economics*, 10 (2), pp. 447-462.
- BINSWANGER (H. P.), 1974 — The measurement of technical change biases with many factors of production, *American Economic Review*, 24, pp. 964-976.
- BOYD (R.) et KRUTILLA (K.), 1987 — The welfare impacts of US trade restrictions against the Canadian softwood lumber industry : a spatial equilibrium analysis, *Canadian Journal of Economics*, vol. 34, pp. 17-35.
- BROOKS (D. J.), 1985 — Public policy and long-term timber supply in the South, *Forest Science*, 31 (2), pp. 342-357.
- BUONGIORNO (J.), 1978 — Income and price elasticities in the world demand for paper and paperboard, *Forest Science*, 24 (2), pp. 231-246.

- BUONGIORNO (J.), HUANG (F. M.) et SPELTER (H.), 1984 — Forecasting the price of lumber and plywood : econometric model versus futures markets, *Forest Products Journal*, 34 (78), pp. 13-18.
- BUONGIORNO (J.), BARK (S.) et BRANNMAN (L.), 1985 — Volume offered and wood prices : a causality test for national forest, *Forest Science*, 31 (2), pp. 405-414.
- BUONGIORNO (J.), CHAVAS (J. P.) et UUSIVUORI (J.), 1988 — Exchange rates, Canadian lumber imports, and United States prices : a time-series analysis, *Canadian Journal of Forest Research*, 18, pp. 1587-1594.
- CALMELS (P.), BUONGIORNO (J.) et ZHANG (D.), 1989 — *Pelops II: a microcomputer price-endogenous linear programming system for economic modeling*, Madison, University of Wisconsin, Department of Forestry, 40 p.
- CAVES (D. W.), CHRISTENSEN (L. R.) et SWANSON (J. A.), 1980 — Productivity in U.S. railroads, *Bell Journal of Economics*, 11, pp. 166-181.
- CHOU (J. J.) et BUONGIORNO (J.), 1983 — United States demand for hardwood plywood imports by country of origin, *Forest Science*, 29 (2), pp. 225-237.
- DAY (R. H.), 1973 — Recursive programming models : a brief introduction, in : G. G. Judge and T. Takayama (eds), *Studies in economic planning over space and time : contributions to economic analysis*, New York, American Elsevier, pp. 329-344.
- DE BORGER (B.) et BUONGIORNO (J.), 1985 — Productivity growth in the paper and paperboard industries : a variable cost approach, *Canadian Journal of Forest Research*, 15, pp. 1013-1020.
- GILLESS (J. K.) et BUONGIORNO (J.), 1987 — *Papyrus : a model of the North American Pulp and Paper Industry*, Bethesda, MD, Society of American Foresters, Forest Science Monograph 28.
- GREGORY (G. R.), 1960 — A statistical investigation of factors affecting the market of hardwood flooring, *Forest Science*, 6 (2), pp. 123-134.
- GREGORY (G. R.), 1965 — More on factors affecting the market for hardwood flooring, *Forest Science*, 11 (2), pp. 200-203.
- GREBER (J.) et WISDOM (H. W.), 1985 — A timber market model for analyzing roundwood product interdependencies, *Forest Science*, 31 (1), pp. 164-179.
- HAYNES (R. W.), 1975 — *A dynamic, spatial equilibrium model of the softwood timber economy with demand equations specified*, Ph. D. thesis, Raleigh, North Carolina State University.
- INCE (P. J.), SKOG (K. E.), SPELTER (H.), DURBAK (I. A.) et HOWARD (J. L.), 1987 — Modeling technological change in wood products processing, in : P. Cardellicchio et al. (eds), *Forest sector and trade models : theory and applications*, Seattle, University of Washington, pp. 257-166.

- JORGENSON (D. W.), 1984 — The role of energy in productivity growth, *American Economic Review*, 74, pp. 26-30.
- KALLIO (M.), DYKSTRA (D. P.) et BINKLEY (C. S.), 1987 — *The global forest sector: an analytical perspective*, New York, Wiley.
- KALTENBERG (M.) et BUONGIORNO (J.), 1986 — Growth and decline of the paper industry: an economic analysis of US regions, *Applied Economics*, 18, pp. 379-397.
- KING (R. A.) et HO (F. S.), 1972 — *Reactive programming: a market simulation spatial equilibrium algorithm*, Raleigh, North Carolina State University, Department of Economics, Economic Research Paper 21.
- LAARMAN (J. G.), 1984 — Fuelwood consumption: a cross country comparison, *Forest Science*, 30 (2), pp. 63-74.
- LARSON (R. W.) et GOFORTH (M. H.), 1974 — *TRAS: a timber volume projection model*, Washington (DC), USDA Forest Service, Technical Bulletin 1508.
- LUPPOLD (W. G.), 1984 — An econometric study of the US hardwood lumber market, *Forest Science*, 30 (4), pp. 1027-1038.
- McFADDEN (D. L.), 1978 — Cost, revenue and profit functions: a cursory review, in: M. A. Fuss et D. L. McFadden (eds), *Production economics: a dual approach to theory and applications*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co.
- McKILLOP (W. M.), 1967 — Supply and demand for forest products: an econometric study, *Hilgardia*, 38 (1), pp. 1-32.
- McKILLOP (W. M.), 1969 — An econometric model of the market for redwood lumber, *Forest Science*, 15 (2), pp. 159-170.
- McKILLOP (W. M.), STUART (T. W.) et GEISSLER (P. J.), 1980 — Competition between wood products and substitute structural products: an econometric analysis, *Forest Science*, 26 (1), pp. 134-148.
- MERRIFIELD (D. E.) et SINGLETON (W. R.), 1986 — A dynamic cost and factor demand analysis for the Pacific Northwest lumber and plywood industries, *Forest Science*, 32 (1), pp. 220-223.
- MILLS (T. J.) et MANTHY (R. S.), 1974 — *An econometric analysis of market factors determining supply and demand for softwood lumber*, East Lansing, Michigan State University, Agricultural Experiment Station, Research Report 238.
- NAUTIYAL (J. C.) et SINGH (B. K.), 1986 — Long-term productivity and factor demand in the Canadian pulp and paper industry, *Canadian Journal of Forest Research*, 15 (1), pp. 115-125.
- NEWMAN (D. H.), 1987 — An econometric analysis of the Southern softwood stumpage market, *Forest Science*, 33 (4), pp. 932-945.
- PRINGLE (S. L.), 1954 — *An econometric analysis of the demand for newsprint in the United States*, Ph. D. dissertation, Syracuse University.

- QUICKE (H. E.), CAULFIELD (J. P.) et DUFFY (P. A.), 1990 — The production structure of the US paper industry, *Forest Products Journal*, 40 (9), pp. 44-48.
- ROBINSON (V. L.), 1974 — An econometric model of softwood lumber and stumpage markets, 1947-1967, *Forest Science*, 20 (2), pp. 171-179.
- ROCKEL (M.) et BUONGIORNO (J.), 1982 — Derived demand for wood and other inputs in residential construction: a cost function approach, *Forest Science*, 28 (2), pp. 207-219.
- SAMUELSON (P. A.), 1952 — Spatial price equilibrium and linear programming, *American Economic Review*, 42 (3), pp. 283-303.
- SCHIRMER (I.) et BUONGIORNO (J.), 1985 — Contribution à l'élaboration d'un modèle du commerce international des grumes de bois tropicaux, *Bois et Forêts des Tropiques*, 209, pp. 65-79.
- SIMPSON (R. S.) et HALTER (A. N.), 1963 — *Forecasting prices, production and new orders in the Douglas-fir plywood industry*, Corvallis, Oregon State University, Agricultural Experiment Station, Special Report 165.
- STIER (J. C.), 1980 — Estimating the production technology in the US forest products industry, *Forest Science*, 26 (3), pp. 471-482.
- STIER (J. C.), 1980 — Technological adaptation to resource scarcity in the US lumber industry, *Western Journal of Agricultural Economics*, 5 (2), pp. 165-175.
- TEEGUARDEN (D. E.) et McKILLOP (W.), 1969 — *A forecast of Ponderosa pine stumpage price in California to 1980*, Berkeley, Cal. Agr. Exp. Sta. Bull. 47.
- USDA FOREST SERVICE, 1982 — *An analysis of the timber situation in the United States 1952-2030*, Washington (DC), USDA Forest Service, Forest Resource Report n° 23.
- USDA FOREST SERVICE, 1989 — *An analysis of the timber situation in the United States 1989-2040*, Washington (DC), USDA Forest Service (version préliminaire).
- VELTKAMP (J. J.), YOUNG (R.) et BERG (R.), 1983 — The Data Resources Inc. approach to modeling demand in the softwood lumber and plywood and pulp and paper industries, in : R. Seppala, C. Row et A. Morgan (eds), *Forest Sector Models*, Berkhamsted (G.-B.), AB Academic Press.
- ZELLNER (A.), 1962 — An efficient method for estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias, *Journal of the American Statistic Association*, 58, pp. 348-365.

ANNEXES

1. EXEMPLE DE MODÈLE DE SYNTHÈSE

Cette annexe décrit brièvement la structure du modèle *Papyrus*. Les détails concernant la calibration des paramètres peuvent être trouvés dans Gilles et Buongiorno (1987). Une description de la version la plus récente du logiciel (*Pelops II*) apparaît dans Calmels *et al.* (1989).

1. Calcul de l'équilibre statique

a) Fonction d'objectif

La fonction d'objectif est la somme des surplus des producteurs et des consommateurs dans toutes les régions et pour tous les produits. Elle consiste donc dans la somme des aires sous les courbes de demande de produits finis moins celle sous les courbes d'offre de produits bruts, moins les coûts de transformation de produit à produit, moins les coûts de transport :

$$\max Z = Z_d - Z_s - Z_t - Z_m$$

où

$$Z_d = \sum_k \sum_i \int_0^{D_{ik}} P_{ik}(D_{ik}) dD_{ik}$$

est le surplus des consommateurs de produits finis

$$Z_s = \sum_k \sum_i \int_0^{S_{ik}} P_{ik}(S_{ik}) dS_{ik}$$

est le surplus des producteurs de produits bruts

$$Z_t = \sum_k \sum_i \sum_j T_{ijk}$$

est le coût des transports entre régions

$$Z_m = \sum_i \sum_k \sum_p Y_{ikp} m_{ikp}$$

est le coût des transformations entre produits.

D , S , T , et Y sont les quantités demandées, offertes, transportées et transformées, P est le prix, t et m sont les coûts unitaires, i et j sont les régions, k est un produit et p est un procédé de transformation.

b) Equations d'offre et de demande

L'équation de demande du produit k dans la région i est :

$$D_{ik} = N_i \gamma_{ik} E_i^{\alpha_{ik}} X_i^{\alpha_{ik}} P_{ik}^{\sigma_{ik}} \quad (2)$$

où N est la population, E le revenu par personne, X une autre variable exogène spécifique à la région et au produit, et où $\gamma, \tau, \alpha, \sigma$ sont des paramètres.

L'équation d'offre du produit k dans la région i est :

$$S_{ik} = \beta_{ik} X_{1ik}^{\rho_{ik}} X_{2ik}^{\mu_{ik}} P_{ik}^{\lambda_{ik}} \quad (3)$$

avec $S_{ik} \leq S_{ik}^*$

où X_1 et X_2 sont des variables exogènes spécifiques à chaque région et produit, S^* une borne supérieure, et $\beta, \rho, \mu, \lambda$ des paramètres.

c) Contraintes entrées-sorties :

Dans chaque région, les entrées de produits doivent équilibrer les sorties, ce qui se traduit par les équations :

$$\sum_j T_{jik} + S_{ik} + \sum_p Y_{ikp} - D_{ik} - \sum_n \sum_p a_{iknp} Y_{inp} - \sum_j T_{ij} = 0 \quad (4)$$

pour chaque produit et région ; les coefficients de transformation a_{iknp} expriment la quantité du produit k nécessaire par unité du produit n , dans la région i et par le procédé p .

d) Contraintes des capacités de transformation

Dans chaque région, la production d'un produit par différents procédés est limitée par la capacité de production. C'est-à-dire :

$$\sum_p Y_{ikp} \leq Y_{ik}^*$$

où Y^* est la capacité.

e) Calcul des quantités et des prix d'équilibre

Pelss II utilise une approximation en segments linéaires des surplus des consommateurs et des producteurs, de sorte que l'équilibre spatial peut être calculé par la programmation linéaire. Plusieurs milliers de bornes supérieures peuvent être tolérées, sans diminuer l'efficacité de la méthode du simplexe. La solution primale donne les quantités produites, consommées et transportées. La solution duale donne les prix des produits dans chaque région.

2. Simulation de l'évolution du secteur

Le passage de l'équilibre à l'instant t à celui à l'instant $t + 1$ se fait en modifiant les paramètres du modèle de programmation linéaire qui décrit l'équilibre statique à chaque instant t . Certaines de ces modifications sont exogènes, d'autres sont endogènes.

Les changements exogènes comprennent :

1) Les changements de coûts de transformation (autres que ceux directement liés aux produits considérés explicitement par le modèle) et de coûts de transport.

2) Les changements des coefficients entrées-sorties, dus par exemple à l'apparition de nouvelles méthodes de transformation.

3) Les changements dans les courbes d'offre et de demande, dus aux changements de population, revenus, coûts et autres variables.

Les changements endogènes se traduisent essentiellement par des augmentations ou des diminutions de capacité de production dans diverses régions et pour différents produits.

Pour chaque produit transformé, le changement de capacité globale (dans l'ensemble du secteur considéré) est déterminé par les équations suivantes :

$$\Delta K_{kt} = b_{1k} \Delta Y_{k,t-1} + b_{2k} \Delta Y_{k,t-2} + b_{3k} \Delta Y_{k,t-3}.$$

Ce changement de capacité globale est distribué par région en fonction des productions régionales courantes, des taux d'utilisation des capacités en place, et des prix fictifs de la capacité dans chaque région (résultant de la solution du programme linéaire) et ce, comme suit.

Si $\Delta K_{kt} > 0$ et si la production est égale à la capacité dans au moins une région, l'augmentation endogène de la capacité dans chaque région est :

$$\Delta K_{ikt} = \frac{\pi_{ik,t-1} Y_{ik,t-1}}{\sum_j \pi_{jk,t-1} Y_{jk,t-1}} \Delta K_{kt}$$

où π_{ik} est le prix dual. Donc, la capacité augmente le plus dans la région où elle est la plus désirable, suivant la théorie de l'équilibre général dans un marché concurrentiel.

Si $\Delta K_{kt} > 0$ et si la production est partout inférieure à la capacité, les augmentations de capacité sont calculées comme suit :

$$\Delta K_{ikt} = \frac{U_{ik,t-1} Y_{ik,t-1}}{\sum_j U_{jk,t-1} Y_{jk,t-1}} \Delta K_{kt}$$

où $U = Y/K$ est le taux d'utilisation de la capacité, de sorte que la capacité augmente le plus là où elle est la plus utilisée.

Si $\Delta K_{kt} < 0$, les changements régionaux de capacité sont calculés par la formule :

$$\Delta K_{ikt} = \frac{1/(Y_{ik,t-1} U_{ik,t-1})}{\sum_j 1/(Y_{jk,t-1} U_{jk,t-1})} \Delta K_{kt}$$

Donc, la capacité diminue le plus dans les régions où elle est couramment moins utilisée.

2. EXEMPLE DE MODÈLE D'ANALYSE

Cette annexe résume une étude économétrique de la structure de production dans l'industrie du papier aux Etats-Unis. L'étude complète est parue dans De Borger et Buongiorno (1985).

1. Fonction de coût de production

La théorie de la dualité (voir par exemple McFadden, 1978), démontre que toute l'information nécessaire pour décrire une fonction de production est contenue dans la fonction de coût. Cette étude utilise une fonction de coût translogarithmique de la forme suivante :

$$\begin{aligned} \ln C_v = & \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \beta_L P_L + \beta_E \ln P_E + \beta_M \ln P_M \\ & + \frac{1}{2} \gamma_{LL} (\ln P_L)^2 + \frac{1}{2} \gamma_{EE} (\ln P_E)^2 + \frac{1}{2} \gamma_{MM} (\ln P_M)^2 \\ & + \gamma_{LE} (\ln P_L \ln P_E) + \gamma_{EM} (\ln P_E \ln P_M) \\ & + \delta_K \ln K + \delta_{KL} (\ln K \ln P_L) + \delta_{KE} (\ln K \ln P_E) \\ & + \delta_{KM} (\ln K \ln P_M) + \rho_i t + \rho_{iL} (t \ln P_L) + \rho_{iE} (t \ln P_E) \\ & + \rho_{iM} (t \ln P_M) + u \end{aligned}$$

où C_v est le coût variable de production, Q la quantité produite, P le prix de l'intrant i ($i = L$ pour la main-d'œuvre, E pour l'énergie et M pour les consommations intermédiaires), et K la capacité de production installée ; t est l'année, et u un résidu aléatoire.

Pour que cette fonction de coût corresponde bien à une fonction de production, il faut imposer des contraintes sur les paramètres pour obtenir une fonction de coût homogène par rapport aux prix, donc :

$$\beta_L + \beta_E + \beta_M = 1$$

$$\begin{aligned} \gamma_{LL} + \gamma_{LE} + \gamma_{LM} &= \gamma_{LE} + \gamma_{EE} + \gamma_{EM} \\ &= \gamma_{LM} + \gamma_{EM} + \gamma_{MM} = 0 \end{aligned}$$

$$\delta_{KL} + \delta_{KE} + \delta_{KM} = 0$$

$$\rho_{iL} + \rho_{iE} + \rho_{iM} = 0.$$

2. Estimation de la fonction de coût

Une méthode d'estimation efficace consiste à estimer la fonction de coût

simultanément avec les équations décrivant la part de chaque facteur (S_i) dans le coût variable total :

$$S_L = \beta_L + \gamma_{LL} \ln P_L + \gamma_{LE} \ln P_E + \gamma_{LM} \ln P_M \\ + \delta_{KL} \ln K + \rho_{iL} t$$

$$S_E = \beta_E + \gamma_{EE} \ln P_E + \gamma_{LE} \ln P_L + \gamma_{EM} \ln P_M \\ + \delta_E \ln K + \rho_{iE} t$$

$$S_M = \beta_M + \gamma_{MM} \ln P_M + \gamma_{LM} \ln P_L + \gamma_{EM} \ln P_E \\ + \delta_{KM} \ln K + \rho_{iM} t.$$

Les données sont des séries chronologiques annuelles allant de 1958 à 1981. Un travail particulier doit être fait pour développer des indices de prix correspondant autant que possible aux facteurs de production dans l'industrie du papier. La méthode d'estimation est celle de Zellner (1962). Les valeurs estimées des paramètres de la fonction de production apparaissent dans le tableau A1. La théorie de la production implique que l'élasticité de la demande d'un intrant par rapport à son prix est négative, et que la matrice des dérivées secondes par rapport au prix, $\partial^2 C_v / \partial P_i \partial P_j$, est définie positive. Ces conditions sont vérifiées pour toutes les observations.

Tableau A1. Valeurs estimées des paramètres de la fonction de coûts variables pour l'industrie du papier aux Etats Unis, 1958-1981

Paramètre	Valeur estimée	Ecart-type
α_O	8,579*	0,005
α_Q	0,949*	0,104
β_L	0,273*	0,002
β_E	0,091*	0,002
β_M	0,636*	0,003
γ_{LL}	0,125*	0,012
γ_{EE}	0,044*	0,011
γ_{MM}	0,121*	0,020
γ_{LE}	-0,024*	0,008
γ_{LM}	-0,101*	0,013
γ_{EM}	-0,020	0,012
δ_k	0,376*	0,173
δ_{KE}	-0,213*	0,056
δ_{KL}	0,005	0,058
δ_{KM}	0,208*	0,068
ρ_i	-0,027*	0,004
ρ_{iL}	-0,006*	0,002
ρ_{iE}	0,010*	0,002
ρ_{iM}	-0,005*	0,002

* Différent de zéro au seuil de confiance 0,05

3. Élasticités de la demande pour les intrants

Les élasticités de la demande pour un intrant par rapport à son prix ou au prix d'un autre intrant sont données par :

$$\varepsilon_{jj} = S_j - 1 + \frac{\gamma_{jj}}{S_j}$$

$$\varepsilon_{ij} = S_j + \frac{\gamma_{ij}}{S_i} \quad i \neq j$$

tandis que les élasticités de substitution (Allen-Usawa) entre intrants sont :

$$\sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_i S_j} + 1 \quad i \neq j$$

Les valeurs estimées sont présentées dans les tableaux A2 et A3. La demande pour chacun des intrants par rapport à son prix est inélastique (élasticité significativement différentes de zéro et de un). La demande pour l'énergie est plus sensible au prix que la demande pour la main-d'œuvre et les consommations intermédiaires. Des substitutions significatives sont apparentes entre main-d'œuvre et consommations intermédiaires, de même qu'entre énergie et consommations intermédiaires, mais elles sont négligeables entre main-d'œuvre et énergie.

Tableau A2. **Elasticités par rapport au prix ($\pm$ écart-type) de la demande pour intrants dans l'industrie du papier**

Intrant	Prix		
	Main-d'œuvre	Energie	Consommations intermédiaires
Main-d'œuvre	-0,27 $\pm$ 0,04*	0,01 $\pm$ 0,009	0,12 $\pm$ 0,02*
Energie	0,00 $\pm$ 0,03	-0,43 $\pm$ 0,11*	0,06 $\pm$ 0,02*
Consommations intermédiaires	0,26 $\pm$ 0,05*	0,42 $\pm$ 0,13*	-0,18 $\pm$ 0,03*

* Différent de zéro au seuil de confiance 0,05

Tableau A3. **Elasticités de substitution entre facteurs de production dans l'industrie du papier**

	σ_{LE}	σ_{LM}	σ_{EM}
Elasticité	0,05	0,42*	0,67*
Ecart-type	0,32	0,08	0,20

* Différent de zéro au seuil de confiance 0,05

4. Economies d'échelle

Une mesure des économies d'échelle à court terme (changements de coûts dus aux changements de la production, toutes choses égales par ailleurs) est fournie par :

$$D = 1 - \frac{\partial \ln C_v}{\partial \ln Q}$$

Dans notre cas, $D = 0,05 \pm 0,11$ et par conséquent, il n'y a aucune économie d'échelle significative à court terme pour cette industrie. Une mesure des économies d'échelle à long terme (augmentation de production résultant de l'augmentation proportionnelle de tous les intrants) est donnée par :

$$R = \frac{1 - \partial \ln C_v / \partial \ln K}{\partial \ln C_v / \partial \ln Q}$$

Ici, R est inférieur à l'unité ($R = 0,65$), ce qui suggère un ajustement inefficace de la capacité à la production dans l'industrie du papier, durant la période étudiée.

5. Evolution de la productivité et biais des changements techniques

La croissance de la productivité peut être définie par le taux de croissance de la production au cours du temps quand tous les intrants sont maintenus constants. On peut définir cette mesure à partir des paramètres de la fonction de coût par la relation (voir Caves *et al.*, 1981) :

$$P_1 = \frac{-\partial \ln C_v / \partial t}{\partial \ln C_v / \partial \ln Q}$$

La figure 1 montre le résultat des calculs pour l'industrie du papier, de 1958 à 1981. Le taux de croissance moyen était de 2,9 % par an. Le taux de croissance de la productivité a augmenté régulièrement jusqu'en 1973. Il a ensuite diminué jusqu'en 1981. Une explication de ce phénomène est facilitée par la détermination des biais de progrès technique (Binswanger, 1974) :

$$B_i = \frac{\partial S_i}{\partial t} \frac{1}{S_i^*} = \frac{\rho_{ti}}{S_i^*}$$

où S_i^* est la part moyenne des intrants durant la période observée. Les valeurs de B qui apparaissent dans le tableau A4 montrent que les progrès techniques dans l'industrie du papier de 1958 à 1981 ont eu pour effet d'économiser la main-d'œuvre et d'augmenter l'utilisation d'énergie, tandis que celle des consommations intermédiaires restait à peu près inchangée. Jorgenson (1984) a montré que le biais exprime l'effet du changement technique sur la part d'un intrant ou, alternativement, l'effet négatif du

Tableau A4. **Biais du changement technique dans l'industrie du papier**

	Main-d'œuvre	Énergie	Consommations intermédiaires
Biais	-0,020*	0,12*	-0,007
Ecart-type	0,007	0,02	0,004

* Différent de zéro au seuil de confiance 0,05

prix d'un intrant sur le changement technique. Durant les années soixante, la diminution du prix réel de l'énergie a conduit à des changements techniques qui ont augmenté constamment le taux de croissance de la productivité. Mais la crise pétrolière s'est traduite par une augmentation du coût de l'énergie. Ceci a induit une réduction des innovations consommatrices d'énergie, entraînant la réduction du taux de croissance de la productivité de 1973 à 1981. Ces résultats ont été confirmés avec des données plus récentes (Quicke *et al.*, 1990).

Figure 1. **Taux de croissance annuel de la productivité dans l'industrie du papier aux Etats-Unis, de 1958 à 1981**