CHANGEMENT CLIMATIQUE, FLUX TECHNOLOGIQUES, FINANCIERS ET COMMERCIAUX

Nouvelles directions d'analyse d'entrée-sortie

Sous la direction de
L. MARTIN CLOUTIER et CHRISTIAN DEBRESSON

Avec la collaboration de
ERIK DIETZENBACHER

Presses de l'Université du Québec

CHANGEMENT CLIMATIQUE,

FLUX TECHNOLOGIQUES,

FINANCIERS ET COMMERCIAUX

Nouvelles directions d'analyse d'entrée-sortie

PRESSES DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
Le Delta I, 2875, boulevard Laurier, bureau 450
Sainte-Foy (Québec) G1V 2M2
Téléphone : (418) 657-4399 · Télécopieur : (418) 657-2096
Courriel : puq@puq.ca · Internet : www.puq.ca

Distribution :

CANADA et autres pays

DISTRIBUTION DE LIVRES UNIVERS S.E.N.C.
845, rue Marie-Victorin, Saint-Nicolas (Québec) G7A 3S8
Téléphone : (418) 831-7474 / 1-800-859-7474 • Télécopieur : (418) 831-4021

FRANCE

DISTRIBUTION DU NOUVEAU MONDE
30, rue Gay-Lussac, 75005 Paris, France
Téléphone : 33 1 43 54 49 02
Télécopieur : 33 1 43 54 39 15

SUISSE

SERVIDIS SA
5, rue des Chaudronniers, CH-1211 Genève 3, Suisse
Téléphone : 022 960 95 25
Télécopieur : 022 776 35 27

La *Loi sur le droit d'auteur* interdit la reproduction des œuvres sans autorisation des titulaires de droits. Or, la photocopie non autorisée – le « photocopillage » – s'est généralisée, provoquant une baisse des ventes de livres et compromettant la rédaction et la production de nouveaux ouvrages par des professionnels. L'objet du logo apparaissant ci-contre est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit le développement massif du « photocopillage ».

CHANGEMENT CLIMATIQUE,

FLUX TECHNOLOGIQUES,

FINANCIERS ET COMMERCIAUX

Nouvelles directions d'analyse d'entrée-sortie

Sous la direction de
L. MARTIN CLOUTIER et
CHRISTIAN DEBRESSON
Département de management et technologie
Université du Québec à Montréal

Avec la collaboration de
ERIK DIETZENBACHER
Université de Groningen

Avec des traductions sous la direction de
GEORGES BASTIN
Université de Montréal

2004

Presses de l'Université du Québec
Le Delta I, 2875, boul. Laurier, bur. 450
Sainte-Foy (Québec) Canada G1V 2M2

Catalogage avant publication de la Bibliothèque nationale du Canada

Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie
(14e : 2002 : Montréal, Québec)

Changement climatique, flux technologiques, financiers et commerciaux : nouvelles directions d'analyse d'entrée-sortie

Textes présentés lors de la 14e Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie tenue à Montréal en oct. 2002.

Comprend des réf. bibliogr. et un index.

ISBN 2-7605-1291-6

1. Analyse input-output – Congrès. 2. Climat – Changements – Aspect économique – Congrès. 3. Productivité – États-Unis – Congrès. 4. Analyse input-output – Canada – Congrès. 5. Macroéconomie – Congrès. 6. Flux financiers – Congrès. I. Cloutier, L. Martin. II. DeBresson, Chris. III. Dietzenbacher, Erik, 1958- . IV. Titre.

HB142.C66 2002 339.2'3 C2004-940597-7

Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Programme d'aide au développement de l'industrie de l'édition (PADIÉ) pour nos activités d'édition.

Mise en pages : Caractéra production graphique inc.

Couverture : Richard Hodgson

1 2 3 4 5 6 7 8 9 PUQ 2004 9 8 7 6 5 4 3 2 **1**

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés
© 2004 Presses de l'Université du Québec

Dépôt légal – 3e trimestre 2004
Bibliothèque nationale du Québec / Bibliothèque nationale du Canada
Imprimé au Canada

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements XIII

INTRODUCTION
Des analyses économiques utiles
Applications contemporaines des tableaux entrées-sorties 1
Christian DeBresson
1. Problèmes contemporains 2
2. Analyses utiles d'une science praxéologique 8
3. Une attitude scientifique réaliste 11
4. Le respect de la complexité : l'approche systémique 16
En guise de conclusion 18
Références bibliographiques 18

PARTIE 1
Perspectives sur le changement climatique et l'économie

CHAPITRE 1
Changements climatiques
Ce que les sciences naturelles et les décideurs politiques aimeraient savoir des économistes 23
Gordon McBean et Catherine Coleman
1. Introduction 25
2. Gaz à effet de serre : aperçu et tendances 25
3. Considérations socioéconomiques 32
4. Conclusion 42
Références bibliographiques 42

CHAPITRE 2
Modèles d'équilibre général calculables appliqués à l'économie de l'environnement et des ressources 45
Klaus Conrad
1. Introduction 47
2. Équilibre partiel, modèles d'équilibre général calculables (MEGC) et modèles macroéconomiques 47

3. Des modèles d'entrées-sorties (E-S) aux modèles d'équilibre général calculables (MEGC) 47
4. Comportement du producteur 50
5. Comportement du consommateur 51
6. Commerce extérieur, offre et demande intérieures 51
7. Marché de l'emploi 53
8. Changements technologiques (CT) 53
9. Technologies d'atténuation 55
10. Données requises 55
11. Analyses de simulations environnementales fondées sur les MEGC 56
12. MEGC avec un lien bilatéral entre l'environnement et l'économie 61
13. Limite des MEGC et aperçu des recherches futures 63
Références bibliographiques 64

CHAPITRE 3
Politiques climatiques – de Kyoto à Bonn
De « pas grand-chose » à « rien du tout » ? 67
Christoph Böhringer
1. Introduction 69
2. Cadre d'analyse et calibrage du modèle de référence 72
3. Scénarios des mesures politiques 73
4. Résultats des simulations 76
5. Conclusions 88
Références bibliographiques 89

CHAPITRE 4
Impact environnemental et coût économique du traitement des déchets
Une analyse d'entrée-sortie 91
Shinichiro Nakamura et Yasushi Kondo
1. Introduction 93
2. Le modèle d'entrée-sortie des déchets 94
3. Application : les effets d'un traitement régional 98
4. Conclusion 102
Références bibliographiques 103

CHAPITRE 5
Bilan et proposition : dégradation mondiale de l'environnement au XXIe siècle
Un défi pour l'analyse économique d'entrée-sortie 105
Faye Duchin

PARTIE 2
Réponse au paradoxe de Solow, hausses de la productivité aux États-Unis, flux technologiques et financiers

CHAPITRE 6
Les technologies de l'information et l'économie américaine 113
Dale W. Jorgenson
1. Introduction 115
2. L'ère de l'information 117
3. Le rôle des technologies de l'information (TI) 127
4. La renaissance de la croissance américaine 139
5. L'économie à l'ère de l'Internet 157
Références bibliographiques 159

CHAPITRE 7
Réestimation de la matrice des flux technologiques interindustriels 165
Frederic M. Scherer
1. Introduction 167
2. Importance du problème 167
3. Le premier effort d'évaluation des flux technologiques 167
4. Réestimation à l'aide de méthodes à moindre intensité de main-d'œuvre 173
5. Résultats 177
6. Une autre approche visant à évaluer les flux technologiques 183
7. Conclusions 184
Références bibliographiques 186

CHAPITRE 8
Liens potentiels entre l'analyse d'entrée-sortie et les flux financiers 189
Lawrence R. Klein
Références bibliographiques 198

PARTIE 3
Wassily Leontief et les essais du concours pour le prix Leontief 2002

CHAPITRE 9
Quelques jalons dans la vie de Wassily Leontief
Entrevue avec Estelle et Wassily Leontief 201
Christian DeBresson
1. Le contexte 203
2. L'entrevue 204
3. Épilogue 214

CHAPITRE 10
Introduction du changement technique incorporé dans un modèle d'entrée-sortie macroéconomique structurel 215
Daniel J. Wilson
1. Introduction 217
2. Aperçu du modèle IDLIFT 218
3. Élaboration d'un stock de capital ajusté en fonction de la qualité .. 220
4. Équations alternatives pour la productivité de la main-d'œuvre 221
5. Résultats des simulations 227
6. Conclusion 229
Références bibliographiques 230

CHAPITRE 11
Introduction de l'évolution technologique dans un modèle d'entrée-sortie
Une application aux calculs des émissions de carbone intrinsèques ... 231
Jan Mutl
1. Introduction 233
2. Modèle théorique 234
3. Application 237
4. Résultats et conclusion 244
Références bibliographiques 246

CHAPITRE 12
Transferts technologiques avec contrainte de capitaux et protection environnementale
Modèles et applications aux Philippines 249
Kazuhiko Nishimura
1. Introduction 251
2. Transfert technologique dans un système d'entrée-sortie 252
3. Modèle de programmation linéaire avec prise en compte de l'environnement 256
4. Transfert technologique optimal du Japon aux Philippines 257
5. Conclusion 261
Références bibliographiques 262

PARTIE 4
Applications au Québec et au Canada

CHAPITRE 13
Intégration canadienne et ouverture
Commerce provincial interrégional et international 265
Pierre A. Généreux et Brent Langen
1. Introduction 267
2. La matrice du commerce interprovincial et ses équations comptables 267

3. Évolution récente des bases de données et leur réajustement cohérent 271
4. Analyse des flux du commerce interprovincial et international, 1992 à 2001 276
5. Conclusions 281
Références bibliographiques 283

CHAPITRE 14
Le modèle d'équilibre général calculable du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche du Québec
Un modèle birégional du Québec et du reste du Canada 285
Bernard Decaluwé, André Lemelin, Véronique Robichaud, David Bahan et Daniel Florea
1. Introduction 287
2. Approche générale 287
3. Traits distinctifs 289
4. Structure du modèle 294
5. Conclusion 296
Références bibliographiques 297

CHAPITRE 15
Impacts macroéconomiques de mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre sur l'agriculture au Canada 299
Paul J. Thomassin et L. Martin Cloutier
1. Introduction 301
2. Modélisation des effets macroéconomiques sur l'environnement . . 302
3. Le modèle d'entrée-sortie 304
4. Élaboration des scénarios et résultats 310
5. Conclusion 314
Références bibliographiques 315

CHAPITRE 16
Un réexamen de l'hypothèse de Schumpeter à partir d'une approche d'entrée-sortie 317
Pierre Mohnen et Thijs ten Raa
1. Introduction 319
2. Le modèle de la productivité 320
3. Les rentes 322
4. Concurrence et productivité 323
5. Conclusion 326
Références bibliographiques 326

Notices biographiques 329

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont rendu ce livre et cette conférence internationale possibles. Le Programme de soutien à la tenue de congrès scientifiques du ministère de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MRST) à l'époque dirigée par Camille Limoges et gérée par Michel Madore, maintenant à la Direction de la culture scientifique et technique du ministère du Développement économique et régional du gouvernement du Québec, nous a permis de faire traduire en français, pour les séances plénières de la conférence, la majorité des textes que vous trouverez, retravaillés, dans ce livre. Sans la subvention du MRST, ce livre n'aurait pu paraître.

Deux subventions complémentaires nous ont permis de tenir la conférence elle-même : la première du Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH) et la seconde de Statistique Canada. Ces subventions permirent d'inviter des personnalités internationales, notamment les professeurs Lawrence R. Klein, Dale W. Jorgenson et Frederic M. Scherer dont les contributions paraissent dans ce livre. Ces deux subventions nous ont aussi permis de fournir à tous les participants un cahier de tous les résumés des communications[1]. L'International Input-Output Association (Association internationale) elle-même contribua largement aux frais de voyages, dont ceux de quatre jeunes chercheurs de pays non-membres de l'OCDE.

Ce livre est donc issu d'une importante conférence internationale qui a réuni plus de 350 participants venus de 45 pays différents, qui ont pu choisir parmi 300 communications dans plus d'une centaine de séances pendant cinq jours. Forcément, ce livre ne peut présenter qu'une sélection fort limitée de ces textes et des sujets discutés lors de la conférence. Ceux qui voudraient pousser plus loin et/ou dans d'autres directions leurs explorations des applications les plus récentes des techniques d'analyses d'entrée-sortie peuvent visiter le site Internet de la conférence <www.io2002conference.uqam.ca> où chacun pourra consulter les textes – en anglais – qui l'intéressent. Nous recommandons aussi la revue *Economic Systems Research*, en particulier le volume 15, numéro 3, de septembre 2003, entièrement consacré à la conférence de Montréal. Enfin, nous recommandons les futures conférences de l'Association internationale, annoncées sur son site Internet <www.iioa.org/>.

1. Voir <www.io2002conference.uqam.ca/abstracts.pdf>.

Une telle conférence internationale ne s'organise pas *ex nihilo*, mais se bâtit sur une longue tradition institutionnalisée. Depuis 1953, Wassily Leontief et Richard Stone (deux lauréats du prix Nobel en sciences économiques) ont établi cette tradition. La conférence de Montréal ne fut que la quatorzième. C'est pour organiser de telles conférences que l'International Input-Output Association fut fondée en 1989. C'est essentiellement grâce à cette association, sa réputation, sa tradition, que nous avons pu organiser à Montréal une conférence si variée avec des chercheurs si prestigieux. Ce fut un grand honneur pour moi d'être invité par cette association pour organiser la quatorzième conférence.

Cette conférence internationale s'est aussi appuyée sur la tradition et la réputation de Statistique Canada, comme institution. Non seulement Statistique Canada produit les tableaux économiques du Canada, mais cette institution a contribué de façon appréciable au développement des techniques d'analyses d'entrée-sortie : matrices rectangulaires industries par produits (*make-use matrices*), analyse structurelle en quantités physiques, comptabilité nationale, matrices de commerce interrégionales (voir le chapitre 13), etc. Cette réputation est associée à de grands économistes, dont Tadeusz Matuzewsky, Thierry Gigantes et Marcel G. Dagenais. Dès le départ, l'organisation de la XIVe Conférence à Montréal a bénéficié de l'appui et de la participation active de la haute direction de Statistique Canada, dont Kishori Lal aussi membre du Conseil de l'Association internationale. Claude Simard de Statistique Canada fut le coresponsable de la programmation de la séance d'ouverture. En outre, de nombreux chercheurs de Statistique Canada ont organisé des séances parallèles dans le cadre de la conférence.

J'ai ainsi pu retourner et léguer, à la fin d'une courte carrière, à la future génération de chercheurs un tout petit peu de ce que Wassily Leontief, Anne P. Carter, Andras Brody, Emilio Fontela, Faye Duchin, mon directeur de thèse Henri Aujac et cette Association internationale m'ont apporté comme soutien intellectuel dans mes efforts pour adapter l'analyse d'entrée-sortie à l'innovation (DeBresson, 1991, 1996). L'organisation locale aurait été impossible sans l'appui scientifique et critique de l'Association internationale. En particulier la programmation scientifique fut celle d'Erik Dietzenbacher, directeur de la revue de l'Association internationale, *Economic Systems Research*, avec l'aide de Kishori Lal (Statistique Canada) et de Pierre Mohnen (Département de sciences économiques, Université du Québec à Montréal).

Si l'Association internationale et Statistique Canada nous ont fourni la réputation, les contacts et la tradition, la logistique de la conférence, quant à elle, fut assurée par des institutions locales, à savoir les deux universités francophones de Montréal.

Roch Denis, recteur de l'Université du Québec à Montréal, nous a fourni un appui sans bornes. Les directeurs successifs de mon département, Albert Lejeune puis Amadou Diallo, m'ont apporté une aide constante et instantanée. Jean-François Tremblay et Carole Kearney du Service de l'audiovisuel ont conçu et diffusé l'image externe de cet événement par le biais de son site Internet. Francine Jacques du Service des relations publiques a organisé la promotion de la conférence. Lynda Héneault du vice-décanat à la

recherche de l'École des sciences de la gestion, a géré les finances complexes de cet événement. Le personnel de mon département, soit le Département de management et technologie, Chantal Pépin-Augustin, Danièle Cassagnes, Lorraine Rémi et Diane Berthiaume, sont venues à mon aide à chaque croisée de chemins.

L'Université de Montréal nous a apporté un complément logistique précieux. Le professeur Georges Bastin ainsi que Véronique Théron et Lucie Leblanc, deux étudiantes du Département de linguistique et de traduction, ont réalisé la traduction de presque tous les textes des séances plénières, c'est-à-dire les chapitres 1–5 et 7–12. Ce sont ces textes revus par les auteurs et les directeurs qui vous sont ici présentés. À ce titre, nous remercions Céline Bérard, candidate à la maîtrise à l'Université du Québec à Montréal, pour son assistance éditoriale et sa relecture attentive des épreuves de cet ouvrage.

Finalement, je tiens à remercier individuellement trois personnes sans lesquelles, vu mon invalidité cardiaque survenue soudainement en plein été 2002, il m'aurait été impossible de remplir le mandat confié par l'Association internationale : un étudiant de doctorat et ami Mohamed (Rashid) Amédiane Nour Eddine, mon épouse, Zhao Yuanhong, et mon collègue du Département de management et technologie, L. Martin Cloutier, sans lequel ce livre n'aurait jamais vu le jour.

Christian DeBresson

INTRODUCTION

DES ANALYSES ÉCONOMIQUES UTILES
Applications contemporaines des tableaux entrées-sorties†

CHRISTIAN DEBRESSON
Université du Québec à Montréal

Nous vous présentons dans ce livre uniquement des textes d'analyses utiles, réalistes et systématiques sur des sujets importants pour la société contemporaine. Ce livre est destiné avant tout aux jeunes chercheurs : il leur fournit un aperçu des méthodes et techniques les plus récentes pour l'analyse de problèmes complexes et interdépendants, allant par exemple du réchauffement de la planète à la réduction des gaz à effet de serre dans l'agriculture canadienne. Ce livre s'adresse aussi aux analystes politiques et aux économistes qui veulent rester au fait des avancées de l'analyse d'entrée-sortie depuis la mort de Wassily Leontief, survenue en 1999. Le futur chercheur et l'analyste politique y trouveront une méthode réaliste qui tient compte de la complexité des problèmes à résoudre.

Dans la première partie, je mettrai en contexte les différents thèmes (problèmes climatiques et environnementaux ; croissance et productivité ; flux financiers…) et introduirai chacune des contributions. Dans les trois parties suivantes, je signalerai au jeune chercheur et à ceux qui ne sont pas encore familiers avec la tradition fondée par Wassily Leontief et l'analyse d'entrée-sortie certaines de leurs caractéristiques distinctives qui les démarquent du reste de la science économique contemporaine.

† Je remercie L. Martin Cloutier, Pierre Mohnen, Anne P. Carter, Faye Duchin, Emilio Fontela et John Cotsomitis pour leurs commentaires sur une version antérieure. Je reste le seul responsable des erreurs et des insuffisances qui subsistent.

1. Problèmes contemporains

En août 2000, au Conseil international de l'International Input-Output Association (*IIOA* : Association internationale) puis devant tous les membres présents réunis à Macerata en Italie lors de sa treizième conférence, je proposais le thème du changement climatique pour la séance d'ouverture de la quatorzième conférence à Montréal. Montréal est en effet devenue dans les années 1980 un des centres d'institutions internationales sur l'environnement. Les divisions environnementales de l'Organisation des Nations Unies et de l'Accord de libre-échange nord-américain, la Commission pour la coopération environnementale, y sont localisées. En particulier le fameux accord de Montréal de 1987 sur la réduction des fluoro-chloro-carbones, détruisant l'ozone aux deux pôles de la planète, est un des rares accords internationaux à avoir contribué, semble-t-il, à diminuer la contribution humaine à une dégradation de notre écosystème – bien qu'à l'été 2003 nous apprenions que les trous aux deux pôles avaient de nouveau augmenté considérablement. Ce thème environnemental représente donc la première partie de cet ouvrage.

En l'an 2000, encore à une époque de paix et de coopération internationale relative, les émissions de gaz à effet de serre retenaient l'attention du public international. L'effet de serre constituait l'un de ces exemples où l'industrialisation myope semblait mettre en danger, de manière non intentionnée, les cadres mêmes de l'existence humaine dans la biosphère. L'analyse d'entrée-sortie représentait la meilleure méthode pour évaluer les impacts économiques probables des protocoles et conventions alors en négociation, soit ceux de Kyoto et de Bonn.

I

La partie I de ce livre intitulée « Perspectives sur le changement climatique et l'économie » débute donc par des textes courts reflétant l'intégralité de la séance d'ouverture de la XIVe Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie, tenue le vendredi 11 octobre 2002. Le thème de cette matinée était « Changement climatique : contribution humaine et conséquences économiques ». L'économie agit ici en système ouvert dans et sur l'écosystème. Il convenait donc premièrement de faire situer par un chercheur des sciences naturelles, le professeur Gordon McBean (Université de Western Ontario), l'état des problèmes écologiques. Nous lui posions les questions suivantes : quel est le consensus dans la communauté scientifique ? À quelles questions peuvent contribuer les économistes ? Le contenu de cette présentation, que l'on retrouve au chapitre 1, a été rédigé en collaboration avec Catherine Coleman (Environnement Canada).

Klaus Conrad (Université de Mannheim, Allemagne) décrit ensuite, au chapitre 2, les avantages d'un modèle d'équilibre économique général calculable incorporant les matrices entrées-sorties : ordonner la magnitude des impacts de différentes politiques internationales. Il montre aussi les limites de ces modèles : comme ils sont rarement estimés à partir de données observées directement, ils ne peuvent pas prévoir quantitativement ces impacts.

Dans le chapitre 3, Christoph Böhringer (Center for European Economic Analysis, Allemagne), utilise un tel modèle pour évaluer l'absence des États-Unis du protocole de Kyoto et/ou dans les modifications apportées par la convention de Bonn. Il conclut que les deux scénarios, ensemble ou isolément, annuleront presque toutes les diminutions des émissions de gaz à effet de serre prévues originellement à Kyoto. En comparant les divers scénarios, il éclaire les motivations économiques – ou le manque de motivations – des principaux acteurs (États-Unis d'Amérique, Europe, Russie) à ratifier ou non ces accords ; il a anticipé ainsi le comportement de la Russie. Ces analyses ont depuis été confirmées par le comportement des différents acteurs.

Après la lecture de ce chapitre, le lecteur aura une vision plus réaliste de la prétendue *éco-efficacité* de ces traités. En outre, il saisira mieux la complexité de l'instauration de telles règles de jeu internationales pour un environnement durable : contrat entre États (The Lisbon Group, 1995), création d'un nouveau marché ? Ces résultats interpellent les acteurs politiques qui ont conçu Kyoto et Bonn : est-il possible de créer les institutions d'un marché sans tous les acteurs concernés (y compris les tout nouveaux pays industriels) ? Est-il possible de créer un nouveau marché pour un bien public – l'air – qui n'est pas encore devenu rare pour tous ? Est-il possible de créer un marché non pas pour le bien devenant rare mais pour l'activité qui le rend rare (Gabus, 2003) ?

Toujours sur les problèmes environnementaux, dans le chapitre 4, Shinichiro Nakamura et Yasushi Kondo (Université de Waseda, Japon) créent un secteur supplémentaire aux matrices entrées-sorties du Japon pour le « traitement des déchets ». Ces chercheurs parviennent à évaluer les émissions de CO_2 produites en utilisant plusieurs techniques alternatives telles que le triage, l'enfouissement et la combustion, locaux ou centralisés. Les auteurs concluent qu'au Japon, vu la rareté et le coût élevé des terrains d'enfouissement, la concentration régionale de plus gros incinérateurs, associée à des améliorations dans le transport des déchets, serait la meilleure solution.

Finalement, Faye Duchin (Institut polytechnique Rensselaer, Troy, New York, et présidente de l'Association internationale), une spécialiste reconnue des problèmes écologiques, est venue clore la session. Avant le débat sur le traité de Kyoto, elle avait déjà évalué le manque de conformité du rapport Brundtland avec les objectifs de développement durable des Nations Unies (Duchin et Lange, 1995). Au chapitre 5, elle suggère aux futurs chercheurs une toute autre approche : rechercher des solutions écologiques à travers la modification de la demande. Selon une méthode déjà décrite dans un de ces derniers livres (Duchin, 1998), elle nous propose de caractériser dans une matrice de comptabilité sociale[1] les différents types de ménages et styles de vie ; les changements de ces styles ou de leurs parts relatives pourraient avoir un effet significatif sur l'équilibre écologique au même titre que des politiques axées sur l'offre et la production. Or, ni l'impact de ces styles de vie ni leurs

1. Pour un exemple de matrice de comptabilité sociale pour le Québec, voir le chapitre 14.

modes de consommation n'ont été étudiés. Elle suggère que les économistes d'entrée-sortie fassent partie d'équipes interdisciplinaires pour étudier les styles de vie des ménages. Si les prises de décisions des gouvernements et des grandes firmes sont importantes, Faye Duchin nous rappelle que les décisions, périodiques ou continues, des ménages ont aussi un impact critique. Nos analyses doivent considérer toutes ces décisions.

Comme lors de la crise de l'énergie en 1973-1979, la consommation finale n'est pas seulement contrainte par des techniques de production mais aussi par des « techniques de consommation » ; ces dernières offrent des marges de manœuvre et des degrés de liberté (Fontela, 2000). Comme l'administration actuelle du plus gros émetteur de gaz à effet de serre (les États-Unis d'Amérique) répète dans les organisations internationales (par exemple à l'OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques) que toute remise sur la table de l'accord de Kyoto ou de la convention de Bonn constitue une attaque contre l'« *American way of life* » – une culture matérielle centrée autour du complexe technologique moteur-à-combustion-interne-pétrole-pétrochimie (Gille, 1978) –, l'analyse économique à visée écologique n'a peut-être pas d'autre choix que d'examiner la structure de la demande et le style de vie des ménages.

II

La deuxième partie de cet ouvrage regroupe les communications de trois conférenciers invités sous la rubrique « Réponses au paradoxe de Solow, hausses de la productivité aux États-Unis, flux technologiques et financiers ».

De la fin des années 1960 à la fin du dernier millénaire, la croissance des États-Unis avait ralenti, alors même que ce pays introduisait les ordinateurs et la microélectronique. À l'époque du ralentissement de la croissance économique des États-Unis, William Baumol (1967) avait signalé que si les secteurs à productivité stagnante produisaient des biens et services très inélastiques au prix, des transferts de surplus se feraient alors vers ces secteurs. En 1985, cette thèse fut confirmée pour les États-Unis (Baumol *et al.*, 1985). Anne P. Carter soutint, pour sa part, que cela pouvait aussi tenir à la structure industrielle de certains secteurs : si l'un des secteurs a une structure de monopole, une hausse générale de la productivité ne se produit pas (Carter, 1990)[2].

À la fin du dernier millénaire, la productivité aux États-Unis connut des hausses spectaculaires. Les ordinateurs et la microélectronique qui pénétrèrent tous les secteurs semblaient finalement se refléter dans certains chiffres sur la productivité. Effet cyclique ? Résultats de l'endettement international croissant de tous les secteurs de l'économie des États-Unis ? Expression de l'émergence d'une « nouvelle économie », comme même le précautionneux Alan Greenspan de la banque centrale des États-Unis a semblé y croire pendant quelques mois avant l'éclatement de la bulle boursière sur les « dot.com » ? Dale W. Jorgenson (Harvard University), au chapitre 6, nous livre son évaluation

2. Je suis redevable pour ce dernier paragraphe à Emilio Fontela (2000).

de ces hausses de productivité ainsi que leurs sources. Il a bien voulu nous offrir en primeur la traduction française de son allocution présidentielle à l'American Economic Association sur le sujet[3]. Son chapitre 6 nous révèle que la hausse de productivité aux États-Unis ne concerna qu'un très petit nombre de secteurs et n'affecta indirectement qu'une partie de l'économie[4]. Dans sa présentation à la conférence, Jorgensen ajouta que le capital humain fut aussi un facteur, confirmant ainsi les études de cas d'entreprises individuelles par Brynjolfsson et Hitt (2000) selon lesquelles 90 % des investissements permettant les hausses de productivité visent le capital organisationnel et humain (London, 2003 ; voir aussi Wilson au chapitre 10 de ce livre).

Frederic M. Scherer est, quant à lui, revenu sur son travail des années 1980 en attirant l'attention sur un problème très débattu depuis trois décennies : comment imputer l'effet de la R-D ou des inventions brevetées ? Dans un travail considéré comme très original en 1984, Scherer avait minutieusement attribué chaque brevet d'invention des principales firmes des États-Unis à chacune de leur branche d'activité industrielle, d'une part, et, d'autre part, à l'industrie la plus susceptible d'utiliser l'invention. Cette « matrice de brevet » servait ensuite à imputer les effets indirects de la R-D sur les hausses de productivité. Près de 20 ans plus tard, Scherer ré-évalue cet ancien travail et y apporte des rectificatifs méthodologiques.

L'ultime critère de scientificité est la capacité non seulement d'expliquer des observations récurrentes, mais aussi de les prédire – *ex ante* – avant qu'elles ne se manifestent. Si la théorie de Newton a inspiré tant de confiance, c'est notamment parce qu'elle fut capable de prédire les mouvements des astres, par exemple (à une année près) le retour de la comète de Halley. En sciences sociales et humaines, cependant, les systèmes sont si complexes, ouverts, et les agents y ont de tels degrés de liberté qu'il ne peut être question de prédire avec la même précision ; le chercheur doit alors se contenter de prévoir des rangs d'ordre, des ordres de grandeurs conditionnels à des scénarios, des tendances, voire des discontinuités (nous y reviendrons). Mais le critère de scientificité reste de même nature.

De ce point de vue, l'économiste contemporain qui a su produire pour le monde des affaires et les Nations Unies les anticipations les plus utiles et les plus réalistes est le professeur Lawrence R. Klein. Il a mis au point les célèbres modèles macroéconomiques et interindustriels mondiaux LINK (souvent appelés « *Penn* » ou « *Wharton models* »). Il fut d'ailleurs récompensé pour ses prévisions de la crise énergétique et de la stagflation de la fin des années 1970 par le prix Nobel d'économie en 1980.

Généreusement, le professeur Lawrence R. Klein accepta de venir à Montréal nous éclairer de sa sagesse. Dans son chapitre 8, il nous fait en passant un léger reproche : si les utilisateurs que nous sommes tous de l'analyse d'entrée-sortie voulaient aussi rester des économistes « réalistes », il nous faudrait incorporer les flux financiers internationaux (voire par le moyen

3. Nous remercions le professeur Jean-Jacques Laffont (Université de Toulouse) pour sa traduction.

4. Ainsi, la problématique de Baumol (1967) reste toujours d'actualité.

d'une matrice mondiale) aux tableaux entrées-sorties, afin de refléter un des faits dominants, sinon le fait dominant, de l'économie des 20 dernières années. En effet, depuis la déréglementation financière des années 1980, il est impossible de comprendre le changement de structure des économies nationales sans tenir compte des mouvements d'entrée et de sortie de plus en plus rapides et massifs de capitaux (Roe, 2003). Le professeur Lawrence Klein nous propose ici de traiter ces flux dans une matrice nationale.

III

La partie III du livre comprend deux volets. Dans le premier, on retrouve la dernière entrevue accordée par le fondateur de l'analyse d'entrée-sortie, Wassily Leontief, avant sa mort survenue en 1999. Elle renseignera le lecteur néophyte sur les motivations du créateur de cette méthode d'analyse et de recherche. (Pour une vue plus générale sur Leontief, voir Dietzenbacher et Lahr, 2004.)

Les textes du second volet intitulé « Essais pour le concours Wassily Leontief 2002 », ont pour objectif de publiciser le nouveau concours de l'Association internationale, qui vise à récompenser un « jeune » économiste qui a réalisé des travaux de recherche prometteurs dans le domaine. Nous présentons les trois meilleurs essais soumis au concours pour l'obtention du prix Wassily Leontief 2002.

Daniel Wilson (de la Federal Reserve Bank de San Francisco) revient, dans le chapitre 10, sur la question de la hausse de productivité aux États-Unis en estimant, pour la première fois, la qualité de l'investissement en capital et la qualité du travail.

Dans le chapitre 11, Jan Mutl (Université du Maryland) mesure les effets d'un impôt sur les émissions de CO_2 pour les principales industries utilisatrices de charbon ; il estime que la charge des entreprises varierait principalement selon le changement technologique qu'elles auront effectué, l'impôt induisant ainsi le changement technique écologiquement désirable.

Finalement, dans le chapitre 12, on lira le texte du lauréat du prix Wassily Leontief 2002. Kazuhiko Nishimura (Université Nihon Fukushi, Japon) y utilise un modèle dynamique pour trouver le meilleur rythme de transfert de technologie du Japon vers les Philippines, industrie par industrie, afin d'y maximiser le bien-être et de minimiser les effets environnementaux.

IV

Dans les parties précédentes, il n'a été question que des textes des séances plénières de la quatorzième conférence de Montréal, textes qui traitent de l'économie mondiale, des États-Unis, de l'Europe, du Japon, des Philippines, de la Lituanie – mais pas de notre propre économie. Il nous a donc paru utile d'offrir quelques modèles et applications sur le Canada et le Québec, afin que les chercheurs et analystes d'une agence gouvernementale se rendent compte

de la pertinence des techniques d'entrée-sortie pour notre pays et en découvrir les diverses applications. Signalons que les textes appliqués au Canada sont à la fine pointe de la recherche dans le monde.

Dans ces quatre derniers chapitres, nous présentons deux outils et deux analyses. Tout d'abord, deux nouvelles matrices, différentes dans leur conception et leur objet, mais complémentaires : la première, sur le commerce entre les provinces du Canada ; la seconde, principalement centrée sur le Québec, est une matrice de comptabilité sociale. Ensuite, deux analyses de style et d'objectifs différents sont exposées.

En premier lieu, Statistique Canada, qui n'en est pas à sa première innovation en matière d'entrée-sortie, nous présente sa toute dernière innovation : au chapitre 13, Pierre A. Généreux et Brent Langen nous présentent le nouveau *tableau des flux commerciaux interprovinciaux* pour la dernière décennie. Ils nous montrent comment l'analyse matricielle peut s'appliquer aux échanges entre entités spatiales. Ce travail a notamment permis de rendre cohérent tous les comptes provinciaux et d'entreprendre le travail qui fait l'objet du chapitre suivant.

Dans le chapitre 14, Bernard Decaluwé (Université Laval), André Lemelin (Institut national de recherche scientifique), Véronique Robichaud (Commission de la coopération environnementale de l'ALENA), David Bahan et Daniel Florea (Ministère des Finances du Québec) nous proposent un tout nouveau modèle d'équilibre général calculable associé à une toute nouvelle matrice de comptes sociaux (SAM : Social Accounting Matrix), très détaillée pour le Québec et le reste du Canada – comme le suggérait Faye Duchin au chapitre 5. Ces outils sophistiqués permettent d'étudier l'évolution de l'économie du Québec tout en tenant compte de son évolution sociale et des changements du contexte international. Ce modèle différencie les types d'agents (par exemple les types de ménages), les types d'activité ou d'échange, tant au Québec que dans le reste du Canada. Grâce à ce modèle, il est donc possible de tracer les effets directs, indirects et induits entre les secteurs des deux régions et le reste du monde. Cette nouvelle matrice entrées-sorties a été construite avec (et pour) le ministère des Finances du Québec et représente un nouvel instrument d'analyse des politiques économiques.

En second lieu, deux analyses interprétatives utilisent les matrices canadiennes. Au chapitre 15, Paul Thomassin (Université McGill) et mon collègue L. Martin Cloutier (Université du Québec à Montréal) comparent divers scénarios portant sur les stratégies techniques dans l'agriculture pour atténuer les émissions des gaz à effet de serre et en mesurent les impacts économiques potentiels sur l'agriculture canadienne et les secteurs de la transformation agroalimentaire. Une fois n'est pas coutume : ils trouvent que la solution technique ayant le plus d'effet sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre en agriculture est aussi celle qui a le meilleur effet économique.

Tous les textes précédents se préoccupent de la résolution de problèmes réels et offrent des estimations de solutions possibles. Est-ce à dire que l'analyse d'entrée-sortie ne peut pas contribuer à l'avancement des sciences économiques sur le plan purement théorique ? Nullement. Premièrement, l'analyse d'entrée-sortie, ainsi que la théorie de Leontief, représente elle-même

« un pas de géant » dans la théorie économique[5]. Mais une analyse d'entrée-sortie peut aussi servir à confronter des théories économiques autres que celles de Leontief.

Ainsi, dans le dernier chapitre, mon collègue Pierre Mohnen (Université de Maastricht, Pays-Bas et du Département de sciences économiques, Université du Québec à Montréal) et Thijs ten Raa (Université de Tilburg, Pays-Bas) utilisent les matrices canadiennes pour mettre à l'épreuve la théorie économique de Schumpeter. Celui-ci semblait surtout voir dans l'œuvre de Leontief une opérationnalisation de la théorie de l'équilibre général et de la concurrence parfaite de Walras (Schumpeter, 1954, p. 1021, 1200-1201). Cependant, Mohnen et ten Raa, par une ironie de l'histoire, semblent renvoyer la balle dans le camp théorique de Schumpeter, c'est-à-dire confirmer que la R-D de position de monopole est la principale motivation économique des agents économiques.

⁂

Nous espérons que chaque lecteur, selon ses goûts et ses intérêts, pourra trouver matière à s'instruire dans ce livre. Nous n'avons pu y inclure qu'un maigre échantillon (de l'ordre de 2 %) des textes de la conférence de Montréal et que des versions abrégées de ces communications. Par conséquent, de nombreux autres thèmes et problématiques abordés pendant la conférence n'ont pu trouver place dans ce livre (voir <www.io2002conference.uqam.ca> pour une couverture plus complète de la conférence et les textes parfois plus élaborés, en anglais). Mais tous les textes publiés ici ont des caractéristiques communes, propres à l'analyse d'entrée-sortie, qu'il convient de signaler ou de rappeler au lecteur.

2. Analyses utiles d'une science praxéologique

L'utilitarisme a été le berceau du développement de l'analyse économique. La philosophie du *laisser-faire*, d'Adam Smith (1776) à Jeremy Bentham (1811), postule que de laisser chacun suivre ses propres intérêts et ses propres talents est, la plupart du temps, la meilleure manière de promouvoir l'intérêt général – ceci avec des exceptions spécifiques (par exemple, la défense nationale, l'industrie naissante, etc.). Le plus grand avantage de la science économique, par rapport aux autres disciplines des sciences sociales, est d'avoir rapidement offert des principes normatifs et prescriptifs explicites pour la gouvernance des affaires courantes. Par exemple, la suppression des entraves au commerce des biens et des services entre les êtres humains augmente la taille du marché et incite à plus de spécialisation et d'efficacité (si les coûts de coordination de ces activités diverses n'excèdent pas les économies réalisées).

Mais, curieusement, une grande partie des économistes, en ce qui concerne leur propre activité, se sont largement émancipés du principe utilitariste. Un très grand nombre, surtout ceux œuvrant dans les universités, semblent plus préoccupés de faire de la *théorie scientifique*. Les économistes

5. L'expression est de William Baumol (2000).

universitaires cherchent plus à expliquer le *pourquoi* des processus économiques qu'à appliquer leur *technique*, c'est-à-dire à démontrer le *comment* des processus économiques. Pourtant, au sein d'une formation sociale et institutionnelle donnée et d'un seul et même paradigme (le *laisser-faire*), il y a une limite aux « découvertes » scientifiques qui peuvent être faites sur les *causes profondes* du processus économique. Les économistes universitaires continuent néanmoins à rechercher principalement la reconnaissance professionnelle de leur contribution individuelle dans l'aspect *théorique* de leur discipline. Certains ont interprété cette tendance comme une émulation de la physique théorique, discipline située en haut de l'échelle scientifique depuis Newton, alors que d'autres ont mis l'accent sur le transfert vers les sciences économiques de nombreux chercheurs dont la vocation première fut les mathématiques.

Mais si nous regardons de plus près quelle est la discipline des sciences naturelles qui s'approche le plus de la science économique (et des autres sciences sociales), nous devons nous rendre à une évidence : seule la médecine humaine possède à la fois le même objet et sujet, c'est-à-dire l'être humain. Le *sujet* qui observe, explique (fait un diagnostic) et anticipe les états futurs possibles (pronostics) est le même que l'*objet* qui est observé, expliqué (diagnostiqué) et l'objet de pronostics : l'être humain. Cela est le cas tant dans les sciences sociales, économiques que médicales. Par conséquent, toutes les sciences sociales, par cette contrainte d'identité de leur sujet et de leur objet, sont *implicitement* normatives et prescriptives ; il est donc préférable qu'elles soient *explicitement* normatives et prescriptives[6].

Comme pour la médecine, l'analyse économique est évaluée en fonction de sa capacité de produire à temps (*ex ante*) des anticipations justes et utiles. Mais les limites de la prévision en sciences économiques sont… prévisibles. L'incertitude liée à ces anticipations n'est pas seulement due à une marge d'erreur dans un risque prévisible d'une expérience à variables contrôlées dont on connaît les fréquences passées (risques de décès calculés par un actuaire pour une assurance-vie à partir de statistiques médicales). Elle n'est pas non plus simplement une indétermination ontologique attribuable aux grands écarts dans les effets que de petites variations d'une seule des variables peuvent produire (comme pour la prévision du temps par les équations de première différence de Poincaré, donnant lieu à des variations chaotiques mais prédéterminées)[7]. L'incertitude des anticipations en sciences sociales et économiques sont, comme nous l'avons relevé dans la première partie, inhérentes à la nature de leur objet : les décisions humaines, individuelles et de groupes humains ; décisions faites en fonction d'actifs, de positionnements, de valeurs et d'objectifs différents ; de leurs oppositions homéostatiques (équilibrantes) ou de leur renforcement mutuel, de leurs interactions positives ou négatives. Les décideurs économiques n'attendront donc jamais d'avoir simulé tous les cas de figures possibles pour entreprendre (Shackle, 1990).

6. La discipline des sciences économiques a plus spontanément accepté la responsabilité d'être *explicitement* normative et prescriptive que les autres sciences sociales.

7. Dans les années 1990, ce type de phénomène dit chaotique fut redécouvert et fît à nouveau l'objet d'une mode dans les sciences sociales et en économie.

La simulation de scénarios, calibrés à partir d'états réels et mesurés d'interdépendance passés et actuels, permet tout au plus d'*anticiper* des états possibles, de nouvelles structures d'interdépendances[8]. Ces structures d'interdépendance sont soit en prolongement des structures actuelles, soit en discontinuité et en rupture avec ces dernières. Ce ne sont donc pas tant les chiffres exacts ou leurs proportions précises, ni même leurs marges d'erreur, qui importent[9], mais principalement la relation de ces composants entre eux, et leurs proportions relatives, dans la structure anticipée du nouvel état (ou système d'interdépendance). Ces anticipations renseignent l'acteur économique sur les nouveaux environnements futurs possibles, des états du monde que ce dernier n'aurait pas nécessairement pu anticiper. Quelles que soient les limites de ces anticipations, elles orienteront les choix et les décisions ; c'est l'objectif final de l'analyse économique. Comme le souligne Emilio Fontela « tout économiste […] est inévitablement un prospectiviste » (Fontela, 1999).

L'analyse économique a une valeur pleinement scientifique, étant donné qu'elle est capable d'expliquer et d'anticiper, et ainsi d'informer et de guider la main du décideur et du technicien. « L'économie est une science praxéologique qui génère une connaissance destinée à l'action » (Fontela, 1999). La science économique se compose donc nécessairement de tout un ensemble de *techniques,* de techniques d'aide à la décision.

Les textes réunis dans cet ouvrage acceptent la fonction essentiellement *praxéologique, technique* de l'analyse économique. Wassily Leontief disait avoir passé ses 20 premières années à essayer de comprendre *pourquoi* et *comment* l'économie fonctionnait, et il était déjà célèbre à la fin des années 1920 pour ses contributions purement théoriques[10]. Mais il disait aussi avoir passé ses 50 dernières années à aider à « améliorer » des processus économiques concrets du jour : armement des États-Unis contre Hitler, puis les effets du désarmement d'après-guerre, problèmes de transport en Italie, etc. (voir le chapitre 9 de ce livre ; Dietzenbacher et Lahr (2004)). La tradition qu'il a fondée accepte le défi d'aider à résoudre les problèmes du jour. La XIVe Conférence internationale de techniques d'analyses d'entrée-sortie ne fut pas une exception. Par conséquent, les textes de cet ouvrage se situent nécessairement dans une tradition scientifique dite « réaliste », où la théorie n'a un sens que lorsqu'elle se rapproche de la réalité observée.

8. Et il n'est nullement besoin, comme l'a expliqué Wassily Leontief dans un de ses derniers articles, d'utiliser des matrices de tailles identiques pour faire ces comparaisons de structure (Leontief, 1989).
9. La précision des chiffres, un grand nombre de décimales et les indices statistiques sont souvent illusoires étant donné, d'une part, la nature intrinsèque de l'incertitude et, d'autre part, la relative faiblesse des observations.
10. Sans doute la justesse et l'utilité des anticipations de Leontief sont-elles dépendantes d'une théorie scientifique plus exacte, rigoureuse et réaliste. Signalons que cette théorie originale, dispersée dans des articles, est peu connue et mal divulguée.

3. Une attitude scientifique réaliste

Les étudiants de la rue d'Ulm – l'École normale supérieure, qui forme la future élite scientifique française – se sont récemment révoltés contre l'identification de l'enseignement économique avec les mathématiques (et la plupart du temps, selon eux, avec de « mauvaises » mathématiques)[11]. Dans une lettre ouverte puis un manifeste, ils ont réclamé que l'analyse économique « *sorte de l'imaginaire, s'appuie sur une connaissance concrète* » des faits, des acteurs, des institutions et processus économiques réels et n'utilise des mathématiques (adaptées) que pour la « *résolution de problèmes précis* ». Ils ont eu pleinement raison. Pour ce faire, ils se sont appuyés sur les travaux de Leontief. Dans la tradition de ce dernier, en effet, l'observation mesurée et contrôlée des faits[12] doit être le point de départ incontournable de toute théorie ou analyse économique crédible. Aussi, Leontief invitait-il l'économiste à aller observer directement, à aller dans les usines, à colliger lui-même ses enquêtes, et, bien sûr, à collaborer avec les institutions statistiques.

Les abus irréalistes tant des mathématiques que des statistiques probabilistes ont découragé nombre d'étudiants de poursuivre leurs études en économie. Et c'est une perte tant pour ces talents potentiels que, selon nous, pour la société dans son ensemble. Cet ouvrage vise à offrir aux étudiants qui s'intéressent à l'économie une alternative, une série de contre-exemples. Nous voulons illustrer dans ce livre que l'analyse économique, tout en restant théoriquement et mathématiquement rigoureuse, peut être réaliste et ainsi apporter une plus-value intellectuelle à la compréhension de problèmes concrets importants.

Attardons-nous quelques instants pour tenter de comprendre pourquoi la discipline de la science économique s'est réfugiée dans l'analyse de problématiques « imaginaires ». Sans prétendre être exhaustif dans notre survol, signalons deux moments de ce faux cheminement. Ces moments, espérons-le, pourront nous servir ensuite de balises contre les écueils de nos propres excès potentiels. Selon moi, la dérive de la science économique depuis les années 1950 tient, entre autres, à deux événements :

Premier événement. Dans les années 1950, Milton Friedman, un grand économiste et statisticien, de tradition réaliste, mais reprenant l'individualisme méthodologique de Karl Popper, avait pourtant suggéré que le réalisme d'une

11. L'ironie de l'histoire veut que ce soit dans cette même école que Gérard Debreu s'imprégna jadis de l'axiomatique du groupe Bourbaki de mathématique, cherchant à réduire tous – ou la grande majorité – les théorèmes à quelques axiomes et ne trouvant sa justification qu'en elle-même, en dehors de toute autre science. Il partit ensuite, invité par la Commission Cowles pour transposer cette approche à l'économie, faisant presque de cette dernière une branche des mathématiques.

12. Contrairement à la physique ou à la chimie avec leurs laboratoires, les sciences sociales – dont la science économique – le plus souvent n'« observent » ni ne « mesurent » directement des faits, mais font des calculs sur des comptes d'auto-observations subjectives que les acteurs économiques eux-mêmes relatent à des enquêteurs d'agences statistiques ou de sondage (Bunge, 1996). La loi des grands nombres et les techniques de vérification statistique de la cohérence des réponses peuvent nous laisser espérer que ces décomptes ne sont pas trop distants d'observations directes. Sauf dans la nouvelle économie *expérimentale*, l'économiste n'observe pas *directement* le comportement réel d'acteurs.

hypothèse économique, ou supposition de départ, importait peu – à condition que l'hypothèse permette de prévoir (Friedman, 1953)[13]. Ce futur lauréat du prix Nobel d'économie fut suivi méthodologiquement par la majorité de la profession. L'économie mathématique, qui avait déjà pris son envol après Walras, poursuivit alors ses explorations spéculatives sans contrainte, sur des trajectoires sans retour[14]. La théorie économique s'est alors crue émancipée de tout réalisme dans le choix de ses modèles mathématiques (Delattre et Thellier, 1979), et ce, sans écouter les avertissements de Wassily Leontief, Tjalling Koopmans et de nombreux autres. Vers la fin de sa vie, Milton Friedman regretta lui-même que la science économique fût devenue « une branche obscure des mathématiques » plutôt que de « traiter des problèmes économiques réels » (Friedman, 1999).

De fait, un décideur ne peut pas raisonnablement utiliser de telles théories irréalistes. Car comment pourrait-il reconnaître dans l'observation des indices économiques et des guides pour ses propres décisions économiques, si les hypothèses et suppositions de base des modèles prédictifs peuvent être irréalistes, c'est-à-dire ne jamais se manifester dans les processus intermédiaires et seulement surgir à très long terme – *Deus-ex-Machina* – dans un résultat final putatif[15] ? Il ne reste alors au décideur que de faire aveuglément confiance non pas à une simple doctrine scientifique élaborée mais à un dogme : il lui faut faire un acte de foi. L'économique devient alors rapidement plus une idéologie, une foi – en concurrence avec n'importe quelle autre foi – qu'une science et technique vérifiable.

Il ne faudrait pas oublier que la tentation d'abuser des mathématiques persiste dans tous les domaines – même dans l'analyse d'entrée-sortie. Car l'analyse d'entrée-sortie peut utiliser beaucoup de mathématiques, beaucoup de différentes formes de mathématiques : l'algèbre matricielle, la programmation linéaire, la topologie, les processus de Markov, etc. Il est donc facile de se laisser tenter par la dextérité et l'esthétisme des outils mathématiques – sans toujours se soucier du réalisme de l'analogie mathématique et de l'interprétation des modèles et des résultats. Il est trop facile, comme l'a rappelé le professeur Louis de Mesnard à certains chercheurs lors de la conférence de Montréal, de se laisser emporter à faire des mathématiques qui n'ont plus de sens.

---

13. Nous avons déjà qualifié plus haut les limites, selon nous, d'une telle ambition en sciences sociales et humaines.
14. Friedman lui-même, après avoir fait ces recommandations rétrospectivement contestables, passa de plus en plus de temps non pas à la construction de modèles mathématiques mais à l'observation statistique et historique minutieuse des faits monétaires.
15. Les décideurs qui s'appuient sur de telles constructions irréalistes se créent – volontairement – un brouillard supplémentaire à l'incertitude normale des affaires. Le dernier exemple d'école en est le « *hedge fund* » *Long Term Capital Management* (LTCM) qu'utilisèrent les modèles de Robert Merton et Myron Scholes – lauréats du prix Nobel en sciences économiques – pour faire des profits gigantesques juste avant de faire faillite en août 1998, ce qui déclencha une crise financière difficile à colmater (Rubin et Weisberg, 2003).

Keynes (1921, p. 20) donnait cet avertissement :

> *Confusion of thought is not always best avoided by technical and unaccustomed expressions, to which the mind has no immediate relation to understanding ; it is possible, under the cover of careful formalism, to make statements, which, if expressed in plain language, the mind would immediately repudiate. There is much to be said, therefore, in favour of understanding the substance of what you are saying all the time, and never reducing the substantive arguments to the status of* x *or* y.

Le choix de la forme mathématique importe, car une formalisation mathématique reste une métaphore, tout comme un mot ne peut demeurer qu'une analogie. Il ne faut pas se laisser aller à utiliser n'importe quelle formule mathématique en dépit des observations et de l'interprétation possible.

Par exemple, de nombreux collègues m'ont demandé pourquoi je n'utilisais pas la matrice inverse de Leontief pour repérer les lieux les plus probables de l'activité innovatrice (DeBresson, 1996). La raison en est simple : cette formalisation ne correspondrait à aucun fait observé même individuel dans l'univers des processus d'innovation ni à aucune interprétation plausible. Les liens directs avec les fournisseurs tant d'équipement en capital ou de matériau et les premiers utilisateurs sont des faits quasi universels dans les processus d'innovation. Mais il n'y a pas de cas observés où les liaisons indirectes de troisième ordre, voire de énième ordre, ou totales, semblent contribuer à la localisation de l'innovation. Par acquit de conscience, je l'ai vérifié statistiquement. Utiliser une matrice inverse pour *expliquer* la localisation de l'innovation sans se soucier de l'irréalisme de l'hypothèse serait un pur artifice sans contrepartie interprétative dans l'économie[16].

Leontief utilise un système matriciel d'équations simultanées parce que cette analogie mathématique est isomorphe avec l'interdépendance des secteurs dans une économie. La balance d'une matrice est l'isomorphisme d'un équilibre temporaire (partiel ou général). Ainsi, dans ce cas – comme dans d'autres rares cas en science économique contemporaine –, le choix d'un modèle isomorphe permet d'en déduire de nombreuses conséquences. Parfois même sans données, il est ainsi possible de déduire mathématiquement des conclusions contraires à l'intuition (voir par exemple Baumol 1967 et Carter 1990). Calibrée sur des décomptes d'observations, l'analyse mathématique de tels modèles permet ensuite d'évaluer le poids relatif de chaque facteur, donnant lieu à une compréhension du fonctionnement d'un système complexe, que l'intuition seule est incapable de pleinement saisir. Les chapitres qui suivent apportent de tels éclaircissements.

16. De même, on peut souvent trouver une meilleure réduction des moindres carrés en ajustant ses données sur un polynôme de Fourier. Mais quelle en est l'interprétation ? Quel avantage présente ce modèle par rapport à un autre plus simple et transparent d'interprétation – même si le coefficient de détermination R^2 y est inférieur ?

Les modèles mathématiques utilisés dans certains textes de cet ouvrage sont fondés sur des isomorphismes et le décompte récurrents des faits. Ce livre, qui peut servir d'introduction aux analyses d'entrée-sortie, en reste cependant à la substance des arguments, car, dans ces versions abrégées, nous avons demandé aux auteurs de réduire la modélisation mathématique à l'essentiel[17].

L'utilisation des mathématiques, bien qu'elle impressionne bon nombre de non-mathématiciens, ne fournit en soi aucune garantie de scientificité, ni même de rigueur logique. En revanche, elle implique des responsabilités accrues lors de l'analyse économique d'entrée-sortie, tant dans le choix de modèles mathématiques isomorphe aux phénomènes à expliquer (Delattre et Thellier, 1999), dans leur calibrage aux observations que dans l'exécution des calculs. À moins d'être, comme le fut Wassily Leontief, un génie capable de rester à la fine pointe de la recherche simultanément dans plusieurs disciplines (voir chapitre 9), il vaut mieux plus modestement réduire les risques de ses propres recherches en s'associant avec des spécialistes d'autres disciplines, par exemple des mathématiciens et des statisticiens.

Deuxième événement. Un autre événement intellectuel des années 1950 encouragea, selon moi, la dérive de la discipline économique : une thèse du Norvégien Trygve Haavelmo, écrite aux États-Unis durant la Seconde Guerre mondiale, supposa tout simplement que la nature nous fournit un échantillon aléatoire (Haavelmo, 1944) – une absurdité logique que, selon l'expression de Keynes citée plus haut, l'esprit est amené à répudier immédiatement. Au départ, il ne s'agissait que d'une supposition passagère sur laquelle l'auteur se promettait de revenir ; mais il n'y revint jamais et ne relâcha pas cette supposition de départ. Sur cette supposition, Haavelmo élabora une méthodologie exhaustive justifiant l'utilisation des statistiques probabilistes – malgré le désaccord des plus grands statisticiens de l'époque. Plus tard, Haavelmo insista aussi, cependant, sur l'importance de fonder la théorie sur les observations empiriques et vice versa (Haavelmo, 1958).

Mais, cette fois, Tjalling Koopmans – qui lui-même avait pris position contre l'irréalisme instrumental de Milton Friedman – et la Fondation Cowles et son programme des universités de Yale et de Chicago y virent une « révolution » à propager. Rétrospectivement, j'y vois l'origine d'une dérive, soit l'utilisation abusive des statistiques. Ainsi toute une nouvelle génération d'économistes ne fit plus attention à la manière dont les données avaient été colligées, ordonnancées et sélectionnées, puisque dans tous les cas, l'échantillonnage aléatoire n'était plus – selon cette nouvelle école – une condition préalable de l'utilisation des statistiques mathématiques et probabilistes.

Leontief, qui fut avec Ragnar Frisch et Jan Tinbergen un des premiers économètres, ne s'y est pas laissé prendre. Il n'a jamais vu de manière d'utiliser les probabilités en analyse économique (voir le chapitre 9 de ce livre).

17. Pour les versions complètes de ces conférences, non révisées et en anglais, les lecteurs peuvent consulter le site Internet <www.io2002conference.uqam.ca/english/frameset/fs_conf_papers.html>.

Peut-être parce qu'il avait lui-même eu comme codirecteur de thèse à Berlin le grand statisticien et mathématicien Ladislaus von Bortkiewicz, il connaissait trop les écueils de la théorie des probabilités. Leontief a forcément constaté que Bortkiewicz (1898) utilisait peu de statistiques, mais surtout le raisonnement logique et les mathématiques dans ses nombreux écrits économiques. Et c'est le mathématicien que Leontief admirait en Bortkiewicz (voir chapitre 9). Par contre, Bortkiewicz avait été lui-même victime d'un argument incomplet sur sa prétendue *loi des petits nombres*. Voulant étendre la loi des grands nombres aux petits nombres, ou événements rares dans le temps – par exemple les 280 soldats de Prusse tués par les coups de sabots de leurs chevaux entre 1875 et 1994 –, il partit, comme Haavelmo plus tard, d'une supposition laissée en suspens mais jamais vérifiée ou relâchée – erreur de logique dans un raisonnement formalisé mais circulaire, une erreur de raisonnement logique relevée plus tard par John Maynard Keynes dans *A Treatise on Probability* (1921).

Quelle que soit la raison du créateur de l'analyse d'entrée-sortie de ne pas utiliser les probabilités, il existe une nette divergence entre l'approche par échantillonnage aléatoire, requis par la statistique probabiliste, et les matrices de Leontief. Un tableau – ou une matrice – économique vise à être complet ; il cherche à décrire toute la population de référence, selon l'emploi de ce terme en statistique, c'est-à-dire de toutes les relations économiques. Leontief *suppose a priori l'interdépendance* de toutes ces relations entre elles. Le défi mathématique qui fut propre à l'entreprise de Leontief dans les années 1930 – défi que même von Neumann, à l'époque, croyait impossible à relever – était, grâce aux itérations rendues possibles par l'ordinateur (à l'époque mécano-électrique), de résoudre un système d'équations à de nombreuses variables inconnues, mais toutes interdépendantes (voir chapitre 9).

Or, l'aléatoire, selon Augustin Cournot (Cournot, 1843) suppose l'indépendance des variables entre elles. Posons-nous alors cette question : *Quelles paires de matrices pourraient a priori être considérées comme indépendantes entre elles ?*

Considérons premièrement des matrices de nature et format identiques. Même les matrices entrées-sorties de pays de niveau de développement très différents (par exemple les États-Unis et le Bangladesh) ont des coefficients d'intrants (ou de colonne) qui doivent avoir des similarités, donc des interdépendances ou des complémentarités[18]. Même deux matrices de brevets d'invention par industrie d'origine et d'utilisation probable provenant de pays de niveaux de développement très différents présentent des hiérarchies techniques identiques, plus ou moins complètement représentées[19].

18. Les coefficients d'intrants mesurés en quantités physiques reflètent les contraintes des techniques employées dans les industries, les parts représentées par ces différentes techniques. Mesurés en monnaie, les coefficients d'intrants sont aussi affectés par les prix relatifs des intrants, la capacité d'utilisation, etc. Pour fabriquer une tonne de fer, quel qu'en soit le procédé, il faut du minerai de fer et du coke, même si leurs proportions et les autres intrants peuvent changer selon le procédé.
19. J'ai vérifié cette corrélation avec la banque de brevets du Canada.

Considérons deuxièmement des matrices de nature différente. Les travaux de Schmookler et Scherer (voir chapitre 7) ont montré que les matrices entrées-sorties de biens et celles de brevets sont corrélées et interdépendantes.

Peut-être que la structure des citations d'articles scientifiques classés par discipline et celle d'une petite économie à bas niveau de développement pourraient être considérées a priori comme indépendantes, et alors seulement le calcul d'indices statistiques probabilistes de comparaison avec des distributions aléatoires auraient un sens. Une hypothèse cohérente a priori mais à vérifier. Mais de tels cas sont rares.

Sans échantillons aléatoires ni supposition a priori d'indépendance, les indices des statistiques probabilistes (*F* test, *t* test…) n'ont aucun sens. Pour certains lecteurs, plus il y a de chiffres et de calculs, mieux c'est[20] ; mais fournir de tels indices n'a, dans la plupart des cas d'analyse d'entrée-sortie, aucune valeur scientifique. Les deux approches – analyse d'entrée-sortie pour la recherche d'interdépendances et probabilités théoriques supposant l'indépendance et l'aléatoire – sont issues de deux mondes très distants. Il n'est donc pas étonnant qu'il y ait des difficultés inhérentes à l'utilisation des statistiques probabilistes avec l'analyse des tableaux économiques.

Toutefois, de nombreux outils de la statistique peuvent être utiles : corrélations, régressions, forme fonctionnelle choisie par la méthode des moindres carrés, repérage des interactions entre variables (nous reviendrons sur cette dernière dans la partie suivante), etc. L'utilisation de fréquences statistiques, ou de probabilités conditionnelles (stochastiques) observées – les « *propensions* » de Keynes – est rendue opérationnelle dans l'analyse d'entrée-sortie par des matrices de coefficients, dite de *transition* dans les processus de Markov (un condensé de ces problèmes se trouve dans DeBresson, 1996, chapitres 20 et 21, p. 293-314 ; un exemple théorique se trouve dans DeBresson, 1991).

Que le lecteur habitué à l'économétrie post-Haavelmo ne soit pas surpris : dans les textes sélectionnés ici, l'utilisation des statistiques est souvent descriptive, au sens de l'observation de fréquences, rarement confrontables à des probabilités théoriques aléatoires. Elles sont toujours ancrées dans le décompte soigné et récurrent des faits par de grandes enquêtes de populations entières, le plus souvent réalisées par les bureaux de statistiques.

4. Le respect de la complexité : l'approche systémique

Les étudiants et les analystes de politiques publiques se plaignent de manière récurrente du simplisme excessif, voire caricatural, de la majorité des analyses économiques. Nombre d'analyses économiques se réduisent souvent –

20. Comme les programmes informatiques fournissent ces indices automatiquement, il n'y a qu'un effort marginal minime à les fournir. Avec les automatismes de l'informatique, le bon jugement dans le choix de l'information et des calculs est de plus en plus l'élément discriminant de la qualité de la recherche.

parcimonieusement – à ne considérer qu'au plus trois ou quatre variables. La tradition déductive de l'économie mathématique, dont le plus souvent les hypothèses et suppositions de départ sont irréalistes ou au mieux tronquent la réalité observée, s'attend ensuite à un ajustement de la réalité, riche et complexe, à son modèle normatif idéal[21]. Les différentes hypothèses et suppositions de départ, si transparentes soient-elles, se réduisent toutes à quelques variables simples. Par conséquent, ces analyses à prétention normative ne peuvent aider le décideur à se faire une opinion rationnelle et prendre une décision éclairée (Fontela, 2000). Mais la plupart du temps, ces analyses réductionnistes n'en prétendent pas moins guider les décisions d'un monde complexe.

Il existe cependant une autre tradition d'analyse économique : l'approche acceptant l'interdépendance et la complexité des systèmes. Les techniques d'analyses d'entrée-sortie mises au point en 1936 par Wassily Leontief visent à révéler la complexité d'un problème, à tenir compte de tous ses aspects, sous tous ses angles, dans ses interdépendances. L'algèbre matricielle, quand elle est utilisée, vise à mettre en lumière ces interdépendances, les effets directs et indirects, et totaux de chaque variable. En bref, ces techniques permettent de prendre en compte *tout* le système.

Que les processus économiques forment des systèmes, Adam Smith (1776) l'avait bien deviné, quand il avança que la performance d'une économie libéralisée est plus que la somme de ses composantes. Pour lui, le *laisser-faire* du commerce et de la division du travail était justifié étant donné le surplus de bien-être qui en émergeait.

Dans la théorie des systèmes, la *propriété émergente* est une condition suffisante pour prouver l'existence d'un système (Bunge, 1996). L'analyse statistique parle d'interaction entre variables et l'économétrie récente, de super-additivité ou de super-modularité.

Mais l'approche de l'analyse des systèmes ne fut développée dans les sciences qu'un siècle et demi après Adam Smith, soit dans les années 1930. Et c'est aussi en 1936 que Wassily Leontief a mis au point son premier système d'équations simultanées pour trois décennies au regard de l'économie des États-Unis (Leontief, 1936).

De nos jours, l'analyse statistique peut aider à repérer les *propriétés émergentes* des systèmes en mesurant les effets d'*interaction*, ou *sur-additif*, ce que les économètres ont récemment appelé la *super-modularité*. C'est probablement ici que l'économétrie peut apporter quelque chose de nouveau à l'analyse d'entrée-sortie de systèmes complexes et de leurs sous-systèmes.

---

21. La libéralisation inconditionnelle en toutes circonstances a ainsi fait suite, déductivement, à l'utopie des économistes néoclassiques. Selon ces derniers, le monde (riche, complexe et imparfait) devait se conformer à leurs modèles (purs, simples et parfaits). Par exemple, en finance internationale, cela a donné lieu dans les années 1980 à la déréglementation et à la démolition des institutions d'encadrement mises en place par les accords de Bretton Woods. Seul Charles Kindleberger, jeune économiste au moment de la mise en place de ces institutions après la Seconde Guerre mondiale, avait eu, à la fin des années 1970, le courage de signaler qu'il en résulterait une grande instabilité financière.

Ces techniques d'analyses d'entrée-sortie permettent plus de précision dans la mesure, dans l'identification des parties du système, dans le repérage des composantes clés, ainsi que dans le poids relatif de chaque facteur. Et ces analyses révèlent souvent que les facteurs principaux ne sont pas ceux qui sont évidents intuitivement. L'approche d'entrée-sortie offre une démarche pour décrire, mettre en ordre, analyser, expliquer et prévoir certaines conséquences inattendues, et leur ordre de grandeur – tout ce qui est nécessaire, selon Mario Bunge, pour une approche systémique réellement scientifique (Bunge, 1996).

En guise de conclusion

Nous espérons que ce livre saura convaincre tout lecteur, qu'il soit étudiant et chercheur ou analyste de politiques, que l'analyse d'entrée-sortie peut être utile, pertinente aux problèmes brûlants du jour, réaliste dans ses observations et hypothèses, rigoureuse mathématiquement, et qu'elle n'élude pas les relations complexes des systèmes. Nous croyons fermement que la tradition d'analyse économique qui est exposée dans cet ouvrage vaut la peine d'être connue.

Références bibliographiques

BAUMOL, W.J. 1967. Macroeconomics of unbalanced growth : The anatomy of urban crisis. *American Economic Review* 57 : 415-426.

BAUMOL, W.J. 2000. Leontief's great leap forward : Beyond Quesnay, Marx and von Bortkiewicz. *Economic Systems Research* 12 : 141-152.

BAUMOL, W.J., BATEY BLACKMAN, S.A., et WOLF, E.N. 1985. Unbalanced growth revisited : Asymptotic stagnancy and new evidence. *Intereconomics* (mai-juin) : 122-130.

BENTHAM, J. 1811. *Théorie des peines et des récompenses*. Londres, UK : Dumont.

BRYNJOLFSSON, E., et HITT, L.M. 2000. Beyond computation : Information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives* 4 : 23-48.

BORTKIEWICZ, L. von. 1898. *Das Gesetz der kleinen Zahlen*. Leipzig, Allemagne : Teubner.

BUNGE, M. 1996. *Finding Philosophy in Social Sciences*. New Haven, CT : Yale University Press.

CARTER, A.P. 1990. Upstream and downstream benefits of innovation. *Economic Systems Research* 2 : 241-257.

COURNOT, A. 1843. *Exposition de la théorie des chances et des probabilités*. Paris, France : Hachette.

DEBRESSON, C. 1991. Technological innovation and long wave theory : Two pieces of the puzzle. *Journal of Evolutionary Economics* 1 : 241-272. Reproduit dans *Long Waves,* Freeman, C. (dir.). 1996. Cheltenham, UK : Edward Elgar, 392-423.

DeBresson, C. (dir.) 1996. *Economic Interdependence and Innovative Activity : An Input-Output Analysis*. Cheltenham, UK : Edward Elgar.

Delattre, P., et Thellier M. (dir.). 1979. *Élaboration et justification des modèles : applications en biologie*, 2 vol. Maloine : Paris, France : Recherches interdisciplinaires.

Dietzenbacher, E., et Lahr, M. (dir.). 2004. *Wassily Leontief and Input-Output Economics*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.

Duchin, F., et Lange G.M. 1995. *The Future of the Environment : Ecological Economics and Technological Change*. Oxford, UK : Oxford University Press.

Duchin, F. 1998. *Stuctural Economics : Measuring Change in Technology. Lifestyles, and the Environment*. Washington, DC : Island Press.

Fontela, E. 1999. L'économiste en tant qu'homme d'action. Dans *Mélanges d'études économiques et commerciales en hommage aux Professeurs André Cottier et Gérald Mentha*. Genève, Suisse : Presses de l'Université de Genève, 155-165.

Fontela, E. 2000. Prix relatifs et structures de marchés : dialogue hors du temps de Luigi Solari. *Revue européenne des sciences sociale*s 40, 124 : 319-331.

Friedman, M. 1953. Methodology of positive economics. Dans *Essays in Positive Economics*. Chicago : Chicago University Press.

Friedman, M. 1999. Conversations with Milton Friedman. Dans *Conversations with Leading Economists : Interpreting Modern Macroeconomics*. Snowdown B., Vane, H. (dir.). Cheltenham, UK : Edward Elgar.

Gabus, A. 2003. *L'économie mondiale face au climat : À responsabilités accrues, opportunités nouvelles*. Paris, France : L'Harmattan.

Gille, B. 1978. *Histoire de techniques : techniques et civilisations, techniques et sciences*. Paris, France : Gallimard.

Haavelmo, T. 1944. The probability approach in econometrics. *Econometrica* 12, supplement, 1-118.

Haavelmo, T. 1958. The role of the econometrician in the advancement of economic theory. *Econometrica* 26 : 351-357.

Keynes, J.M. 1921 (et 1973). *A Treatise on Probability*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.

Leontief, W. 1936. Quantitative input and output relations in the economic system of the United States. *Review of Economics and Statistics* 18 : 105-125.

Leontief, W. 1970. Theoretical Assumptions and Non-observed Facts. *American Economic Review* 61 : 1-7.

Leontief, W. 1989. Input-output data base for analysis of technological change. *Economic Systems Research* 1 : 287-295.

London, S. 2003. Buried treasure ? *Financial Times*, p. 6 (10 décembre).

Roe, A.R. 2003. Asymmetries between rich and poor countries in financial crises responses : The need for a flow of funds approach. *Economic Systems Research* 15 : 233-257.

Rubin, R.E., et Weisberg, J. 2003. *In an Uncertain World*. New York : Random House Publishing.

SCHUMPETER, J.A. 1954. *History of Economic Analysis*, Oxford, UK : Oxford University Press.

SHACKLE, G. 1990. *Time, Expectations and Uncertainty in Economics*. Cheltenham, UK : Edward Elgar.

SMITH, A. 1776. *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*. Paris, France : Gallimard.

THE GROUP OF LISBON. 1995. *Limits to Competition*. Cambridge, MA : The MIT Press.

PERSPECTIVES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'ÉCONOMIE

Les cinq chapitres de la première partie contiennent l'essentiel des allocutions prononcées lors de la session inaugurale de la Conférence des techniques d'analyses d'entrée-sortie sur le thème principal de la conférence, soit le changement climatique. Ces contributions sont autant de suggestions et de moyens d'analyser diverses dimensions de cette problématique par les méthodes d'analyse d'entrée-sortie et des approches complémentaires, tels les modèles d'équilibre général calculables.

CHAPITRE 1

CHANGEMENTS CLIMATIQUES
Ce que les sciences naturelles et les décideurs politiques aimeraient savoir des économistes†

GORDON MCBEAN
Institut de réduction des sinistres catastrophiques
Facultés de géographie et de sciences politiques
Université de Western Ontario

CATHERINE COLEMAN
Service de conservation de l'environnement
Environnement Canada

† Allocution inaugurale prononcée à l'ouverture de la XIVe Conférence internationale de techniques d'analyses d'entrée-sortie le 11 octobre 2002.

Résumé

Ce chapitre présente, du point de vue des sciences naturelles, un survol des disciplines socioéconomiques susceptibles de fournir des informations utiles à l'élaboration de politiques publiques pour la réduction des gaz à effet de serre. En outre sont décrits succinctement les effets de l'activité humaine sur le changement climatique et le rôle de la modélisation dans le contexte du protocole de Kyoto. Ensuite, des considérations d'ordre socioéconomique sont abordées et des initiatives visant l'instauration de mesures d'atténuation des gaz à effet de serre illustrent certains efforts du Canada et d'autres pays. Finalement, des questions sur le programme de recherche économique sont soulevées et le chapitre conclut sur une énumération des ingrédients d'une contribution économique utile à long terme dans cette problématique.

1. Introduction

L'étude des changements climatiques s'est focalisée sur les préoccupations environnementales. Les preuves que les activités anthropiques sont en train de changer la face du monde ne cessent de s'accumuler. Le présent chapitre vise avant tout à donner certaines indications aux disciplines socioéconomiques susceptibles de fournir aux responsables politiques des informations utiles à l'élaboration de leurs décisions. Les chercheurs en climatologie comprenant de mieux en mieux le fonctionnement de l'atmosphère, cet exposé débute par un bref survol des données et des tendances atmosphériques pertinentes, ainsi que des nouvelles orientations politiques. Les rôles et les options politiques des différents gouvernements sont ensuite examinés, et des études complémentaires sur les réglementations sectorielles propres à l'économie de marché sont recommandées. Finalement, je relève certaines questions et problématiques que les experts économiques devraient examiner.

2. Gaz à effet de serre : aperçu et tendances

Après avoir augmenté progressivement pendant des milliers d'années, la population mondiale a connu une croissance exponentielle au siècle dernier et dépasse aujourd'hui les six milliards d'êtres humains. Il est impératif de se demander où cette croissance s'arrêtera. En outre, le rythme observé de la disparition des espèces végétales et animales a presque doublé entre 1700 et aujourd'hui. Parallèlement, le pourcentage de terres consacrées aux pâturages a également doublé et les superficies des forêts, qui, avant 1700, couvraient près de 50 % des terres, ont diminué de moitié environ. Il y a environ 25 ans, on a relevé un phénomène marquant dans le processus de fixation de l'azote, processus fondamental de la croissance des plantes : la quantité d'azote « fixée » par l'utilisation d'engrais due à l'activité humaine dépassait, pour la première fois, la quantité « fixée » par les processus naturels. Les activités humaines, et plus particulièrement le déboisement et la consommation de combustibles fossiles, ont rejeté des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ainsi, la concentration de dioxyde de carbone est passée d'environ 280 parties par million (ppm), niveau qu'elles avaient maintenu pendant plusieurs milliers d'années, au niveau actuel de 370 ppm. Si nous mesurons directement les concentrations atmosphériques, les données tirées d'échantillons de la calotte glacière (qui permettent d'évaluer les concentrations de CO_2 des 400 000 dernières années) indiquent une importante variation des concentrations atmosphériques depuis une quarantaine d'années : ces dernières sont passées d'environ 180 ppm à 310 ppm. Les niveaux actuels ont donc largement dépassé ceux affichés à toute autre date depuis 20 millions d'années. Nous avons également observé une augmentation similaire d'autres gaz à effet de serre, tels que le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O). Voilà qui rend manifeste l'influence humaine sur la planète (Moore, 2001).

Tout au long du XX^{e} siècle, les populations et leurs gouvernements ont privilégié la croissance économique, et malgré l'émergence, au cours des années 1970, d'un ethos environnemental, l'économie et l'environnement

ont toujours fait l'objet d'études largement séparées. Cependant, durant les années 1980, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, la Commission Brundtland (1987), a tenté de trouver une approche plus équilibrée. Elle a alors employé l'expression « développement durable », que l'on pourrait définir fort succinctement, en ces termes :

> L'humanité a la capacité de rendre le développement durable – afin de répondre aux besoins du présent sans compromettre les possibilités des générations futures de satisfaire leurs propres besoins.

Ce rapport, relativement optimiste, a servi de guide général à l'élaboration d'un développement futur reposant sur l'équilibre entre l'expansion économique et la protection du milieu naturel de la planète. Il visait également à assurer la durabilité conjointe à long terme des deux systèmes. En soulignant l'importance de la satisfaction des besoins futurs, ce rapport a créé une perspective à long terme sur laquelle repose l'analyse des stratégies actuelles. En 1992, des représentants de quelque 180 pays se sont réunis à Rio de Janeiro dans le cadre de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, et ont adopté l'Action 21 (Nations Unies, 1993), un plan directeur en faveur du développement durable. À la fin de l'été 2002, la plupart de ces pays se sont réunis à Johannesburg, dans le cadre du Sommet mondial sur le développement durable, afin d'évaluer les progrès accomplis. De nombreux participants et observateurs ont estimé que le bilan était négatif.

Ces mêmes gouvernements ont également signé à Rio la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC), dont l'article 2 énonce l'objectif suivant :

> […] stabiliser […] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.

Il y a lieu de remarquer que l'objectif est de « stabiliser » pour « empêcher toute perturbation anthropique dangereuse ». Le terme « dangereuse » demeure à définir, car il est clair que ce qui présente un danger pour certaines sociétés ou certains écosystèmes n'en présente aucun pour d'autres. En outre, les concepts de « délai suffisant » pour permettre une adaptation, de « production alimentaire [assurée] » et de « développement économique durable » sont mal définis. Un tel objectif à très long terme est fort ambitieux, et il n'est pas certain que nous pourrons l'atteindre.

La Convention-cadre stipule également les principes dont le texte s'inspire (énoncés à l'article 3), souligne que les États ont des « responsabilités communes mais différenciées », et que des mesures de précaution appropriées doivent être prises (« […] l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures […] »). La mise en œuvre de cette convention préconise simultanément une économie de marché exempte de toute entrave au commerce international.

Le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui a été institué en 1988 par deux agences spécialisées des Nations Unies, en l'occurrence, l'Organisation météorologique mondiale et le programme des Nations Unies sur l'environnement, joue un rôle particulièrement important dans l'évaluation des changements climatiques (Bruce, 2001). Le GIEC procède notamment à des évaluations scientifiques afin de faire le point sur l'état actuel des connaissances et d'étudier les relations entre les émissions futures, les changements climatiques futurs et leurs impacts potentiels, ainsi que les mesures d'atténuation envisageables.

Si le premier rapport d'évaluation du GIEC de 1990 était hésitant dans ses conclusions, il n'en revêtait pas moins une certaine importance aux yeux des gouvernements qui envisageaient de ratifier la CCNUCC. Le deuxième rapport d'évaluation du GIEC (1995), plus spécifique et prudent, fournissait des données pour le débat qui devait animer la IIIe Conférence des parties, organisée à Kyoto en 1997.

Le protocole de Kyoto de la CCNUCC, négocié en 1997, incite les pays industrialisés à réduire collectivement leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % sur la base de leurs émissions de 1990, et ce, d'ici 2008 et 2012 (Bernstein et Gore, 2001 ; Le Prestre et Dufault, 2001). Dans ce protocole, censé être la première version d'une série, seuls les pays industrialisés doivent respecter leurs « responsabilités communes mais différenciées ». En effet, l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est en grande partie attribuable aux activités de ces pays industrialisés. Le protocole de Kyoto porte sur six gaz à effet de serre, le plus important d'entre eux étant le dioxyde de carbone (CO_2) puisqu'il s'agit du gaz qui contribue le plus à l'augmentation anthropique de l'effet de serre. Le protocole définit en outre une série de politiques et de mesures destinées aux Parties visées à l'Annexe I (pays industrialisés), fixe des cibles et des échéanciers, et propose certaines méthodes. Étant donné que les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont le résultat net des émissions (« sources ») et de l'absorption (« puits ») des gaz, le même traitement doit être réservé aux crédits accordés au renforcement de l'absorption des gaz déjà présents dans l'atmosphère par les puits et aux crédits destinés à réduire les émissions dans l'atmosphère. Les émissions contribuant à la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, et ce, quelle que soit leur origine, le protocole convient que des mécanismes ou des accords intervenant entre des pays pourraient aider ceux-ci à respecter leurs objectifs.

Le protocole de Kyoto définit trois types de mécanismes :

- l'échange de droits d'émission, autorisé entre les pays industrialisés ;
- l'application conjointe, qui accorde des crédits aux pays qui investissent dans des pays industrialisés ;
- le mécanisme pour un développement propre, qui accorde des crédits aux pays qui investissent dans des pays en développement.

Certains pays pourraient remplir l'intégralité ou une partie de leurs engagements en utilisant les mécanismes de Kyoto, c'est-à-dire en achetant des droits d'émission aux pays disposant d'un surplus, telle la Russie, et en

ayant recours aux puits d'absorption de gaz à effet de serre. Ce faisant, la quantité réelle des émissions de gaz à effet de serre qu'ils libéreraient dans l'atmosphère resterait supérieure aux niveaux de 1990 et l'on n'observerait pas vraiment d'amélioration de la situation à ce niveau.

Après Kyoto, le troisième rapport d'évaluation du GIEC, publié en 2001, sous la direction de Watson *et al.* (2001) confirmait l'influence humaine dans les changements climatiques et concluait :

> Des preuves plus récentes et plus concluantes permettent de dire que la majeure partie du réchauffement observé au cours des cinquante dernières années est due aux activités humaines. (Watson *et al.*, 2001, p. 6)
>
> Tous les scénarios d'émissions du GIEC prévoient une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, et une élévation de la température moyenne mondiale à la surface, et du niveau de la mer au cours du XXIe siècle. (Watson *et al.*, 2001, p. 8)
>
> Le niveau de la mer et les inlandsis devraient continuer de réagir au réchauffement pendant des siècles après la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre. (Watson *et al.*, 2001, p. 23)

La prise en compte de l'échelle du temps dans le délai de réponse est cruciale pour l'étude du système climatique et la mise en œuvre du protocole. Si le dioxyde de carbone met deux à quatre ans avant de se mélanger à toute l'atmosphère, il met entre 50 et 200 ans avant de diminuer de moitié (Watson *et al.*, 2001). Comparativement, le méthane disparaît au bout de 8 à 12 ans. Quant au système climatique, il réagirait encore plus lentement à l'évolution de la teneur de l'atmosphère en CO_2 puisque la température de l'air mettrait 120 à 150 ans à réagir, et le niveau des océans plusieurs centaines, voire milliers d'années. En d'autres termes, la concentration atmosphérique devrait réagir à toute évolution des émissions de méthane en une dizaine d'années et à toute modification des émissions de gaz carbonique en une centaine d'années ; en revanche, le système climatique actuel, et plus particulièrement les océans et les calottes glacières, mettrait beaucoup plus de temps. Les écosystèmes réagiront à tout changement climatique selon une échelle de temps très variée, allant de moins de un an à un siècle, voire davantage. À titre seulement de comparaison, les échelles de temps du système socioéconomique ont été évaluées comme suit : 1 à 10 ans pour l'évolution des technologies énergétiques à usage final ; 10 à 50 ans pour les technologies d'approvisionnement énergétique ; 30 à 100 ans pour les infrastructures ainsi que pour les normes sociales et la gouvernance des affaires publiques. Ces échelles de temps spécifiques doivent donc être prises en compte dans notre processus décisionnel.

Parfois, l'incertitude pèse sur les débats entourant les questions de changements climatiques. Dans l'allocution qu'il a prononcée à l'occasion de la VIe Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), le président du GIEC, Robert Watson (2000), a rappelé que :

> Tout en reconnaissant qu'une certaine incertitude scientifique règne, l'écrasante majorité des experts scientifiques estime que le changement climatique résultant des activités humaines est inévitable.

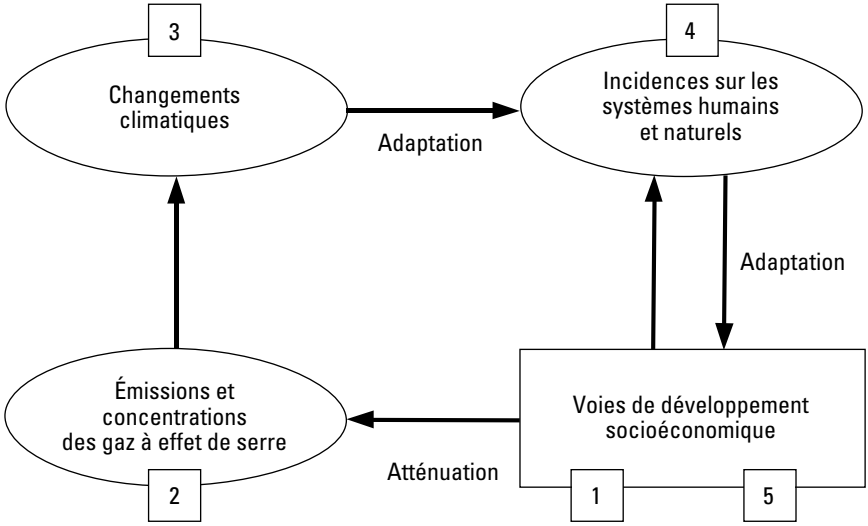
> En effet, ces dernières années, de nombreuses parties du monde ont connu de grosses vagues de chaleur, des inondations, des sécheresses, des incendies et des événements météorologiques extrêmes ayant entraîné d'importantes pertes économiques et fait de nombreuses victimes. Bien que l'on ne puisse pas lier certains événements particuliers aux changements climatiques causés par l'être humain, à en croire les prévisions, on observera un accroissement de la fréquence et de l'ampleur de ces types d'événements dans un monde plus chaud. L'un des principaux défis que devra relever l'humanité sera d'assurer des niveaux de vie équitables aux générations actuelles et futures, et notamment un approvisionnement suffisant en ressources alimentaires, hydrauliques et énergétiques, un logement sûr et un environnement sain [eau potable et air pur, par exemple]. Malheureusement, les changements climatiques anthropiques ainsi que les problèmes mondiaux liés à l'environnement, tels que la dégradation des sols, la diminution de la diversité biologique et l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, menacent notre capacité à satisfaire ces besoins de base des êtres humains.

Un nombre croissant d'États ont ratifié le protocole de Kyoto de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, mais les États-Unis, le plus gros émetteur, et l'Australie ont déclaré qu'ils s'en abstiendraient. Comme le protocole n'entrera en vigueur que lorsqu'il aura été ratifié par un nombre de pays dont les émissions totales de dioxyde de carbone représentaient en 1990 au moins 55 % du total des émissions de dioxyde de carbone, il est possible que ce protocole ne soit jamais mis en vigueur. Dans les États qui sont en train de prendre une décision à ce sujet, les spécialistes en sciences sociales, les économistes, les spécialistes en sciences naturelles, les hommes politiques et les responsables politiques font tous face à des problèmes complexes et dynamiques. Depuis la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Brundtland, 1987), de nombreux débats, généralement théoriques, ont été engagés, en vue notamment de trouver des moyens d'atténuer ou de stopper la détérioration de l'environnement sans entraver le développement économique. De nombreuses initiatives ont certes abouti, mais toutes sont de portée régionale ou agissent sur un seul secteur de l'économie. Inversement, le protocole de Kyoto, qui constitue une première étape dans la concrétisation des engagements pris en vertu de la CCNUCC, est une initiative de grande envergure et aura une influence sur la plupart des secteurs économiques, sans compter les effets qu'il devrait avoir non seulement sur les États qui l'ont signé et ratifié, mais aussi sur les pays non signataires. La nature du problème exige que l'on parvienne à un consensus à l'échelle internationale :

> Il serait inutile de procéder comme on le fait parfois et de fractionner le problème en parties, sous prétexte qu'elles sont plus faciles à gérer. Seule une approche globale axée sur la gestion des ressources environnementales et la coordination du développement durable pourra porter ses fruits. (Rosenau, 1997)

La modélisation a permis d'améliorer l'analyse des changements climatiques anthropiques et d'estimer, dans la mesure du possible, les scénarios envisagés. Par ailleurs, l'interaction complexe des facteurs climatiques et

FIGURE 1.1
Changements climatiques – Un cadre intégré
(adapté de Watson *et al.*, 2001, p. 3).



humains exige une description détaillée des entrées et des sorties ainsi que des mécanismes de rétroaction appropriés. Dans la figure 1.1, le GIEC (Watson *et al.*, 2001) propose un modèle simple, mais fort utile, qui fournit un cadre pour l'évaluation intégrée des relations de cause à effet. Ce modèle comprend les rétroactions du système, et il est constitué de quatre quadrants. Nous pouvons débuter par les sentiers du développement socioéconomique (1), qui comprend la croissance économique, la technologie, la population et les problèmes liés à la gouvernance des affaires publiques. La formule suivante permet de lier l'évolution des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) à d'autres facteurs :

$$\Delta CO_2 = \Delta(\text{pop}) \times \Delta\left(\frac{\text{PNB}}{\text{pop}}\right) \times \Delta\left(\frac{\text{énergie}}{\text{PNB}}\right) \times \Delta\left(\frac{CO_2}{\text{énergie}}\right) \qquad (1)$$

et de lier notamment les changements observés dans la démographie, le produit intérieur brut (PIB) par habitant, l'utilisation de l'énergie par PNB ou de l'intensité énergétique à l'évolution des émissions de dioxyde de carbone par unité d'énergie (l'intensité des émissions de carbone). Les discussions sur le climat ignorent généralement la variable du contrôle démographique, celle-ci étant typiquement estimée. Comme la plupart des pays veulent aussi augmenter leur PIB par habitant, l'accent est principalement mis sur l'intensité

énergétique et l'intensité des émissions de carbone. Nous savons par exemple que l'utilisation du gaz naturel, comparativement à celle du charbon, réduit l'intensité des émissions de carbone de moitié.

L'orientation de notre développement global collectif déterminera donc les émissions futures et, de ce fait, les concentrations atmosphériques. À cette étape, il nous faut également tenir compte de l'évolution des puits d'absorption de CO_2. En effet, comme il a été noté précédemment, ces concentrations se traduisent par des changements climatiques, que viennent confirmer des variations de température, l'élévation du niveau des océans ainsi que des phénomènes météorologiques encore plus extrêmes. Les systèmes humains et naturels, y compris les ressources alimentaires et hydrauliques, les écosystèmes, les établissements humains et la santé de l'homme, en subiront également les effets.

Selon le degré d'adaptation de la nature et de la gestion humaine aux changements climatiques qui leur seront imposés, ces effets seront modestes ou considérables. Ce cycle est complété par les effets dynamiques des systèmes humains et naturels sur l'orientation socioéconomique et par la rétroaction de la séparation socioéconomique de ces systèmes. Ce modèle est limité, car il propose des causes et des effets sur une échelle macro ; notons que sa description des relations est qualitative. Cependant, la synthèse de l'approche multidisciplinaire des changements climatiques qu'il présente n'en est pas moins fondamentale.

Les êtres humains peuvent réagir aux problèmes des changements climatiques de deux façons : premièrement, en adoptant des mesures d'atténuation (réduction des émissions) destinées à réduire l'impact des activités anthropiques sur l'atmosphère et, par conséquent, sur le système climatique ; deuxièmement, en préconisant l'adaptation, afin de réduire l'impact négatif et d'augmenter l'impact positif des changements climatiques. Ces deux façons devraient être considérées comme complémentaires. En effet, l'atténuation joue un rôle fondamental, car elle permet de réduire l'action de l'agent d'agression. L'adaptation, par ailleurs, s'impose dès que les mesures d'atténuation se révèlent incapables de ramener l'impact de l'agent agresseur à des niveaux acceptables. Il importe de recourir à un système de prévisions et d'analyses afin de valider les stratégies d'atténuation et d'adaptation. Ce qui semblerait être la réaction la plus évidente peut ne pas être la meilleure, lorsqu'on inclut les rétroactions et d'autres processus. Mais cela doit être fait de façon systématique : sans aucune action, on s'expose aux pires dangers.

Le GIEC a formulé certaines recommandations sur les besoins d'information et de recherche, et notamment dans le contexte de l'atténuation :

> Études des questions économiques, sociales et institutionnelles liées à l'atténuation des changements climatiques dans tous les pays. (GIEC, 2001a, p. 73)
>
> Méthodes d'analyse du potentiel des mesures d'atténuation et de leurs coûts, accordant une attention particulière à la comparabilité des résultats. (GIEC, 2001a, p. 73)

Sur le plan de l'adaptation, le GIEC a aussi formulé des recommandations pour les recherches :

> Il faut également mener des recherches destinées à mieux comprendre la façon dont les facteurs sociaux et économiques influencent l'exposition des différentes populations. (GIEC, 2001b, p. 80)
>
> On doit poursuivre les travaux afin d'élaborer et d'améliorer les modèles dynamiques basés sur les processus des systèmes économiques, naturels et sociaux ; d'estimer les modèles de paramètre des réponses des systèmes aux variables climatiques ; et de valider les résultats de la simulation des modèles. (GIEC, 2001b, p. 80)

Bien que le protocole de Kyoto comporte des mesures d'atténuation et d'adaptation, les discussions et les analyses ont essentiellement porté sur l'atténuation, et ce n'est que récemment que certains pays ont commencé à s'intéresser à l'adaptation. Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre veillent à ce que les pays, qui étudient l'éventualité d'une ratification du protocole, examinent les développements environnementaux et socioéconomiques. Le défi de la réduction des émissions de gaz à effet de serre a relancé le débat environnemental et économique, d'autant plus que les chercheurs et les responsables des politiques s'attellent à l'heure actuelle à trouver un juste équilibre entre les priorités concurrentes. L'un des principaux enjeux du protocole de Kyoto concerne la nature interdisciplinaire des recherches nécessaires à l'élaboration de scénarios sur les impacts économiques, environnementaux et sociaux, sur leurs effets sur la réduction et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, et sur les options en matière de politique publique. Un programme de recherches multidisciplinaires permet aux domaines d'étude traditionnels d'intégrer leurs théories, leurs modèles et leurs résultats à ceux d'autres disciplines.

3. Considérations socioéconomiques

Après avoir fait un tour d'horizon des tendances en matière de changements climatiques et en avoir cerné les enjeux, il est temps de passer des perspectives scientifiques aux considérations politiques et socioéconomiques. Nous examinerons donc le rôle des gouvernements dans un contexte de politique générale, ainsi que les différentes actions gouvernementales à privilégier. L'expertise des économistes revêt une importance particulière pour les gouvernements nationaux qui s'interrogent sur la façon de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines, pour trouver les stratégies d'atténuation et d'adaptation indiquées. Ils se demandent quelles informations devraient requérir les responsables des politiques auprès des spécialistes en sciences sociales et plus particulièrement des économistes.

Pourquoi les gouvernements nationaux de la Conférence des parties signataires de la Convention-cadre sur les changements climatiques doivent-ils se mobiliser au-delà des engagements qu'ils ont pris en tant qu'États en vertu du protocole de Kyoto ? Trois raisons expliquent principalement pourquoi il est important de pouvoir compter sur une autorité et une participation

forte et coordonnée. Le protocole de Kyoto est un ensemble complexe qui associe de nombreux domaines d'études ; mais il s'agit d'abord et avant tout d'un problème environnemental, qui, par son caractère d'intérêt public, relève du gouvernement. Les efforts volontaires destinés à réduire les émissions de gaz à effet de serre sont largement inefficaces. Finalement, une vision à long terme s'impose. Or, les gouvernements, plus que tout autre agent de la société, ont la capacité de penser et d'agir pour favoriser l'équité entre les générations.

Premièrement, le protocole de Kyoto et la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) visent à améliorer le bien commun qui, si l'on obtient des résultats considérables d'ici l'échéance de 2008 à 2012, serait bénéfique à tous les citoyens. La mobilisation des gouvernements nationaux est nécessaire, car comme l'a affirmé le ministre de l'Environnement du Canada, le problème des changements climatiques est une « menace qui pèse sur les biens communs », et ne peut pas être résolu temporairement (Anderson, 2002). On ne peut pas non plus demander à des entreprises privées de s'employer seules à résoudre ce problème sous prétexte qu'elles ont encouragé l'innovation, et plus particulièrement le développement technologique, alors que leur principal intérêt est de créer de la richesse. Les membres de la « société civile », tels que les organisations non gouvernementales et les organisations internationales, se consacrent à des problèmes de justice sociale, mais ne possèdent pas l'autorité pour obliger les autres à agir. Ils doivent plutôt leur efficacité à leurs recherches, à leur défense et à leur rôle de conseillers. Le Secrétaire général des Nations Unies décrit la relation entre la société civile et le gouvernement en ces termes : « C'est la société civile qui crée la démocratie et non l'inverse […] Une société civile forte favorise la responsabilité citoyenne, et permet un fonctionnement démocratique des États, des régions et des villes. Une société civile faible favorise un régime autoritaire, affaiblit la démocratie » (Annan, 1998).

Le problème de l'équité se pose également : est-il juste que certains pays ou certaines régions continuent de rejeter de nombreuses émissions alors que les impacts se feront surtout sentir dans d'autres zones géographiques ? On parlerait alors d'équité internationale. Au mois de décembre 2001, 110 lauréats du prix Nobel ont signé une déclaration dont est extrait le passage suivant :

> Le plus grand danger qui planera sur la paix dans le monde ces prochaines années découlera non pas des actes irrationnels d'États ou d'individus, mais des demandes légitimes des démunis du monde entier. La majorité des pauvres et des déshérités vivent sous des climats équatoriaux où ils mènent une existence marginale. Or, le réchauffement de la planète, qu'ils n'ont pas provoqué, mais qui est imputable à une poignée de riches, perturbera principalement leur écologie fragile […] notre action afin de lutter contre le réchauffement de la planète et la militarisation du monde. Aujourd'hui plus que jamais, l'avenir de chacun dépend de la volonté de tous. (Nuclear Age Peace Foundation, 2001)

Un autre problème est celui de l'équité intergénérationnelle : est-il juste que la génération actuelle adopte encore des pratiques susceptibles de miner et de restreindre les perspectives des générations futures ? Ne devrait-on pas plutôt appliquer le principe du développement durable ?

Deuxièmement, l'effet des mesures volontaires tend à montrer soit qu'elles sont insuffisantes, soit que leurs répercussions sur la réduction des émissions sont ignorées, et ce, alors qu'on pourrait très bien chercher dans le milieu des affaires des entreprises sensibilisées à l'écologie et prêtes à réduire leurs émissions. Cette action pourrait alors présenter un intérêt politique, surtout pour les gouvernements démocratiquement élus. Le programme volontaire au Canada de Partenaires dans la protection du climat (PPC), lancé par la Fédération canadienne des municipalités et le Conseil international des initiatives écologiques communautaires, est chargé de fournir un support technique. Les municipalités doivent suivre cinq étapes : établir le profil de leurs émissions de gaz à effet de serre ; se fixer des objectifs de réduction pour les activités municipales (on recommande une réduction de 20 % dans les 10 ans qui suivent l'adhésion au programme) ; élaborer un plan d'action locale ; le mettre en œuvre ; évaluer les progrès (Fédération canadienne des municipalités, 2002). À ce jour, 96 municipalités canadiennes se sont jointes à ce mouvement, mais il est encore trop tôt pour évaluer les progrès qu'elles ont accomplis ou mesurer leur impact sur les émissions nationales.

Un autre exemple est le Programme défi-climat Canadien (MVR : Mesures volontaires et registre inc. ; voir www.vcr-mvr.ca), qui a été créé en 1997 par le gouvernement fédéral dans le cadre du Programme d'action nationale contre le changement climatique au Canada. L'objectif de cette société, désormais indépendante, est d'encourager les entreprises et les organisations de tous les secteurs de l'économie à accepter de manière volontaire une plus grande responsabilité en ce qui concerne la production de gaz à effet de serre. Sa mission est de « mettre en place les moyens de promouvoir, d'évaluer et de reconnaître l'efficacité de l'approche volontaire de lutter contre les changements climatiques » (MVR, 2002). À ce jour, le programme MVR compte 895 organisations membres. Une étude du gouvernement sur le Processus des changements climatiques au Canada indique que ce programme et ses initiatives ont permis de réduire les émissions nationales d'environ 5 % (Groupe d'analyse et de modélisation, 1999). Toutefois, selon une analyse menée par l'Institut Pembina, organisation indépendante à but non lucratif, le programme MVR, qui constitue le programme de mesures volontaires le plus important au Canada, s'est avéré inefficace :

> [...] le programme MVR n'a pas permis d'atteindre l'objectif de réduction des émissions que le Canada doit réaliser s'il veut respecter ses engagements en vertu du protocole de Kyoto et les sociétés qui enregistrent leurs émissions dans le cadre du programme MVR ont l'habitude de procéder à une double comptabilisation des émissions. (Bramley, 2000)

Il est fort peu probable que l'on pourra respecter les objectifs de réduction en adoptant le volontariat comme stratégie principale. Malgré tout, il y aurait lieu d'encourager le volontariat tout en optant pour des mesures plus coercitives et en employant tous les moyens afin de maximiser le potentiel de réduction.

Contrairement aux entreprises et organisations privées, la plupart des gouvernements ont pour mission de fournir des biens collectifs à leurs citoyens. La souveraineté étatique étant le niveau d'autorité le plus élevé dans un système international, les gouvernements doivent coopérer pour trouver une solution aux problèmes transfrontaliers. Si les gouvernements nationaux ont adopté des idéologies et des structures fort différentes, tous n'en ont pas moins l'occasion de participer à des stratégies adaptatives, ainsi qu'à la mise en œuvre d'une solution aux changements climatiques à long terme, le protocole de Kyoto constituant un premier pas vers une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Seules quelques structures gouvernementales sont monolithiques et les signataires du protocole doivent donc examiner les différentes façons d'exécuter ces dispositions sur le plan domestique. Étant donné la portée de ce protocole, la souplesse de ses dispositions (qui proposent de nombreux moyens aux États devant respecter leurs objectifs, comme par exemple, les réductions des émissions aux sources de pollution, l'échange de permis avec d'autres signataires, les mécanismes de développement propre) et sa capacité à influencer les changements économiques fondamentaux, tous les ministères devraient être concernés par son exécution. Au moment où le développement durable commence à traduire une nouvelle façon d'envisager les enjeux économiques et environnementaux, l'entrée en vigueur du protocole va toucher la plupart des fonctions des gouvernements nationaux et son omniprésence exigera un effort à l'échelle gouvernementale pour mettre en œuvre les dispositions.

Prenons un exemple canadien pour illustrer l'ampleur de la tâche qui attend les pays devant satisfaire les cibles relativement minimes fixées par le protocole de Kyoto. D'ici 2010, le Canada doit ramener ses émissions de gaz à effet de serre à 6 % en deçà des niveaux de 1990. Cependant, si l'on se base sur les prévisions de croissance actuelles, qui se fondent sur le scénario du maintien du statu quo jusqu'en 2010, le Canada devra en réalité réduire ses émissions d'environ 30 %, d'ici 10 ans. À ce propos, on peut consulter sur Internet une série d'articles consacrés à tous les volets des changements climatiques (sciences, répercussions notamment sur la santé, et analyse économique) qui, s'ils ont été rédigés dans un contexte canadien, n'en ont pas moins une portée beaucoup plus universelle (voir le numéro spécial de *ISUMA*, 2002, disponible à : <www.isuma.net>).

Jaccard et Bataille (2002, p. 203), qui ont étudié l'ampleur des objectifs de réduction des émissions eu égard à la croissance économique, font remarquer à ce sujet :

> [...] il nous faut établir des estimations de maintien du statu quo. Si l'on prévoit une évolution naturelle de la société vers une réduction des émissions de gaz à effet de serre, les dépenses nécessaires à l'atteinte d'un objectif de réduction donné devraient être moins

> importants que dans le cas contraire. Dans les années 1990, chaque fois que l'on annonçait une nouvelle prévision des émissions de gaz à effet de serre que le Canada rejetterait en 2010, elle était beaucoup plus élevée que la précédente. En 1999, par exemple, le gouvernement prévoyait que, pour atteindre les objectifs du protocole de Kyoto, le Canada devrait réduire ses émissions de gaz à effet de serre d'environ 180 MT de CO_2 par an d'ici 2010 ; or, ces chiffres ont été revus à la hausse il y a un peu moins de deux ans et s'élèvent désormais à 240 TM de CO_2. Les estimations en matière de coûts ont également été revues à la hausse.

Les économistes ont un rôle important à jouer dans ce domaine : ils sont non seulement tenus de présenter des projections de croissance économique crédibles, mais aussi de s'efforcer de chiffrer l'incertitude.

Enfin et troisièmement, le leadership des gouvernements est indispensable à ce stade. En effet, cette convention et ce protocole constituent un point de départ dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques. Les prévisions les plus optimistes au sujet du protocole de Kyoto (voir le chapitre 3 de cet ouvrage pour une estimation) supposent que son objectif recherché sera atteint et que les pays signataires seront en mesure de respecter leurs cibles, séparément ou collectivement, et de ramener leurs émissions de gaz à effet de serre à 5 % en deçà des niveaux de 1990 d'ici 2008 à 2012 (Nations Unies, 2002). Pour autant, l'atteinte de cet objectif ne signifiera pas la disparition du problème. Les gouvernements devraient donc se préparer à assumer un leadership soutenu, notamment en poursuivant leurs efforts de réduction et en compilant davantage de données atmosphériques. Rappelons que la CCNUCC a pour deuxième objectif « la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre ». Or, les chercheurs estiment que, si l'on veut stabiliser les concentrations atmosphériques à un niveau au moins quatre fois inférieur à celui de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre avant l'ère industrielle, il faudrait réduire le volume total des émissions de gaz à effet de serre d'environ 50 % par rapport aux niveaux de 1990 (GIEC, 2001a). Dans ces conditions, des réductions draconiennes à long terme devront être envisagées : le protocole de Kyoto ne représente ainsi qu'un tout premier petit pas, sensé nous mettre sur la bonne voie.

Après que le monde politique eut commencé à s'intéresser aux changements climatiques, à l'occasion de la Conférence mondiale sur l'atmosphère en évolution, organisée à Toronto en 1988, de nombreux chercheurs ont estimé qu'il aurait été plus raisonnable de fixer des objectifs initiaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 60 %, au lieu des « cibles de Toronto » politiquement acceptables de 20 % des émissions de CO_2, d'ici 2005 par rapport aux niveaux de 1988 (Parson *et al.*, 2001). Il est difficile de prédire la réaction de l'atmosphère face à ce premier petit pas. En effet, les experts ont des opinions très partagées au sujet des différents scénarios de changements climatiques. Les politiques de réduction des émissions humaines ne font que multiplier les scénarios, et il devient alors plus difficile de faire des prévisions. À mesure que les chercheurs approfondissent leurs connaissances, le leadership des gouvernements se révèle de plus en plus crucial, car les

changements climatiques constituent un problème pour plusieurs décennies et ne peuvent être réglés qu'à long terme. La mise en œuvre du protocole de Kyoto est une première étape cruciale, mais l'engagement des gouvernements dans une perspective intergénérationnelle à long terme, non conditionnée aux exigences à court terme, est un élément fondamental pour leur leadership sur les changements climatiques.

Manifestement, les gouvernements ont un rôle crucial à jouer dans la mise en œuvre du protocole de Kyoto. Pour assurer leur leadership, ils devraient toutefois envisager la connaissance de la nature des changements climatiques à long terme sous l'angle des politiques. Il existe autant d'options de politiques disponibles que de structures gouvernementales. Ces options politiques doivent donc être évaluées selon le degré de coercition, comme l'ont fait, entre autres, Hoberg et Harrison (1994), qui ont classé les moyens d'action sur un continuum en fonction de leur capacité coercitive, en plaçant les entreprises publiques à un extrême et les mesures de persuasion morales les moins coercitives à l'autre. Entre les deux se trouvent des catégories de politiques définies et classées selon leur degré de coercition, telles que des mesures incitatives financières ou subventions, des taxes imposées en vue de promouvoir les objectifs en matière d'environnement, des incitatifs financiers dissuasifs, des dépenses directes ainsi que la réglementation traditionnelle « commande et contrôle ». S'il s'agit d'un cadre théorique plutôt simple, Hoberg et Harrison (1994, p. 120) n'en font pas moins remarquer que : « malgré sa simplicité, cette synthèse constitue un important paramètre de prévision des comportements des gouvernements ». Des limites d'ordre constitutionnel, des décisions juridiques et des choix politiques antérieurs viennent restreindre le choix des instruments politiques. En outre, selon l'idéologie et le système démocratique en place, les représentants élus préféreront opter pour des mesures permettant de répartir les coûts et de concentrer les bénéfices (Hoberg et Harrison, 1994).

À une époque où les questions environnementales sont examinées dans un contexte économique de néolibéralisme, il est plus probable que l'on adopte des stratégies politiques respectant cette approche. Bernstein et Cashore (2002, p. 212) décrivent la relation entre l'environnement et l'économie en ces termes :

> […] un complexe normatif international, adopté dans les années 1990, qui englobe l'expansion économique, le libre-échange et les forces du marché ainsi que les incitatifs comme moyens de remédier aux problèmes environnementaux globaux. En vertu de normes d'environnementalisme libéral, la protection de l'environnement repose sur la promotion et la préservation d'un ordre économique basé sur le libre marché.

Avant l'émergence de cette approche, les problèmes environnementaux et les intérêts économiques étaient totalement séparés ; désormais, ils s'inscrivent, comme la plupart des problèmes d'ordre juridique et social, dans un cadre économique. Les discussions concernant les types de mesures à adopter selon leur efficacité et leur réussite assurée sur le plan politique ont incité à privilégier une réglementation axée sur le marché. Les mesures réglementaires qui permettent aux entreprises de décider quel processus adopter

pour atteindre leurs objectifs se trouvent à peu près au centre du continuum des mesures et offrent plusieurs avantages économiques tout en permettant de poursuivre des objectifs environnementaux.

Ce genre de réglementation axée sur l'économie de marché se révèle avantageux notamment parce qu'il encourage les innovations techniques en rendant la R-D plus intéressante aux yeux des producteurs de biens et services. Il y aurait lieu aussi d'instituer un système de sanctions financières élevées afin d'inciter les producteurs à s'engager dans la recherche et ainsi stimuler les innovations durables en matière d'environnement ; sans quoi, les risques associés aux technologies émergentes pourraient paraître trop importants pour justifier les coûts. L'intervention du gouvernement ne doit pas se limiter aux sanctions ; il pourrait mettre en place un système de mesures incitatives afin d'atteindre les objectifs politiques fixés, en associant notamment une politique à un objectif environnemental. Des pays comme le Danemark et les Pays-Bas ont adopté une norme en matière d'offre d'énergie renouvelable (*renewable portfolio standard*), qui contraint les producteurs à distribuer de l'énergie créée à partir de sources renouvelables approuvées par le gouvernement. Aucun prix n'a été fixé pour les énergies renouvelables, de sorte que le marché détermine les prix et les sanctions à imposer. La pression concurrentielle est ainsi maintenue. Par exemple, une entreprise qui trouve une méthode moins chère de produire de l'électricité renouvelable gagnera de plus grandes parts de marché (Jaccard et Bataille, 2002). Les entreprises en concurrence peuvent réduire leurs coûts en s'échangeant des « certificats verts » ou des permis analogues à ceux que les États peuvent s'échanger conformément aux dispositions du protocole de Kyoto. Ces mécanismes d'énergie renouvelable ont été mis en œuvre dans certaines régions d'Amérique du Nord et d'Australie, mais leurs effets sur les émissions de gaz à effet de serre n'ont pas encore été évalués. L'application de ce régime devrait néanmoins permettre d'abaisser les coûts de l'énergie (Jaccard et Bataille, 2002).

Les normes sur les systèmes d'échappement des véhicules, instituées en Californie en 1990, constituent un système de réglementation axé sur le marché relativement bien connu. En vertu de ces normes, les constructeurs automobiles devront garantir qu'un pourcentage minimal des nouveaux véhicules mis sur le marché soient peu polluants, après une longue période de mise en place progressive. S'ils ne respectent pas ces normes, une amende de 5 000 $ par véhicule leur sera imposée. Les véhicules peu polluants, dont les taux d'émission sont inférieurs à la norme fédérale, sont regroupés sous quatre classifications différentes, et les normes les plus strictes, qui portent sur les véhicules utilitaires sport et mini-fourgonnettes, seront progressivement mises en place entre 2004 et 2009. Vingt-quatre constructeurs automobiles se sont lancés dans la production de véhicules peu polluants et devraient les mettre sur le marché dans 45 États des États-Unis avant 2003[1]. Les normes

1. *Clean Air Counts, Low Emissions Vehicles, Clean Air Counts*, Chicago, 2002. Disponible à : <www.cleanaircounts.org/factsheets/FS%20PDF/LEV%20factsheetfinal.pdf>.

sur les systèmes d'échappement des véhicules ont été conçues en vue d'améliorer la qualité de l'air, mais pourraient aussi être modifiées en vue d'atteindre les objectifs en matière de réduction des émissions.

Les normes en matière d'offre d'énergie renouvelable et les normes sur les systèmes d'échappement des véhicules sont des programmes sectoriels, ce qui présente un avantage, car ils accordent une certaine souplesse aux décideurs et leur permettent de répondre aux signaux du marché après l'entrée en vigueur de leurs mesures. Par exemple, si les coûts technologiques sont plus élevés que prévu ou si un secteur de l'économie est confronté à des difficultés liées à une technologie déjà fiable répondant aux critères du gouvernement, ce dernier peut alors prolonger la période de mise en place progressive ou ajuster ces programmes à ses exigences. Ces programmes sectoriels présentent toutefois un défaut : certains secteurs pourraient estimer que leurs coûts de conformité sont plus élevés que ceux d'autres secteurs. Les responsables politiques pourraient éviter ce genre de problèmes en procédant à des évaluations avant l'entrée en vigueur d'une politique, afin de veiller à ce que les coûts liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre soient équitablement répartis.

L'expérience des économistes jouerait un rôle essentiel en cas d'adoption de mesures sectorielles axées sur le marché, car elle permettrait de définir les coûts de R-D à l'étape précédant l'entrée en vigueur. Il serait très utile aux responsables politiques de savoir si un risque plus grand lié à l'innovation technologique pèse davantage sur certains secteurs. Au Canada, les dirigeants politiques ont approuvé un principe en vertu duquel aucune région ne doit se voir infliger de fardeau excessif. Ainsi, ce principe pourrait valoir pour tous les secteurs économiques. Finalement, les nouvelles technologies afficheront des taux de pénétration du marché différents, des taux de commercialisation élevés devant se traduire par une baisse plus rapide des coûts. En outre, si les préférences des consommateurs évoluaient vers des produits plus « écologiques », comme on peut l'espérer, on pourrait s'attendre à ce que cette tendance se reflète éventuellement dans la réduction des coûts de production.

De plus, on aura également besoin de données économiques pour respecter les dispositions du protocole de Kyoto stipulées à l'article 10 :

> Élaborent, lorsque cela est pertinent et dans la mesure du possible, des programmes nationaux et, là où il y a lieu, régionaux, efficaces par rapport à leur coût pour améliorer la qualité des coefficients d'émission, des données sur les activités et/ou des modèles locaux et reflétant la situation économique de chaque Partie, dans le but de dresser et de mettre à jour périodiquement des inventaires nationaux d'émissions anthropiques selon les sources […]

Dans le même ordre d'idées, le GIEC (2001b) fait observer que les régions et les communautés qui sont vulnérables aux changements climatiques tendent à subir la pression de l'épuisement des ressources, de la pauvreté et de la croissance démographique, et que les solutions apportées à un domaine problématique pourraient être appliquées aux autres problèmes sociaux et écologiques.

Le protocole exige également des signataires qu'ils fournissent une description générale des mesures d'atténuation et d'adaptation qu'ils adoptent à l'échelle nationale et qu'ils la mettent régulièrement à jour. Ces exigences portent sur les secteurs de l'énergie, du transport, de l'industrie, de l'agriculture, de la forêt et de la gestion des déchets. Les conséquences économiques des mesures d'atténuation et d'adaptation sont difficiles à évaluer. Toutefois, les analyses économiques devraient contenir des données approximatives de ces considérations afin de modéliser plus fidèlement les expériences du « monde réel ».

Le protocole de Kyoto soulève d'autres problèmes, notamment en ce qui concerne le système d'échange international des permis d'émission dans le cadre des mécanismes de Kyoto. En quoi ce régime d'échange affectera-t-il la réglementation des échanges internationaux, telle qu'elle a été établie dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) par exemple ? Le protocole de Kyoto et le CCNUCC tentent-ils, en un sens, d'instaurer un nouveau régime et marché d'échange ? Pour ce qui est du Canada, au moment de ratifier le protocole, il ne devra pas oublier qu'il relève d'un régime d'échange (l'Accord de libre-échange nord-américain) et qu'il sera son seul membre à être lié par le protocole de Kyoto. Le Canada a d'ailleurs fait valoir que l'entrée en vigueur du protocole devrait tenir compte de cette relation qu'il a établie avec les États-Unis ainsi que des grandes quantités d'énergie « propre » qu'il exporte vers ce pays.

L'établissement de modèles économiques repose en grande partie sur des hypothèses et des principes qui n'ont pas été suffisamment clarifiés. Or, les responsables des politiques et les spécialistes en sciences sociales doivent discuter de ces questions fondamentales de façon à ce que les économistes puissent intégrer ces paramètres aux scénarios socioéconomiques fondés sur les changements climatiques. L'équité est un principe clé, mais chacun est en droit de se demander si tous les secteurs et les régions en bénéficient également. Comment devrait-on traiter une région ou un secteur qui traditionnellement a toujours très peu contribué aux émissions anthropiques ? Cette région devrait-elle assumer une responsabilité partielle ou recevoir une compensation en reconnaissance pour avoir toujours émis de faibles quantités de gaz à effet de serre ? Ne devrait-on pas tenir compte de l'estimation de ses niveaux d'émission futurs ? Dans l'affirmative, comment procéderait-on pour l'intégrer à un modèle ? Serait-ce possible ? Il y aurait également lieu de faire preuve d'impartialité dans la répartition des coûts entre les entreprises et les citoyens et de ne pas oublier que les entreprises font généralement payer la facture des coûts associés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre aux consommateurs. Les consommateurs devraient-ils d'ailleurs assumer une partie de l'augmentation des coûts sous la forme de hausse des prix des biens et services ? Une autre option consisterait à instaurer une « taxe écologique ». Malheureusement, comme il a été mentionné à plusieurs reprises, celle-ci aurait tendance à freiner outre mesure les perspectives de croissance économique. Devrait-on accorder un plus grand rôle aux consommateurs, en plus de leur faire supporter les hausses des prix dans les points de vente ? Comment leurs prévisions des futures émissions pourront-elles être prises en compte ? Dans

un régime fédéral comme celui du Canada, par exemple, le rôle des gouvernements provinciaux et fédéral et leurs considérations économiques respectives peuvent constituer un facteur important. Au Canada, des chefs de gouvernement du fédéral, des provinces et des territoires (les premiers ministres) ont convenu dans le cadre d'une réunion que :

> Certaines approches visant à atteindre nos objectifs en matière de changements climatiques pourraient obliger certaines régions du pays à porter un fardeau déraisonnable. Toutefois, les premiers ministres ont convenu qu'aucune région du pays ne serait tenue de porter un fardeau déraisonnable, de sorte que tout plan utile doit respecter cette condition. (Gouvernement du Canada, 2002)

Pour respecter ses engagements en vertu du protocole de Kyoto, le Canada pourra recourir à trois instruments d'intervention : 1) l'échange de droits d'émissions intérieur ; 2) les mesures ciblées ; 3) l'achat par le gouvernement de permis internationaux. Bien qu'une analyse très détaillée à ce sujet ait déjà été menée, il est évident que l'on devra effectuer une analyse en profondeur avant de décider du bon dosage de ces instruments et de la façon de les appliquer. D'autres considérations n'ont pas été mentionnées ; en l'occurrence, les bénéfices connexes que l'on pourrait tirer de toute approche adoptée en vue d'atteindre les objectifs de Kyoto. Ainsi, la réduction des pollutions urbaine et régionale, largement dues à la consommation de combustibles fossiles, permettrait d'améliorer la santé et de tirer parti d'autres bénéfices, et notamment d'entamer les transformations industrielle et sociale nécessaires. Des économistes devraient mener des études plus approfondies sur ces bénéfices connexes (air plus propre, meilleure santé des êtres humains et avenues de développement économique), ce qui permettrait de déterminer les coûts réels des mesures de lutte contre les changements climatiques.

Toute analyse devrait en outre tenir compte de l'avis des consommateurs, qui estiment généralement que les technologies constituent un substitut imparfait. En effet, les consommateurs feront la différence entre des produits concurrentiels : un système d'incitatifs financiers et de sanctions devrait donc être mis en place afin de modifier leur comportement d'achat. Défaut souvent associé à la modélisation, le fait de ne pas tenir compte du « surplus des consommateurs », la valeur supplémentaire attribuée aux technologies préférées, pourrait induire à sous-estimer des coûts engendrés par l'application des mesures de réduction d'émission de gaz à effet de serre (Jaccard et Bataille, 2002).

Les chercheurs en climatologie reconnaissent qu'il est beaucoup plus facile de prévoir et de modéliser le temps normal et les activités climatologiques que les désastres naturels. Or, les désastres continuent de survenir, et à mesure que les effets des changements climatiques s'aggravent, on observe une fréquence accrue de certains types de catastrophes, tels que les inondations et la sécheresse, qui ne sont, toutefois, pas plus prévisibles que ceux qui surviendraient si aucun changement climatique ne s'était fait sentir. Étant donné que les coûts associés à chaque désastre continuent d'augmenter, on pourrait incorporer le facteur risque aux modèles économiques et l'étaler sur une période pluriannuelle ou décennale. Cette analyse des questions climatiques

menée sur des périodes plus longues pose de nombreux défis pour les économistes. Quel degré d'exactitude peut-on attendre de prévisions économiques menées sur des périodes aussi longues ? Peut-on élaborer des modèles économiques pour comprendre la réaction des systèmes économiques aux forces externes ? Les modèles climatiques illustrant la réaction du système climatique à des forces externes imputables aux émissions anthropiques ou aux éruptions volcaniques peuvent-ils servir d'exemple ? Le recours à des taux d'escompte standards a tendance à atténuer l'importance des événements futurs, ce qui vient compliquer l'analyse des stratégies d'adaptation au climat. Des solutions à ces problèmes à long terme permettraient-elles d'augmenter l'exactitude des données futures plus que les analyses actuelles ne le laissent paraître ?

4. Conclusion

De nombreuses questions liées aux changements climatiques ont déjà fait l'objet d'études. Des experts économiques, ou même des non-initiés, ont donc pu jeter une lumière nouvelle sur ces questions et les clarifier, améliorant ainsi le travail des économistes. Mais il reste encore à mener de nombreuses analyses, en raison de la complexité inhérente aux études multidisciplinaires, mais aussi de la dynamique de ce domaine. À mesure que progressent nos connaissances en matière de changement climatique, le nombre d'occasions d'agir augmente. Les économistes doivent donc prendre part non seulement aux débats nationaux, mais aussi aux projets d'envergure internationale tels que ceux du GIEC et de l'IHDP (International Human Dimensions Program on Global Environmental Change, voir : <www.ihdp.org>), portant entre autres sur le changement institutionnel et industriel. Leur contribution serait en effet fort utile. Si les coûts d'une mise en œuvre rapide des mesures de réduction (entre 2008 et 2012, pour respecter par exemple la période d'entrée en vigueur du protocole), sont incontestablement plus élevés que ceux d'une mise en place progressive, le report de l'entrée en vigueur serait d'autant moins soutenable. En effet, la mise en œuvre intégrale des dispositions du protocole de Kyoto permettra de reporter d'une dizaine d'années le doublement de la teneur de l'atmosphère en CO_2 (McBean, 2002). Cependant, il faut rappeler que le protocole de Kyoto n'est qu'une première étape.

Références bibliographiques

ANDERSON, D. 2002. *Discours du Ministre canadien de l'Environnement,* 27 septembre.

ANNAN, Kofi. 1998. *Discours : The Emerging Power of Civil Society,* 14 juillet. Genève, Suisse : Nations Unies. Disponible à : <www.un.org/News/Press/docs/1998/19980714.sgsm6638.html>.

BERNSTEIN, S., et CASHORE, B. 2002. Globalization, internationalization, and liberal environmentalism. Dans *Canadian Environmental Policy,* Second Edition, VanNijnatten, D.L., Boardman, R. (dir.). New York : Oxford University Press.

BERNSTEIN, S., et GORE, C. 2001. Revue des impacts politiques du protocole de Kyoto pour le Canada. *Isuma* 2 : 26-36.

BRAMLEY, M. 2000. *Greenhouse Gas Emissions from Industrial Companies in Canada : 1998*. Calgary, AB : Institut Pembina. Disponible à : <www.pembina.org/climate_change.asp>.

BRUCE, J.P. 2001. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat et le rôle de l'évaluation scientifique dans les politiques. *Isuma* 2 : 11-15. Disponible à : <www.isuma.net>.

BRUNDTLAND, G.H. (World Commission on Environment and Development). 1987. *Our Common Future*. Oxford, UK : Oxford University Press.

FÉDÉRATION CANADIENNE DES MUNICIPALITÉS. 2002. *Les étapes du PPC, Partenaires dans la protection du climat*. Ottawa, ON : Fédération canadienne des municipalités, Ottawa. Disponible à : <www.fcm.ca/scep/support/PCP/pcp_milestones-f.htm>.

GROUPE D'ANALYSE ET DE MODÉLISATION. 1999. *Perspectives des émissions du Canada : une mise à jour*. Ottawa, ON : Processus national sur le changement climatique. Disponible à : <www.nrcan.gc.ca/es/ceo/outlookfr.pdf>.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC). 2001a. *Bilan 2001 des changements climatiques : Mesures d'atténuation*. Disponible à : <www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/wg3sum.pdf>.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC). 2001b. *Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptations et vulnérabilité*. Disponible à : <www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/wg2sum.pdf>.

GOUVERNEMENT DU CANADA. 2002. *Document de discussion sur la contribution du Canada à la lutte contre les changements climatiques*. Ottawa, ON : Gouvernement du Canada. Disponible à : <www.climatechange.gc.ca/french/actions/what_are/canadascontribution/Report051402/frenchbook.pdf>.

HOBERG, G., et HARRISON, K. 1994. It's not easy being green : The politics of Canada's Green Plan. *Canadian Public Policy* 20 : 119-137.

JACCARD, M., et BATAILLE, C. 2002. *If Sustainability is Expensive, What Roles for Business and Government ? Options for GHG Reduction Policy in Canada*. Burnaby, BC : Simon Fraser University.

LE PRESTRE, P., et DUFAULT, E. 2001. Le Canada et le protocole de Kyoto. *Isuma* 2 : 37-44. Disponible à : <www.isuma.net>.

MCBEAN, G. 2002. *The Next 50 Years : Is Sustainability Possible ?* London, ON : University of Western Ontario.

MESURES VOLONTAIRES ET REGISTRE INC. 2002. *Qui sommes-nous ?* Disponible à : <www.vcr-mvr.ca/mvr-013.cfm>.

MOORE, B. 2001. *Challenges of a Changing Earth*. Disponible sur : <www.sci-conf.igbp.kva.se/fr.html>.

NATIONS UNIES. 1993. *Le développement durable et l'Action 21*. Disponible à : <www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/french/action0.htm>.

NATIONS UNIES. 2002. *Protocole de Kyoto de la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, article 3*. Genève, Suisse : Nations Unies. Disponible à : <unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.

NUCLEAR AGE PEACE FOUNDATION. 2001. *Déclaration des lauréats du prix Nobel à l'occasion du centenaire du prix Nobel.* Stockholm, Suède : Nuclear Age Peace Foundation.

PARSON, E.A., DOBELL, R., FENECH, A. MUNTON, D., et SMITH, H. 2001. Leading while keeping in step : Management of global atmospheric issues in Canada. Dans *Learning to Manage Global Environmental Risks, Vol. 1*, Clark, W.C, Jeager, J., van Eijndhoven, J., Dickson, N. (dir.). Cambridge, MA : MIT Press, chapitre 10.

ROSENAU, J.N. 1997. *Along the Domestic-Foreign Frontier : Exploring Governance in a Turbulent World.* New York : Cambridge University Press.

WATSON, R.T. 2000. *Report to the Sixth Conference of the Parties of the United Nations Framework Convention on Climate Change,* 20 novembre. Disponible en anglais à : <www.ipcc.ch/press/sp-cop6-2.htm>.

WATSON, R.T., *et al.* (dir.). 2001a. *Changement climatique 2001 : Rapport synthèse, Résumé à l'intention des décideurs.* Disponible à : <www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/spm.pdf>.

CHAPITRE 2

MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL CALCULABLES APPLIQUÉS À L'ÉCONOMIE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RESSOURCES†

KLAUS CONRAD
Université de Mannheim

† Une version anglaise de ce texte présenté le vendredi 11 octobre 2002 lors de la séance d'ouverture de la XIVe Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie est disponible à <www.io2002conference.uqam.ca/abstracts_papers/IOPapers/Conradresource1-ab.pdf>.

Résumé

L'objectif de ce chapitre est d'offrir une vue d'ensemble de la théorie et de l'application des modèles d'équilibre général calculables (MEGC) appliqués à l'économie de l'environnement et des ressources. Si les MEGC ne peuvent servir à anticiper les cycles économiques, ils donnent néanmoins une idée de l'ampleur probable des changements résultant d'une politique délibérée, à partir de certaines conditions de base. Ils sont en outre indispensables au classement des politiques alternatives en matière d'environnement. Dans ce chapitre, l'importance relative des modèles d'équilibre généraux et partiels, et l'avantage des MEGC sur les autres modèles macroéconomiques, dont les modèles standards d'entrée-sortie, sont analysés. Les modèles de comportement du producteur et du consommateur, ainsi que ceux des changements technologiques, des technologies d'atténuation et des échanges commerciaux y sont décrits. Ensuite, plusieurs simulations d'économie environnementale fondées sur l'utilisation des MEGC sont résumées. Ce chapitre passe en revue les analyses des MEGC liées à l'environnement qui se sont intéressées à des sujets tels que le réchauffement de la planète, le coût de la réglementation de l'environnement à l'aide de différents instruments et le problème des doubles dividendes. Finalement, certains modèles examinant l'interaction entre l'environnement et le rendement économique sont abordés.

1. Introduction

Les interactions de l'équilibre général sont importantes pour évaluer les coûts d'efficacité des politiques en matière d'environnement. Ces modèles estiment une hausse des coûts de production, la distorsion des facteurs de marché et des coûts sociaux plus élevés que ceux des modèles d'équilibre partiel. Même si les modèles d'équilibre général calculables (MEGC) ne peuvent être utilisés pour anticiper les cycles économiques, ils sont indispensables pour classer les différentes politiques alternatives. La théorie de l'équilibre général permet aux économistes d'évaluer les résultats qualitatifs et l'effet sur le bien-être d'un instrument politique donné. Toutefois, généralement, la théorie de l'équilibre général seule ne permet ni de déterminer le signe de l'incidence nette des interactions, ni de classer selon leurs répercussions sur l'économie des politiques alternatives en matière d'environnement.

2. Équilibre partiel, modèles d'équilibre général calculables (MEGC) et modèles macroéconomiques

Les politiques visant à atténuer de façon significative les problèmes environnementaux (dégradation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol ou dévastation de la Terre) entraînent des coûts liés à :

- une plus faible croissance du produit intérieur brut (PIB) ;
- une réduction de la compétitivité sur le plan international ;
- une diminution de l'emploi.

Ces politiques engendrent des modifications de prix relatifs qui ont par la suite des répercussions sur l'équilibre général de l'économie tout entière. Les modèles d'équilibre partiel rendent possible l'estimation des coûts associés aux mesures environnementales lorsqu'ils tiennent compte des processus de substitution de la production et de la consommation. Mais les MEGC tiennent compte des ajustements dans tous les secteurs, permettent de prendre en considération les interactions des marchés d'intrants intermédiaires et établissent le lien entre les revenus et les dépenses de consommation.

3. Des modèles d'entrée-sortie (E-S) aux modèles d'équilibre général calculables (MEGC)

Un modèle d'entrée-sortie (E-S) statique décrit le rapport entre l'offre X_i d'un secteur industriel i, les demandes intermédiaires de toutes les industries j ($j = 1, \ldots, n$) de biens provenant du secteur i, soit X_{ij} et la demande finale FD_i :

$$X_i = \sum_{j=1}^{n} X_{ij} + FD_i, \qquad i = 1, \ldots, n. \tag{1}$$

Selon la supposition des coefficients d'entrée fixes de Leontief,

$$X_{ij} = \alpha_{ij} \cdot X_j, \qquad i, j = 1, \ldots, n \tag{2}$$

on peut récrire (1) comme suit :

$$X_i = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij} \cdot X_j + FD_i. \tag{3}$$

Selon la demande finale, on peut résoudre l'équation (3) pour connaître la production X_i. Les prix PX_i se calculent avec l'équation suivante :

$$PX_j \cdot X_j = \sum_{i=1}^{n} PX_i \cdot X_{ij} + PL \cdot L_j + PK \cdot K_j \tag{4}$$

En utilisant (2), on obtient :

$$PX_j = \sum_{i=1}^{n} PX_i \cdot \alpha_{ij} + PL \cdot \alpha_{Lj} + PK \cdot \alpha_{Kj} \tag{5}$$

où les prix de la main-d'œuvre, α_{Lj}, et du capital, α_{Kj}, sont exogènes. La principale caractéristique concerne les coefficients d'entrée puisqu'ils ne dépendent pas des prix et que ces derniers, calculés en faisant une moyenne arithmétique des coefficients d'entrée exprimés en poids, n'ont aucun effet sur l'économie.

Le caractère dual d'une technologie, démontré par Shephard (1953), permet tout comme son lemme de dériver les coefficients d'entrée de minimisation des coûts pour obtenir une dérivée partielle de la fonction du coût unitaire par rapport à la production d'un secteur industriel. Le modèle d'entrée-sortie, nous le verrons plus loin, est incorporé aux MEGC pour décrire les échanges intersectoriels.

Dans un MEGC dual, la technologie d'une industrie visant la minimisation des coûts se caractérise par une fonction de coût C,

$$C_j = C_j(X_j, w, PL, PK) \qquad j = 1, \ldots, n \tag{6}$$

où w est le vecteur prix des facteurs intermédiaires. Les coûts obtenus sont alors

$$C_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot X_{ij} + PL \cdot L_j + PK \cdot K_j. \tag{7}$$

Selon la supposition des rendements constants à l'échelle, $c_j = C_j(1, w, PL, PK)$ est la fonction du coût unitaire et $C_j = X_j \cdot c_j(w, PL, PK)$.

À partir du lemme de Shephard, nous pouvons dériver des fonctions de demande et obtenir des coefficients d'entrée :

$$\frac{X_{ij}}{X_j} = \frac{\partial c_j(\cdot)}{\partial w_i}, \qquad i = 1, \ldots, n, \qquad \frac{L_j}{X_j} = \frac{\partial c_j}{\partial PL}, \qquad \frac{K_j}{X_j} = \frac{\partial c_j}{\partial PK}. \tag{8}$$

En supposant la maximisation du profit et une concurrence parfaite (PX = MC) :

$$PX_j = c_j(w, PL, PK). \tag{9}$$

Cette condition où le prix correspond au coût moyen peut être utilisée afin de déterminer le système de n prix de production. Comme le vecteur prix w des facteurs intermédiaires est exactement le vecteur prix (PX_1 ,..., PX_n) des prix de production, l'équation (9) pour le secteur j devient :

$$PX_j = c_j(PX_1, \ldots, PX_n, PL, PK), \qquad j = 1, \ldots n. \tag{10}$$

Ce système de n prix peut être résolu à partir des prix de la main-d'œuvre et du capital.

Pour déterminer la production X_j, influencée par le système de prix, il faut substituer $X_{ij} = X_j \dfrac{\partial\, c_j(\cdot)}{\partial\, PX_i}$ de (6) pour X_{ij} de l'équation (1). L'équation devient alors :

$$X_i = \sum_j X_j \frac{\partial\, c_j(\cdot)}{\partial\, PX_i} + FD_i, \qquad i = 1, \ldots, n. \tag{11}$$

Ce système X de n équations à n inconnues peut être résolu si la demande finale est connue. Le modèle d'entrée-sortie de Leontief est un cas spécial de ce modèle dual, ou orienté vers les coûts, mis de l'avant par Johansen et Jorgenson. Si la fonction du coût unitaire de l'équation (10) est une moyenne arithmétique du prix des intrants, comme exprimé par l'équation (9), alors (11) est identique au modèle de Leontief.

Les MEGC élaborés selon la méthode primale de production ont été utilisés par Shoven et Whalley (1973, 1984). Dans l'optique primale, aussi bien la demande que l'offre dépendent explicitement des prix qui sont déterminés par la correspondance offre–demande. Dans l'optique duale, le fournisseur fixe le prix du marché de son produit à partir du coût moyen.

Néanmoins, en principe, quelle que soit l'approche envisagée, l'équilibre doit être unique et les fonctions de coût et de production utilisées autoduales (Cobb-Douglas ou fonction d'élasticité de substitution constante [CES]). L'économie de bien-être appliquée est à l'origine des modèles de type Shoven-Whalley tandis que ceux de type Johansen-Jorgenson proviennent de l'analyse d'entrée-sortie.

Préciser les formes des fonctions de production ou de coût dépend de l'option choisie : soit l'aspect économétrique, soit de calibrage du MEGC. D'une part, l'aspect économétrique requiert des séries chronologiques ou des données transversales pour estimer statistiquement les paramètres inconnus. D'autre part, le calibrage peut faire appel à un mélange de résultats économétriques en plus d'autres données recueillies dans la documentation. Lorsque le choix se porte sur l'économétrie, on peut utiliser des formes fonctionnelles flexibles des fonctions de coût, comme les translog ou les spécifications généralisées de Leontief.

En général, le calibrage des paramètres des MEGC vise à ce que les observations d'une seule année soient suffisantes. Il est préférable d'utiliser une série de fonctions CES imbriquées qui comportent toutefois quelques coefficients d'entrée fixes comme intrants. Selon cette méthode, l'élasticité de substitution sera approximée et les paramètres de distribution reposeront sur l'année sélectionnée pour le calibrage.

L'élasticité de substitution induite par le prix constitue un paramètre clé qui affectera les coûts économiques et les bénéfices environnementaux. En général, les catégories de facteurs et les niches d'une structure de production imbriquée devraient être sélectionnées selon le but visé par le modèle. Dans un pays en développement qui dépend de l'agriculture, de la pêche et des forêts, les niches utilisées dans un modèle fondé sur l'énergie pourraient ne pas être les mêmes que dans une analyse commerciale ou environnementale.

4. Comportement du producteur

Les MECG diffèrent les uns des autres quant aux prévisions et à l'horizon de planification, au choix optimal des investissements, avec ou sans coûts d'ajustement, à l'attitude face aux changements technologiques puis à l'incorporation d'activités de réduction.

Dans les MEGC de première génération, les producteurs sont reconnus pour avoir des anticipations statiques, les anticipations dynamiques étant calculées avec une procédure cumulative récursive. Leur capital est fixe à court terme et variable à long terme. Par ailleurs, les investissements ne sont définis ni par le comportement économe des particuliers, ni par celui d'un gestionnaire qui maximise la valeur de l'entreprise (la théorie Q de l'investissement de Tobin, 1969). Dans les modèles de nouvelle génération entièrement dynamiques, les décisions relatives aux investissements se fondent sur des espérances (rationnelles ou parfaites) et sur le comportement d'optimisation intertemporelle.

Un avantage important de ce cadre d'optimisation intertemporelle est représenté par l'égalité a posteriori nécessaire entre l'investissement et les économies qui peut être garantie, ce qui n'est pas le cas avec la méthode d'accumulation de capital rétrospective (Dewatripont et Michel, 1987). C'est pourquoi aucune règle de fermeture de modèle ne doit être choisie, c'est-à-dire qu'aucune des contraintes du modèle ne doit être modifiée pour trouver une solution lorsque tous les marchés sont en équilibre. Une telle variable résiduelle servant ainsi à fermer le modèle pourrait être l'investissement, le budget national ou la balance commerciale. L'identité a posteriori entre l'investissement brut et les économies nettes constitue une règle de fermeture de modèle ; voir, par exemple, l'article de Hudson et Jorgenson (1974), le modèle GREEN ou certaines versions de GEM-E3.

5. Comportement du consommateur

Dans la plupart des MEGC, l'analyse porte principalement sur les questions d'efficacité. Tous les consommateurs sont alors regroupés en un seul consommateur représentatif et celui-ci, par prévision parfaite, maximise la somme actualisée de l'utilité pour une période donnée. Cette somme représente la « consommation totale » (FC : *full consumption*) constituée des biens de consommation et de loisir :

$$U_t = \sum_{\tau=t}^{\infty} (1+s)^{t-\tau} \frac{\sigma}{\sigma-1} FC_s^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \qquad (10)$$

σ représente l'élasticité de substitution intertemporelle de FC et s, le taux de préférence pour le présent. FC est un indice de quantité qui prend la forme d'un agrégat, pour une période donnée, de consommation de biens (C_t) et de loisir (LJ_t) : $FC_t = FC(C_t, LJ_t)$. Déterminer FC peut être vu comme la première étape du processus d'allocation d'un consommateur. À la seconde étape, c'est le consommateur qui décide comment répartir FC entre C_t et le temps de loisir LJ. La différence entre la quantité de loisir consommée et le temps total des ménages détermine l'offre en main-d'œuvre. C'est également à cette étape que les économies sont établies. Elles sont représentées par la différence entre le profit courant de l'offre de capital et de main-d'œuvre, d'une part, et les dépenses de consommation personnelles, d'autre part. Au dernier stade du processus budgétaire, C_t est réparti entre plusieurs catégories de consommation.

Puisque la réglementation en matière d'environnement a des effets sur l'achat et l'utilisation de biens de consommation durables, tels que des voitures, des appareils électriques ou de chauffage, un modèle de comportement du consommateur devrait accompagner une demande pour les biens durables et non durables.

Pour évaluer les effets distributifs de politiques visant à restreindre la pollution de l'air, une ventilation en plusieurs types de ménages pourrait être utile.

Ce qui caractérise le processus d'allocation intratemporel de C_t en différentes catégories, c'est le système linéaire des dépenses, les fonctions CES imbriquées ou les fonctions translog de demande. On retrouve dans l'article de Conrad et Schröder (1991) un système linéaire des dépenses qui se fonde sur une fonction des dépenses réduites utilisant des biens de consommation durables en tant que capital quasi fixe.

6. Commerce extérieur, offre et demande intérieures

Si tous les pays instauraient des politiques environnementales plus rigoureuses, la répercussion sur leur PIB et sur leurs prix relatifs varierait d'un pays à l'autre. Il en résulterait une modification de leurs structures commerciales et

de leur production intérieure. Par ailleurs, étant donné que le coût des mesures environnementales diminue quand le nombre de pays les instaurant augmente, il devient important de modéliser leurs effets sur la compétitivité internationale en rendant le commerce extérieur endogène.

La plupart des MEGC permettent à la structure commerciale de s'ajuster aux mesures environnementales. Comme le commerce bilatéral prévaut, l'hypothèse d'Armington (1969), selon laquelle les biens produits à l'intérieur d'un pays et ceux produits à l'extérieur ne forment pas de parfaits substituts, est généralement adoptée afin de simuler les échanges intersectoriels. Les entreprises font des substitutions dans les produits nationaux X et dans les articles d'importation IM afin de minimiser le coût associé à l'obtention d'un article composé Y.

À partir d'une fonction de coût, la proportion de X dans le composé Y se dérive avec le lemme de Shephard :

$$\frac{\mathrm{X}}{\mathrm{Y}} = cx \cdot \left(\frac{\mathrm{PY}}{\mathrm{PX}}\right)^{\sigma} \tag{11}$$

tout comme la masse des importations, dans les articles composés

$$\frac{\mathrm{IM}}{\mathrm{Y}} = (1 - cx)\left(\frac{\mathrm{PY}}{\mathrm{PIM}}\right)^{\sigma} \tag{12}$$

Y est déterminé dans la partie entrée-sortie du MEGC, c'est-à-dire de

$$\mathrm{Y}_i = \sum a_{ij}\mathrm{X}_j + \mathrm{FD}_i = \sum a_{ij} \cdot \left(\frac{\mathrm{X}_j}{\mathrm{Y}_j}\right) \mathrm{Y}_j + \mathrm{FD}_i \tag{13}$$

où la part dépendante du prix $\mathrm{X}_j/\mathrm{Y}_j$ est calculée à partir de l'équation (11).

Si les MEGC sont liés par les flux commerciaux, alors le PIM doit être défini comme une fonction du coût unitaire des prix à l'importation (ce qui égale les prix à l'exportation) des partenaires commerciaux (par exemple, voir le modèle GEM-E3).

Pour déterminer l'offre intérieure et à l'exportation, les entreprises maximisent l'équation sur le revenu $\mathrm{PX} \cdot \mathrm{X} + \mathrm{PEX} \cdot \mathrm{EX}$ à partir de l'offre intérieure X et de l'offre extérieure EX sujette à une fonction CET (élasticité de transformation constante, *constant elasticity of transformation*) pour l'article composé Y (déterminé par l'équation (13)), comme une fonction de X et de EX. En utilisant encore la méthode duale de la fonction de revenu unitaire CET,

$$\mathrm{PY} = \mathrm{CET}(\mathrm{PX}, \mathrm{PEX}), \tag{14}$$

on obtient des fonctions de l'offre intégrant le lemme de Hotelling, c'est-à-dire en dérivant l'équation (14) par rapport aux prix de produit.

7. Marché de l'emploi

La caractéristique du marché de l'emploi peut être essentielle lors de l'étude des répercussions des politiques environnementales. Par exemple, une mesure du marché de l'emploi visant à recycler les revenus provenant de taxes pour l'environnement en les utilisant pour abaisser le coût salarial indirect des employés dépend de la manière dont le marché de l'emploi est modélisé. Dans la plupart des MEGC, le marché de l'emploi est parfaitement concurrentiel et le taux de rémunération s'ajuste de façon à assurer l'égalité entre l'offre et la demande.

Certains créateurs de modèles procèdent à des analyses de sensibilité afin d'évaluer si les résultats numériques sont liés à la spécificité du marché de l'emploi. L'article de Böhringer *et al.* (2000) intègre certaines données sur la négociation de salaire en plus du chômage afin de représenter les imperfections du marché. Une définition d'une courbe de Phillips est utilisée pour modéliser l'évidence empirique voulant que de hauts taux de chômage affaiblissent le pouvoir de négociation des syndicats pour ensuite provoquer la baisse de la rémunération réelle (voir également GEM-E3 ou Carraro et Galeotti, 1994).

On peut modéliser différemment non seulement la concurrence imparfaite du marché de l'emploi, mais également le coût de la main-d'œuvre. Löschel et Conrad (2002) proposent un modèle qui définit le coût de la main-d'œuvre selon l'utilisateur, ce qui est représenté par le prix du marché de la main-d'œuvre auquel on ajoute les coûts des facteurs associés à l'emploi d'un travailleur. Nous démontrons que, dans un MEGC, le coût de la main-d'œuvre selon l'utilisateur importe plus que les coûts de rémunération réguliers lorsque se pose le problème des doubles dividendes.

8. Changements technologiques (CT)

Il est bien connu qu'une mesure environnementale (par exemple, atténuer le réchauffement de la planète) est étroitement liée au taux d'amélioration de l'efficacité énergétique. Cependant, les CT sont en général considérés comme des variables exogènes non économiques intégrées aux modèles de politique économique. Cette situation n'est pas tout à fait satisfaisante, car le fait de négliger un nouveau CT peut mener à un écart systématique qui surestime soit les coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre, soit la contribution de la circulation à la pollution de l'air.

L'effet des CT sur les procédés, les produits et les émissions ne peut pas être modélisé par quelques équations. Par exemple, il existe de nombreuses technologies ou de multiples dispositifs qui peuvent être mis en place pour réduire les émissions de gaz à effet de serre : substitution de carburant pour un autre possédant une plus faible intensité carbonique, énergie renouvelable, cycles de consommation d'énergie, amélioration des transmissions, amélioration de l'efficacité par utilisateur ou la séquestration du carbone (par exemple, par écologisation de la biomasse). Il est évident qu'il n'est pas

possible de modéliser toutes ces mesures dans le cadre d'un MEGC. Des modèles spécifiques à des entreprises à gestion démocratique (par exemple, les modèles de l'UE MURE, MARKAL, EFOM) tentent d'isoler les CT en liant des sous-modèles techniques détaillés à des modèles économiques afin de rendre les CT endogènes.

Récemment, l'incorporation des CT aux MEGC a été réalisée selon les quatre méthodes suivantes :

- analyse des CT pour les rendre partiellement endogènes, travail entrepris par Jorgenson et Wilcoxen ;
- amélioration de l'efficacité énergétique autonome (changement technologique économique en intrants) ;
- génération de capitaux ;
- transition vers des technologies de dernière ligne.

Dans l'étude de Jorgenson et Wilcoxen (1990), l'évolution technologique est partiellement rendue endogène par la croissance de la productivité en tant que fonction des prix relatifs. Dans le modèle, une telle croissance est induite par le prix, ce qui modifie la proportion des intrants. Mais les CT ne sont pas endogènes, en ce sens qu'ils n'ont jamais pour but de renverser un biais qui mène à de nouvelles générations de biens durables, à de nouveaux produits ou à des percées de diverses qualités ou importances.

L'amélioration de l'efficacité de l'énergie autonome (AEEI : *Autonomous energy efficiency improvements*) est plus difficilement estimable que les modifications provoquées par les hausses de prix. L'AEEI dissocie la demande en ressources du résultat économique, ce qui aboutit à un CT économiseur de ressources. Selon la méthode duale, on retrouve dans la fonction de coût certains prix d'intrants qui sont multipliés par une autre fonction représentant des CT diminuant les prix.

La plupart des MEGC ne supposent toutefois aucune différence de structure des CT entre le scénario de référence et celui résultant d'une politique. Cette situation mène probablement à un écart systématique, à une surestimation du coût de cette politique.

Une manière différente d'incorporer les CT consiste à utiliser des générations de capitaux liées à diverses technologies. La subdivision des technologies peut avoir une incidence sur la fonction de production, sur la structure des intrants ou sur la flexibilité (élasticité de substitution de chaque génération).

Les MEGC fondés sur l'énergie introduisent des nouvelles technologies produites de façon exogène, actuellement connues mais non encore implantées. Ces technologies de dernier recours deviennent des options présentant un certain intérêt commercial pour l'avenir, mais leur introduction dépend du coût de production par rapport aux technologies concurrentes et en place.

La nouvelle génération des MEGC traite de façon plus complexe les CT endogènes en simulant explicitement le lien entre les dépenses de recherche et développement et la croissance du savoir. Les modèles de Nordhaus (1999)

et de Goulder et Schneider (1999) établissent un rapport entre le taux d'invention et les ressources dépensées en R-D. Ces nouveaux modèles sont inspirés des macromodèles portant sur de nouveaux CT (Romer, 1990). Appliqué à un MEGC, un tel modèle nécessite le calibrage des paramètres qui indique l'étendue des possibilités de substitution entre le capital du savoir et les intrants ordinaires, ou les retombées de connaissances dont jouissent tous les secteurs industriels. On doit encore procéder à d'autres études économétriques afin de fournir une base empirique du calibrage des paramètres liés à la R-D.

9. Technologies d'atténuation

Pour analyser l'effet d'une réglementation de l'environnement sur la compétitivité internationale et sur la croissance, il est important d'inclure les coûts de fonctionnement des mesures de lutte contre la pollution. Les réactions d'entreprises polluantes, par rapport aux normes ou aux taxes d'émission de polluants, peuvent être représentées soit par la substitution de facteurs, soit par des activités d'atténuation, ou par les deux à la fois. On leur attribue des fonctions de coût d'atténuation et leur niveau d'activité est déterminé en égalisant le coût différentiel de l'atténuation et le taux d'imposition uniforme sur les émissions. De telles activités supposent également la demande pour des biens intermédiaires, pour le capital et pour la main-d'œuvre.

Dans le cadre des modèles élaborés par Conrad et Schröder (1991) ou du GEM-E3, les activités d'atténuation sont simulées de façon à augmenter le coût par utilisateur des facteurs polluants comme coûts de fonctionnement additionnels. Soit d un degré de réduction ($0 \leq d \leq 1$) et $c(d)$ le coût des mesures par unité d'émission ou de déchet produit, où $c'(d) > 0$ et $c''(d) > 0$. Alors, le coût de carburant fossile par utilisateur, par exemple, serait de

$$\tilde{w}_F = w_F + w_M \cdot c(d) \cdot d \cdot e \qquad (15)$$

où w_F représente le prix du carburant, w_M, le prix du matériel pour les technologies d'atténuation et e, un coefficient d'émission ou de déchet. Les coûts par utilisateur sont constitués alors du prix du carburant w_F et des coûts supplémentaires résultant de la réglementation environnementale lors de l'utilisation d'une unité du carburant. Cette intégration des coûts d'atténuation dans un concept coût par utilisateur peut servir à simuler l'incidence de la réglementation sur le comportement des ménages et de l'industrie.

10. Données requises

Les données utilisées dans les MEGC multisectoriels proviennent de comptes nationaux et de tableaux entrées-sorties (matrice de comptabilité sociale). Pour établir un MEGC, il est d'usage de choisir des fonctions CES imbriquées. Les paramètres de distribution, qui indiquent l'importance relative des intrants, sont calibrés (calculés) à partir de données de référence, tandis que l'élasticité de substitution σ doit être recherchée dans d'autres sources. Une façon raisonnable de traiter la question du véritable σ consiste à procéder à diverses

simulations. Nous savons qu'un haut degré de substitution des intrants suppose que le coût associé à la réglementation environnementale soit bas, tandis qu'un faible degré de substituabilité entraîne des coûts plus élevés. Plus le ratio σ entre la main-d'œuvre et l'énergie sera élevé, plus il y a de chances qu'une réforme de l'écotaxe crée de l'emploi. Cette réforme taxe l'énergie pour réduire le coût salarial indirect. Si nous simulons le caractère de substituabilité comme intrant en établissant une fonction CES, premièrement avec un faible σ, puis deuxièmement avec un σ élevé, nous obtenons un intervalle des effets économiques d'une politique en matière d'environnement. On peut en retirer probablement plus d'information qu'en procédant à des estimations ponctuelles de σ dans une optique économétrique.

De plus, la façon dont une économie répond à un changement de réglementation en matière environnementale dépend fortement du choix des variables exogènes et de leur importance (changement technologique, accroissement démographique, prix du pétrole brut, taux de change). Il n'est pas toujours souhaitable de rendre chaque variable économique endogène, puisqu'il serait alors plus difficile de comprendre les résultats de la simulation d'une politique, et ce, à cause du grand nombre d'interactions possibles.

11. Analyses de simulations environnementales fondées sur les MEGC

11.1. Politique des doubles dividendes (DDP : *Double Dividend Policy*)

Les analyses tirées des MEGC ont joué un rôle clé dans l'évaluation des réformes de la fiscalité environnementale. Cette réorientation du système de taxation vise à taxer davantage la pollution d'un « mauvais » type plutôt que celle d'un « bon » type, représenté notamment par la main-d'œuvre ou la formation de capital.

La question au cœur du débat sur les doubles dividendes (DDP) vise à vérifier si l'internalisation des externalités peut être bénéfique pour des politiques appartenant à d'autres secteurs. Un dividende non environnemental peut être défini de plusieurs façons. La priorité a été accordée à l'analyse des distorsions du marché de l'emploi qui serait en mesure d'expliquer le chômage persistant : les revenus sont ainsi recyclés afin d'éliminer les taxes sur l'emploi.

Par ailleurs, la base étroite sur laquelle repose la taxe sur l'énergie constitue un handicap inhérent pour l'efficacité. En revanche, l'incidence de la réforme fiscale sur les pratiques, non efficientes et préexistantes, à taxer l'emploi pourrait contrebalancer cet handicap et la hausse des DDP. Un DDP peut donc en principe augmenter seulement si :

i) le système préexistant est très inefficace ;

ii) la réforme, sans incidence sur les recettes, réduit significativement cette première inefficacité. Les DDP augmentent actuellement seulement si la seconde condition s'applique avec une force suffisante.

11.2. Réchauffement de la planète et coût de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre

La plupart des études sur les interactions énergie-économie-environnement effectuées à l'aide de MEGC multirégionaux concernent le problème du réchauffement de la planète. Plusieurs modèles peuvent être cités en exemple, dont le DICE de Nordhaus (1992), le Global 2100 de Manne et Richels (1990, 1992), le MERGE de Manne *et al.* (1995), le GREEN de l'OCDE et Burniaux *et al.* (1992a, b), le G-CUBED de McKibbin et Wilcoxen (1992), le LEAN de Welsch et Hoster (1995) puis le GEM-E3 de l'UE (Capros *et al.*, 1996).

11.3. Réglementation de l'environnement et croissance économique

La réglementation de l'environnement a des effets sur l'offre (coûts marginaux) et sur la demande (dépenses d'atténuation). En évaluant l'incidence de la réglementation environnementale sur la croissance économique, Jorgenson et Wilcoxen (1990) ont modifié leur modèle de base qui comprenait implicitement une réglementation environnementale (1973-1985), puisque leur évaluation reposait sur des données historiques. Ainsi, pour déterminer l'incidence de la réglementation sur le rendement économique des États-Unis, ils ont effectué des simulations contre-factuelles dans lesquelles toute réglementation a été retirée. Ils ont conclu que le coût à long terme est représenté par une réduction de 2,6 % du PIB des États-Unis pour la période 1973-1985. Pendant cette période, la croissance économique annuelle a diminué de 0,19 %.

11.4. Droits de pollution négociables pour le CO_2

Lorsque les droits de pollution de l'air ont été introduits, le prix endogène du permis a équilibré la demande avec l'offre constante. Bien que le recyclage des revenus soit un point important pour les taxes, il ne l'est pas pour les permis. En effet, à l'origine, les droits étaient établis selon le principe des droits acquis et non sur celui de la vente de ces droits. Un système gérant ces droits pour l'Union européenne devrait, pour des raisons d'efficacité et de coût, réunir tous les systèmes spécifiques à chaque pays afin de restreindre les émissions globales de CO_2. La question est traitée par Conrad et Schmidt (1998a, b, c) qui ont analysé les répercussions économiques d'une telle politique sur chacun des pays et sur l'ensemble de l'Union européenne.

11.5. Coût des normes environnementales

La plupart des pays restreignent la pollution de l'air au moyen de normes plutôt que d'instruments basés sur le marché (prix relatifs). Une autre application des MEGC permet de mesurer l'inefficacité de la réglementation actuelle qui établit des normes de qualité de l'air en ajoutant des taxes qui garantissent la même qualité de l'air (Conrad et Schröder, 1991). Pour mesurer l'efficacité du coût d'une telle politique, on produit en premier lieu un scénario de référence qui repose sur les normes d'émission actuelles pour le SO_2, NO_X et d'autres particules. La simulation démontre ensuite la répercussion économique d'une politique environnementale efficace où toutes les industries se voient attribuer des taux uniformes de taxe sur l'émission qui sont calculés pour garantir le respect des normes et la même qualité de l'air que dans le scénario de référence. Les coûts d'atténuation sont alors minimisés étant donné la qualité de l'air du scénario de référence. Les résultats indiquent que le véritable PIB de 1996 aurait été haussé de 0,6 % et le chômage de 14 % si, dès 1988, des taxes sur les émissions avaient été imposées plutôt que des normes.

11.6. Reboisement et déforestation

Étant donné le rôle primordial de la forêt dans le cycle complet du carbone, les pratiques en gestion des forêts peuvent contribuer de façon importante à restreindre le taux d'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère. On s'attend à ce que nombre de pays développés augmentent tant les investissements visant à étendre les régions forestières que les pratiques de gestion forestière. Une forêt est un puits de carbone si elle absorbe plus de carbone qu'elle n'en rejette par réduction et par désintégration naturelle. L'article de Wong et Alavalapati (2002) résume une analyse par un MEGC visant à simuler le coût de la séquestration du carbone dans les forêts.

11.7. Politiques environnementales des pays en développement

Des MEGC adaptés à des économies en développement peuvent être utilisés pour analyser les liens qui unissent l'environnement au rendement économique, d'une part, et aux pratiques commerciales, d'autre part. Au Centre de développement de l'OCDE, des MEGC ont été développés pour trois pays d'Amérique latine (Chili, Costa Rica et Mexique) et trois d'Asie et du Pacifique (Chine, Indonésie et Viêtnam) dans le but de mieux comprendre l'importance de ces liens et les principaux mécanismes à l'origine de l'incidence sur l'environnement des changements apportés aux échanges commerciaux (Dessus *et al.*, 1996).

En commerce international, par exemple, les pays ayant une réglementation environnementale moins rigoureuse pourraient obtenir un avantage comparatif dans des industries polluantes. Il en résulte une exportation de « services de pollution » intégrés aux biens produits à l'aide de technologies qui ne respectent pas les normes environnementales des pays importateurs.

11.8. Incidence de la libéralisation commerciale sur l'environnement

L'article de Adkins et Garbaccio (2002) passe en revue les derniers travaux relatifs aux MEGC. On peut classer les modèles selon plusieurs caractéristiques, notamment l'étendue (modèles considérant un seul ou plusieurs pays), les polluants compris dans l'analyse ou encore l'ampleur de la libéralisation commerciale. Comme l'étude des effets de la libéralisation commerciale sur l'environnement est une question principalement empirique, les MEGC sont fort utiles pour ce type d'analyse :

1. L'étude de Grossman et Krueger (1993) fait la lumière sur l'incidence d'une libéralisation commerciale au sein de l'ALENA sur la pollution de l'air. Dans une étude similaire, Reinert et Roland-Holst (2000) ont simulé le retrait des barrières commerciales entre les pays de l'ALENA et ont fractionné les résultats par rapport aux rejets toxiques en 13 types de polluants industriels.
2. Perroni et Wigle (1994) ont simulé l'incidence d'un libre-échange mondial sur un indice analytique de la qualité totale de l'environnement en divisant le monde en trois grandes régions.
3. Ferrantino et Linkins (1999) ont examiné les répercussions globales sur les rejets toxiques de l'établissement de l'Uruguay Round et d'autres libéralisations commerciales mondiales.
4. Smith et Espinosa (1996) ont simulé, pour le Royaume-Uni, l'effet sur la pollution de l'air de l'affaissement unilatéral des barrières commerciales par rapport aux importations de biens durables provenant d'autres pays de l'Union européenne.
5. Zhu et van Ierland (2002) ont quantifié les répercussions de l'élargissement de l'Union européenne sur le commerce et l'environnement, à partir d'un MEGC.
6. Lee et Roland-Holst (1997) ont évalué le retrait des tarifs douaniers en Indonésie puis l'effet sur les polluants industriels en Indonésie, au Japon et dans le reste du monde.
7. Strutt et Anderson (2000) ont porté leur attention sur les variations en matière de pollution de l'air et de l'eau en Indonésie comprenant les émissions de carbone, à la suite de l'Uruguay Round et de la libéralisation du commerce de l'APEC.
8. Adkins et Garbaccio (2002) ont utilisé un MEGC de l'économie mondiale afin de simuler la libéralisation du commerce au sein de la Zone de libre-échange des Amériques (ZLEA) proposée puis ont analysé les répercussions sur les émissions globales de CO_2. Ils ont noté que la formation de la ZLEA n'aurait que peu d'incidence sur les émissions de CO_2 dans cette région ou ailleurs dans le monde. En revanche, une libéralisation du commerce mondiale pourrait causer une augmentation importante de l'émission globale (voir le tableau 2.1).

TABLEAU 2.1
Variation en pourcentage du PIB et des émissions de CO_2 à la suite de la libéralisation du commerce

	Libéralisation ZLEA		Libéralisation mondiale	
Région	**Variation en % du PIB**	**Variation en % du CO_2**	**Variation en % du PIB**	**Variation en % du CO_2**
ZLEA	0,0	0,2	0,1	0,3
Hors ZLEA	–0,0	–0,0	0,5	1,0
Le monde	0,0	0,0	0,4	0,8

Source : Adkins et Garbaccio (2002).

9. Il y a en outre nombre d'études utilisant des MEGC spécialisés par pays pour examiner la libéralisation du commerce et ses répercussions sur la qualité de l'environnement pour chacun des pays (Costa Rica, Mexique et Chili).

11.9. Application conjointe (AC)

Des traités internationaux sur la protection du climat fournissent l'occasion, au-delà des actions nationales, de réduire les émissions à plus faible coût partout dans le monde. Une option concrète pour les pays industrialisés serait, par exemple, de mettre en œuvre une AC avec des pays en développement comme l'Inde ou la Chine, là où un pays industrialisé paie pour une réduction des émissions à l'étranger plutôt que d'atteindre ses propres objectifs en matière de réduction. L'AC se base d'ordinaire sur le transfert technologique où l'hôte demande des biens d'investissement au donateur, déclenchant un effet positif direct sur l'emploi chez ce dernier. En se basant sur des MEGC pour l'Allemagne et l'Inde, Böhringer *et al.* (2000) ont comparé l'effet sur l'emploi et le bien-être de deux scénarios : d'une part, une réforme sans incidence sur les recettes de la taxe et, d'autre part, une réforme fiscale selon une AC. Dans cette analyse, les taxes sur le carbone ont un effet négatif sur l'emploi en Allemagne malgré que l'AC puisse contribuer à réduire cet effet par des économies de coûts connexes et une demande d'investissement additionnel de l'AC avec les pays hôtes.

11.10. Politique environnementale pour l'agriculture

Les problèmes liés aux produits chimiques agricoles, à la sécurité alimentaire et à la qualité de l'eau ont mis l'agriculture au premier plan des préoccupations environnementales. Les récoltes croissantes depuis plusieurs dizaines d'années ont été associées à l'utilisation de pesticides et d'engrais. Du même coup, les produits chimiques agricoles ont entraîné des coûts économiques tant pour la santé des humains que pour celle de l'environnement. Avec un

MEGC de l'économie américaine, Hrubovcak *et al.* (1990) ont évalué de tels échanges afin de mesurer les bénéfices et les coûts liés à l'intégration de politiques pour l'agriculture, l'environnement et la sécurité alimentaire.

12. MEGC avec un lien bilatéral entre l'environnement et l'économie

De nombreux MEGC sur l'environnement prennent en considération les effets négatifs des émissions et de l'accumulation de polluants sur la qualité de l'environnement. On y retrouve un lien unilatéral entre la définition de variables économiques et leur génération d'externalités. Cependant, la qualité de l'environnement influe également sur le rendement de ces variables économiques. Les modèles qui comportent un lien bilatéral prennent en considération, dans leurs études en simulation, des rétroactions environnementales sur la productivité de la main-d'œuvre, sur la dépréciation du capital et sur le bien-être du consommateur. Le bruit, les accidents de la route et la moins bonne qualité de l'air affectent le bien-être du consommateur ainsi que sa productivité au travail. La dépréciation du capital est touchée négativement par l'augmentation de la corrosion due aux émissions de dioxyde de soufre, tout comme l'infrastructure routière l'est par une circulation dense. L'acidification des forêts mène à une réduction de la croissance des arbres et de la valeur récréative des forêts. Les MEGC qui comportent des liens bilatéraux ont été élaborés par Nordhaus (1994), Vennemo (1997) ou Bergman et Hill (2000).

Dans le modèle de Nordhaus, l'accumulation des émissions de CO_2 élève la température de la Terre et en affecte donc la production. Dans le modèle DREAM, Vennemo (1997) a évalué le tort causé à la santé par l'acidification des lacs ou des forêts, par les émissions de NO_x, SO_2 et CO_2 ou d'autres particules, par la corrosion, le bruit, les accidents routiers, la congestion et la dépréciation de l'infrastructure routière. Bergman et Hill (2000) ont modélisé la répercussion sur la productivité de l'accumulation et de la circulation de la pollution dans l'environnement en incorporant les effets de l'accumulation de pollution à la production. En Chine, la pollution de l'air provoquée par les carburants fossiles a été reconnue comme étant la cause de graves problèmes de santé. Garbaccio *et al.* (2002) ont tenté une première estimation des bénéfices sur la santé d'une taxe sur le carbone. Dans le cadre d'un MEGC dynamique, un sous-modèle est intégré afin d'évaluer les effets sur la santé de la combustion de carburant fossile.

Conrad et Heng (2002) ont évalué un autre aspect lié aux externalités, soit la rétroaction de la circulation et de la congestion sur les variables économiques. Le nombre actuel de camions et de voitures particulières dépasse la capacité et aboutit donc à un indice de congestion. Cet indice a une incidence sur l'efficacité des camions que possèdent les entreprises et sur les camions qui sont la propriété de l'industrie du transport. L'efficacité réduite entraîne une augmentation du coût du transport dans l'économie. À partir d'un MEGC comportant 18 industries, nous avons calculé pour un scénario de référence de maintien du statu quo (MSQ) le capital en transport,

TABLEAU 2.2
Résultats de la simulation d'un scénario de référence du maintien du statu quo (MSQ) et d'extension de l'infrastructure financée par le carburant

Variable	Croissance après 10 ans d'un scénario MQS	*KI** optimal financé par t_E croissance après 10 ans
Z, indice de congestion	12 %	10 %
C_{cong}, coût de la congestion	8 milliards €	4 milliards €
Infrastructure KI	–	4 %
Taxe sur le carburant t_E en vue de financer 40 % de KI	–	0,01 €/année
Investissement net	–	3,33 milliards €

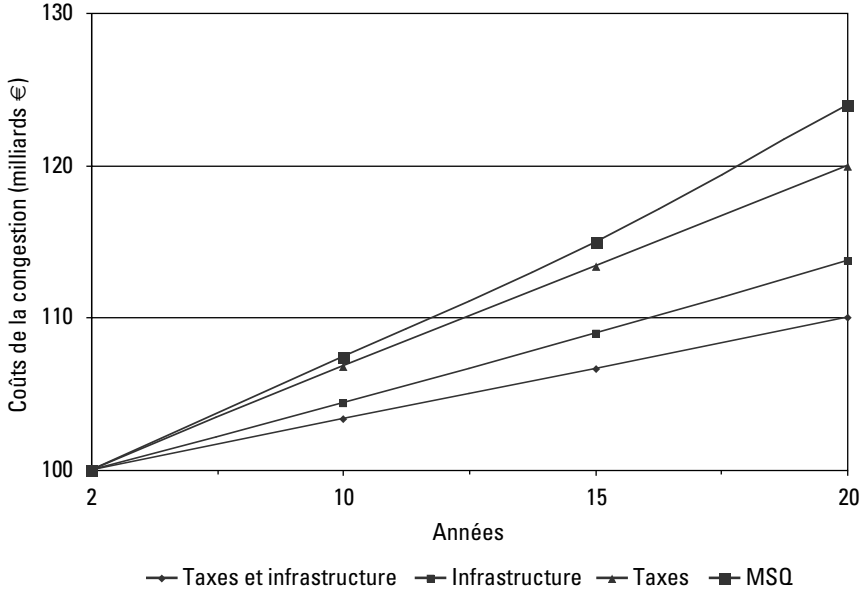
le coût du transport, la congestion et les coûts y étant associés. Le coût de la congestion indique les économies de coûts de transport variables que permet un camion supplémentaire affecté au même volume de transport.

Comme le montre le tableau 2.2, nous avons tout d'abord calculé un scénario MSQ pour l'établir comme référence en le simulant sur une période de 10 ans. Z a augmenté de 1,2 % et C_{cong} de 0,8 milliard d'euros par année. La deuxième colonne indique le résultat de l'extension de l'infrastructure financée par une taxe. Il existe un lien entre la réduction des coûts liés à la congestion grâce à l'amélioration de l'infrastructure et un fardeau fiscal accru à cause d'une taxe sur le carburant plus élevée. Étant donné ce lien, la meilleure politique consiste à dépenser 3,33 milliards d'euros pour étendre le réseau des autoroutes. Z n'augmente alors que de 1 % par année. C_{cong} s'accroît seulement de 0,4 milliard d'euros par année, ce qui correspond à une économie de 0,4 milliard d'euros annuellement. Comme l'investissement net est estimé à 3,3 milliards d'euros, les bénéfices de cette politique dépassent de beaucoup les coûts. La taxe sur le carburant additionnelle a rapporté 40 %, soit $0,4 \times 3,33 = 1,32$ milliard d'euros puis le gouvernement a injecté $(1 - 0,4) \times 3,3 = 1,98$ milliard d'euros. Il n'est pas possible d'incorporer les économies faites sur C_{cong} dans le calcul financier de l'infrastructure KI, aussi une taxe est-elle nécessaire pour faire bénéficier l'économie d'une meilleure infrastructure publique.

La figure 2.1 présente nos résultats de simulation sur une période de 20 ans par rapport à Z et à C_{cong}. Comme l'indique le schéma, les coûts de congestion n'augmentent pas proportionnellement, mais plus rapidement encore.

Même dans le cas d'une infrastructure financée par une taxe, C_{cong} s'accroîtra. Toutefois, comparativement au scénario MSQ, l'économie annuelle cumulative des coûts de congestion s'élève à un potentiel de 100 milliards d'euros sur une période de 20 ans. La vingtième année à elle seule représente une différence de 13 milliards d'euros. Nous estimons les économies potentielles

FIGURE 2.1
Coût social de la congestion sur une période de 20 ans



des coûts de congestion à 15,5 milliards d'euros en 10 ans alors que les investissements servant à améliorer le réseau ne s'élèveraient qu'à 7,5 milliards d'euros pour la même période. Ainsi, les économies dépassent de 50 % les coûts additionnels d'investissement en infrastructure. Peu importe d'où proviennent les investissements pour l'infrastructure, il s'agit d'un autofinancement puisque la volonté de payer pour économiser dans les coûts de congestion dépasse le montant des investissements.

13. Limite des MEGC et aperçu des recherches futures

Il devient de plus en plus important de quantifier les coûts des politiques en matière d'environnement puisque, dans un avenir proche, on se retrouvera devant une réglementation plus restrictive. Les MEGC sont des outils de plus en plus utilisés pour quantifier les coûts et les bénéfices de politiques environnementales. Ils n'ont pas été conçus pour prévoir la valeur des variables économiques, mais plutôt pour fournir des renseignements utiles pouvant guider les décideurs en matière de politique publique.

En principe, la théorie économique offre un éventail de possibilités pour des recherches futures : concurrence imparfaite, changements technologiques endogènes, coûts d'ajustement dans le marché de l'emploi et de la formation, rôle de l'infrastructure, incertitude quant à l'offre des ressources non renouvelables, etc. Toutefois, plus le modèle est compliqué, plus il devient une boîte noire. Comme aucun modèle ne peut représenter la réalité dans son ensemble, on doit choisir les principales caractéristiques qui devront être incluses, et ce, quelle que soit l'approche de modélisation.

Références bibliographiques

ADKINS, L.G., et GARBACCIO, R.F. 2002. *The Effect of the Proposed FTAA on Global Carbon Emissions : A General Equilibrium Analysis*. Communication à la 2nd World Congress of Environmental and Resource Economists. Monterey, CA, juin.

ARMINGTON, P.S. 1969. *Geographic Pattern of Trade and the Effect of Price Changes*. IMF Staff Papers, 58, 179-201.

BERGMAN, L., et HILL, M. 2000. *Productivity and Growth Effects of Acidification : A Dynamic CGE Modeling Study of Sweden*. Discussion Paper, Stockholm School of Economics.

BÖHRINGER, C., CONRAD, K., et LÖSCHEL, A. 2000. *Carbon Taxes and Joint Implementation – An Applied CGE Analysis for Germany and India*. Mannheim, Germany : ZEW-Discussion Paper.

BURNIAUX, J.-M., MARTIN, J.P., NICOLETTI, G., et MARTINS, J.O. 1992a. *The Cost of Reducing CO_2 Emissions : Evidence from GREEN*. OECD Working Paper No. 115.

BURNIAUX, J.-M., MARTIN, J.P., NICOLETTI, G., et MARTINS, J.O. 1992b. *GREEN : A Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO_2 Emissions : A Technical Manual*. OECD Working Paper No. 116.

CAPROS, P., GEORGAKOPOULOS, G., ZOGRAFAKIS, S., PROOST, S., VAN REGEMORTER, G., CONRAD, K., SCHMIDT, T., et SMEERS, Y. 1996. Double dividend analysis : First results of a general equilibrium model (GEM-E3) linking the EU-12 Countries. Dans *Environmental Fiscal Reform and Unemployment*, Carraro, C. *et al.* (dir.). Boston, MA : Kluwer, 193–227.

CARRARO, C., et GALEOTTI, M. 1994. *WARM* (*World Assessment of Resource Management*). Technical Report, Venice, Italy : GRETA.

CONRAD, K., et HENG, S. 2002. *Financing Road Infrastructure by Savings in Congestion Costs : A CGE Analysis*. Discussion Paper, Mannheim University.

CONRAD, K., et SCHMIDT, T. 1998a. National economic impacts of an EU environmental policy : An AGE analysis. Dans *Climate Change, Transport and Environmental Policy*, Proost, S., Braden, J. (dir.). Cheltenham, UK : Edward Elgar Publishing, 48-77.

CONRAD, K., et SCHMIDT, T. 1998b. The international policy dimension of sustainability : The effect of policy harmonization within the EU using the GEM-E3 model. Dans *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*, van den Bergh, J., Hofkes, M.W. (dir.). Boston, MA : Kluwer, 287-316.

CONRAD, K., et SCHMIDT, T. 1998c. Economic effects of a uncoordinated vs. a coordinated CO_2-policy in the EU : An AGE Analysis. *Economic System Research* 10 : 161-182.

CONRAD, K., et SCHRÖDER, M. 1991. The control of CO_2-emissions and its economic impact. *Environmental and Resource Economics* 1 : 289-312.

DESSUS, S., ROLAND-HOLST, D., et VAN DER MENSBRUGGE, D. 1996. *General Equilibrium Modelling of Trade and the Environment.* Technical Paper No. 116, Paris, France : OECD Development Centre.

DEWATRIPONT, M., et MICHEL, G. 1987. On closure rules, homogeneity and dynamics in AGE models. *Journal of Development Economics* 26 : 65-76.

FERRANTINO, M.J., et LINKINS, L.A. 1999. The effect of global trade liberalization on toxic emissions in industry. *Weltwirtschaftliches Archiv* 135 : 128-155.

GARBACCIO, R.F., HO, M.S., et JORGENSON, D.W. 2002. *The Health Effect of Carbon Emissions Reductions in China.* Communication à la 2nd World Congress of Environmental and Resource Economists. Monterey, CA, juin.

GROSSMAN, G.M., et KRUEGER, A.B. 1993. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. Dans *The Mexico – U.S. Free Trade Agreement*, Garber, P.M. (dir.). Cambridge, MA : MIT Press.

GOULDER, L.H., et SCHNEIDER, S.H. 1999. Induced technological change and the attractiveness of CO_2 abatement policies. *Resource and Energy Economics* 21 : 211-253.

HRUBOVCAK, J., LE BLANC, M., et MIRANOWSKI, J. 1990. Limitations in evaluating environmental and agricultural policy coordination benefits. *American Economic Review* 80 : 208-212.

HUDSON, E.A., et JORGENSON, D.W. 1974. U.S. Energy Policy and economic growth, 1975-2000. *Bell Journal of Economics and Management Sciences* 5 : 461-514.

JORGENSON, D.W., et WILCOXEN, P.J. 1990. Environmental regulation and U.S. economic growth. *The Rand Journal of Economics* 21 : 314-340.

LEE, H., et ROLAND-HOLST, D. 1997. The environment and welfare implications of trade and tax policy. *Journal of Development Economics* 52 : 65-82.

LÖSCHEL, A., et CONRAD, K. 2002. *Recycling of Eco-Taxes, Labor Market Effects and the True Cost of Labor : A CGE Analysis.* ZEW Discussion Paper No. 02-31, Mannheim, Allemagne.

MCKIBBIN, W.J., et WILCOXEN, P.J. 1992. *G-Cubed : A Dynamic Multi-Sector General Equilibrium Model of the Global Economy* (*Quantifying the Costs of Curbing CO_2 Emissions*), Brookings Discussion Papers, No. 98. Brookings Institution.

MANNE, A.S., MENDELSOHN, R., et RICHELS, R. 1995. MERGE : A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy Policy* 23 : 17 – 34.

MANNE, A.S., et RICHELS, R.G. 1990. CO_2 emission limits : An economic analysis for the USA. *The Energy Journal* 11 : 51-74.

MANNE, A.S., et RICHELS, R.G. 1992. *Buying Greenhouse Insurance : The Economic Costs of CO_2 Emission Limits.* Cambridge, MA : The MIT Press.

NORDHAUS, W.D. 1992. *The DICE Model : Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate : Economy Model of the Economics of Global Warming.* Cowles Foundation Discussion Paper No. 1009. New Haven, CT : Yale University.

NORDHAUS, W.D. 1994. Rolling the "DICE" : An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Resource and Energy Economics* 15 : 27-50.

NORDHAUS, W.D. 1999. *Modeling Induced Innovation in Climate-Change Policy,* Paper presented at the IIASA Workshop on Induced Technological Change and the Environment, Laxenburg, Autriche, 21-22, juin.

PERRONI, C., et WIGLE, R.W. 1994. International trade and environmental quality : How important are the linkages ? *Canadian Journal of Economics* 27 : 551-567.

REINERT, K.A., et ROLAND-HOLST, D.W. 2000. The industrial pollution impacts of NAFTA : Some preliminary results. Dans *North American Symposium on Understanding the Linkages Between Trade and the Environment.* Montréal, QC : Commission pour la coopération environnementale, 139-159.

ROMER, P.M. 1990. Endogenous technical change. *Journal of Political Economy* 98 : 71-102.

SHEPHARD, R.W. 1953. *Cost and Production Functions.* Princeton, NJ : Princeton University Press.

SHOVEN, J.B., et WHALLEY, J. 1973. General equilibrium with taxes : A computation procedure and an existence proof. *Review of Economics Studies* 60 : 475-490.

SHOVEN, J.B., et WHALLEY, J. 1984. AGE models of taxation and international trade : An introduction and survey. *Journal of Economic Literature* 22 : 1007-1051.

SMITH, V.K., et ESPINOSA, J.A. 1996. Environmental and trade policies : Some methodological lessons. *Environmental and Development Economics* 1 : 19-40.

STRUTT, A., et ANDERSON, K.W. 2000. Trade liberalization harm the environment ? The case of Indonesia to 2020. *Environmental and Resource Economics* 17 : 203-232.

TOBIN, J.A. 1969. General equilibrium approach to monetary theory. *Journal of Money, Credit and Banking* 1 : 15-29.

VENNEMO, H. 1997. A dynamic applied general equilibrium model with environmental feedbacks. *Economic Modeling* 14 : 99-154.

WELSCH, H., et HOSTER, F. 1995. A general equilibrium analysis of European carbon/energy taxation : Model structure and macroeconomic results. *Zeitschrift für Wirtschafts und_Sozialwissenschaften* 115 : 275-303.

WONG, G., et ALAVALAPATI, J. 2002. *An Economy-wide Assessment of a Forest Carbon Policy in the USA.* GTAP resource n° 128. West Lafayette, IN : Purdue University.

ZHU, X., et VAN IERLAND, E. 2002. *Modeling the Effects of the Enlargement of the EU on Trade and the Environment : An Applied General Equilibrium Modeling Approach.* Communication à la 2nd World Congress of Environmental and Resource Economists. Monterey, CA, juin.

CHAPITRE 3

POLITIQUES CLIMATIQUES DE KYOTO À BONN

De « pas grand-chose » à « rien du tout » ?†

CHRISTOPH BÖHRINGER
Département d'économie de l'environnement et des ressources (ZEW)

† La version complète de ce chapitre, présentée le vendredi 11 octobre 2002 lors de la séance d'ouverture de la XIVe Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie, a fait l'objet d'une publication plus détaillée et formelle dans Böhringer (2003). Nous tenons à remercier plus particulièrement Sergey Paltsev et Thomas F. Rutherford (Université du Colorado), Till Requate (Université de Heidelberg) et Peter Zapfel (Commission européenne) pour leurs commentaires fort utiles. Nous aimerions également remercier la Commission européenne pour l'aide financière qu'elle nous a accordée dans le cadre de ses projets Programme sur le changement climatique et le commerce mondial (Climate Change Policy and Global Trade – CCGT) et Stratégies de contrôle des émissions de gaz à effet de serre (Greenhouse Gases Emission Control Strategies – GECS). Nous nous excusons de toute erreur éventuelle.

Résumé

Dans ce chapitre, nous étudions l'incidence sur le rôle économique et environnemental du protocole de Kyoto, dans sa forme originale, du retrait des États-Unis et des modifications apportées dans le cadre de la Convention de Bonn sur les changements climatiques. Des simulations élaborées à l'aide du modèle d'équilibre général calculable (MEGC) nous ont permis de noter que le retrait des États-Unis conjugué aux nouvelles dispositions de Bonn annulera fort probablement l'efficacité environnementale. Le respect du protocole de Kyoto par les États-Unis aux termes des nouvelles modifications issues de Bonn permettrait de réduire considérablement les émissions anthropiques globales sans pour autant engendrer de coûts exorbitants pour les pays de l'OCDE. Ainsi, il est à espérer que les États-Unis finissent par ratifier le protocole de Kyoto dans les années à venir.

1. Introduction

Le protocole de Kyoto, négocié en 1997, contraint les pays industrialisés adhérents à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Dans sa version originale, le protocole imposait aux pays industrialisés de réduire en moyenne de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 sur la base des niveaux de leurs émissions de 1990. Toutefois, l'accord intervenu n'entrera en vigueur que lorsqu'il aura été ratifié par au moins 55 pays, qui devront avoir contribué à au moins 55 % du volume des émissions de CO_2 (le plus important gaz à effet de serre) du monde industrialisé atteint en 1990.

En mars 2001, les États-Unis, par l'entremise du président George W. Bush, ont annoncé leur retrait du protocole, invoquant des coûts trop élevés pour l'économie américaine et alléguant que l'exemption des limites contraignantes en matière d'émissions accordée aux pays en développement (pays dits « non concernés » par le traité de Kyoto) était tout à fait inacceptable[1].

Le retrait des États-Unis a suscité une discussion au sein des autres pays industrialisés, qui se sont alors demandé si, en l'absence des États-Unis, il y avait lieu de mettre en œuvre le protocole. L'Union européenne s'est alors proclamée chef de file d'une stratégie de ratification à laquelle ne participeront plus les États-Unis. Dans ce contexte, pour entrer en vigueur, le protocole de Kyoto n'en exigera pas moins, outre le ralliement de l'Union européenne, celui du Japon, de l'ex-Union soviétique (la Russie et l'Ukraine) et des pays d'Europe orientale, afin que le quorum exigé soit atteint. Nous aurions pu nous attendre à ce que la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe orientale ratifient le protocole, puisqu'ils devraient pouvoir tirer d'importants revenus de la vente de leurs droits d'émission excédentaires[2]. Par ailleurs, le Japon a signalé qu'il souhaitait conserver le protocole qui porte le nom de sa ville impériale. Ce pays a toutefois souligné que ce protocole n'aurait un sens que si les États-Unis, le plus important pollueur au monde, le ratifiait.

Dans ce contexte, les représentants de 180 pays se sont réunis à Bonn au mois de juillet 2001, la plupart étant résolus à éviter l'échec du protocole de Kyoto sur le réchauffement de la planète après 10 ans de négociations. Les participants aux négociations ont convenu de rédiger un document de compromis exigeant de nombreuses concessions, particulièrement de la part de l'Union européenne. L'Australie, le Canada, la Nouvelle-Zélande, le Japon et la Russie se sont vu accorder d'importants crédits pour leurs puits de

1. En 1997, le Sénat américain a adopté à l'unanimité la résolution « Byrd-Hagel », qui faisait de la participation « assurée » des pays en voie de développement une condition sine qua non de la ratification. Au fil des ans, les possibilités d'une ratification des États-Unis se sont amenuisées, quand on sait que cette dernière exige l'appui des deux tiers du Sénat, indépendamment des engagements de l'Administration Bush.
2. En vertu du protocole de Kyoto, les pays d'Europe orientale, l'Ukraine et plus particulièrement la Russie, ont reçu des droits d'émission nettement supérieurs à ceux qu'ils s'étaient vu accorder suivant le scénario du maintien du statu quo entre 2008 et 2012 (voir Paltsev, 2000). Ils pourront vendre leurs droits d'émission excédentaires si les pays industrialisés sont autorisés à échanger leurs permis d'émission pour réduire les coûts généraux des mesures de réduction de la pollution atmosphérique.

carbone, en l'occurrence leurs forêts et leurs terres agricoles, qui absorbent les gaz à effet de serre. Ces crédits sont censés assouplir fortement les dispositions du protocole original, signé en 1997. En outre, la position restrictive adoptée par l'Union européenne quant à d'éventuelles limites à l'échange des permis d'émission entre les pays industrialisés n'est plus d'actualité. La dernière version du protocole de Kyoto ne prévoit pas réellement de plafond au partage des réductions d'émissions qu'un pays pourrait atteindre en rachetant des permis d'émission à d'autres pays industrialisés, et n'envisage pas non plus de limiter le nombre de permis qu'il est autorisé à vendre[3]. En d'autres termes, la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe orientale pourront donc vendre leur excédent de permis d'émission, ce qui, comparativement à une action strictement nationale, pourrait se traduire par une augmentation considérable des émissions réelles établies par le protocole de Kyoto[4].

Il existe par ailleurs de nombreux documents proposant des preuves quantitatives des répercussions économiques du protocole de Kyoto (voir Weyant, 1999, ou UNEP, 2001, pour des rapports sommaires). Toutefois, ces documents ne tiennent pas compte des importants changements récents intervenus en politique climatique, sur la scène internationale, à savoir le rejet du protocole de Kyoto par les États-Unis et les dispositions de la Conférence de Bonn sur les crédits en puits de carbone.

L'objectif de notre étude est d'évaluer les répercussions du rejet des États-Unis et des modifications apportées dans le cadre de la Conférence de Bonn sur le rôle économique et environnemental du protocole de Kyoto, dans sa forme originale. Les résultats auxquels nous sommes parvenus en nous fondant sur des simulations réalisées à l'aide d'un modèle d'équilibre général calculable (MEGC) à grande échelle des échanges globaux et de l'utilisation de l'énergie, peuvent se résumer comme suit :

i) Le non-respect des dispositions du protocole par les États-Unis et l'absence de tout plafonnement de la vente de permis d'émission par la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe orientale réduiront presque à zéro l'écoefficacité du protocole de Kyoto. En effet, la faible demande de permis d'émission de la part des autres pays de l'OCDE et l'offre importante de droits d'émission excédentaires par la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe orientale rendront les permis d'émission quasiment gratuits. En résumé, le protocole de Kyoto – Bonn équivaut grosso modo à un scénario de maintien du statu quo sans les contraintes juridiques limitant les émissions.

3. Il a été convenu que le recours à l'échange d'émissions « devait compléter l'action nationale et que celle-ci devait donc constituer un élément significatif des efforts déployés par toutes les Parties […] pour respecter leurs engagements en matière de limites et de réduction des émissions quantifiées » (UNFCCC, 2001). Le terme « significatif », qui reste vague, laisse une certaine marge de manœuvre aux échanges importants.

4. Les répercussions des restrictions en matière d'importation et d'exportation de permis ont fait l'objet de plusieurs études, dont celles de Bernstein *et al.* (1999), de Bollen *et al.* (1999), de Criqui *et al.* (1999), de Böhringer (2000) et de Ellerman et Wing (2000).

ii) Les restrictions imposées à la vente de droits d'émission visant à neutraliser l'excédent de droits d'émission augmentent considérablement le coût des mesures de réduction de la pollution atmosphérique prescrites aux pays de l'OCDE (sans les États-Unis). Sur le plan des mesures nationales, alors que la réduction des émissions globales ne totalise qu'un tiers du niveau qui devrait être atteint si les États-Unis respectaient le protocole, le montant global des mesures de réduction de la pollution imposées aux pays de l'OCDE, quant à lui, resterait presque inchangé.

iii) L'offre monopolistique de permis d'émission par la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe orientale contribuerait à supprimer une bonne part des permis excédentaires et permettrait, comparativement à l'instauration de mesures nationales, de diminuer de moitié les coûts défrayés par les pays de l'OCDE. Par ailleurs, l'écoefficacité chuterait à son tour, puisque les émissions globales ne baisseraient que de 1 %, par rapport au scénario de maintien du statu quo.

iv) En cas de respect des dispositions du protocole par les États-Unis, l'autorisation des crédits de puits de carbone conjuguée à l'échange illimité de droits d'émissions permettrait aux pays de l'OCDE de réduire considérablement les montants qu'ils devraient consacrer au respect des dispositions et de ne diminuer les émissions globales que d'environ 4 %. Aux États-Unis, les pertes seraient minimes, puisque la consommation ne reculerait que de 0,25 % par rapport au statu quo. Paradoxalement, ces résultats laissent espérer que les États-Unis se rallieront au protocole de Kyoto dans les prochaines années.

L'analyse de sensibilité des modifications apportées aux principales hypothèses du modèle (comme la sensibilité aux prix des combustibles fossiles, la facilité de substitution des marchandises non énergétiques ou l'initiative de protection de la ligne de base pour la croissance économique et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre) confirme l'exactitude des résultats obtenus[5]. Nous serons en mesure d'en corriger l'objet dans le cadre d'études postérieures, et ce, dès que nous disposerons des informations et des données pertinentes. Cependant, dès maintenant, plusieurs mises en garde s'imposent. Premièrement, notre analyse n'envisage pas d'engagement postérieur à 2012, susceptible d'avoir une incidence sur les comportements affichés dans le cadre du premier engagement (par exemple, une mise en réserve de permis d'émission). Deuxièmement, nous supposons, dans le cas du non-respect des dispositions du protocole par les États-Unis, que ceux-ci n'adopteront aucune politique intérieure visant à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Troisièmement, nous ne tenons compte d'aucun gaz à effet de serre autre que le CO_2 dans le cadre de cette analyse.

5. Par souci de brièveté, nous n'aborderons pas l'analyse de sensibilité dans ce chapitre. Les programmes et les données utilisées pour reproduire les résultats des simulations principales ainsi que l'analyse de sensibilité sont disponibles sur demande.

La deuxième partie du chapitre de cette étude décrit brièvement le schéma sous-jacent de la modélisation, puis la troisième partie dépeint les différents scénarios de mesures politiques. La quatrième partie est consacrée à l'interprétation des résultats de la simulation.

2. Cadre d'analyse et calibrage du modèle de référence

Les mesures de réduction des émissions de la combustion des sources d'énergie fossiles ne se traduisent pas uniquement par des ajustements directs sur les marchés des combustibles, mais elles ont également des retombées indirectes sur les autres marchés qui, à leur tour, se répercutent sur l'économie. Or, l'équilibre général offre un cadre intéressant pour l'étude des interactions, liées à l'évolution des prix, qui existent entre le système énergétique et le reste de l'économie. L'explication de l'origine et des dépenses des revenus des agents économiques permet d'étudier simultanément l'efficacité économique et les répercussions de l'impact des mesures de réduction de la pollution. Voilà pourquoi l'utilisation des MEGC est devenue une norme dans l'analyse des différents impacts macroéconomiques que les mesures de réduction des gaz à effet de serre ont sur l'allocation des ressources et les revenus des agents économiques (Bergmann, 1990 ; Grubb *et al.*, 1993 ; Weyant, 1999)

Pour les besoins de notre analyse, nous avons utilisé un MEGC statique de l'économie mondiale basé sur 12 régions et 7 secteurs. Le choix des secteurs met bien en évidence les dimensions clés relevées dans l'analyse de la réduction des émissions de CO_2 telles que les différences dans l'intensité des rejets de carbone et le degré de substituabilité des produits énergétiques et des produits non énergétiques à intensité carbonique. Le tableau 3.1 énumère les secteurs et les régions qui ont été incorporés au modèle. Par souci de brièveté, nous nous abstiendrons ici de présenter les formes fonctionnelles et les hypothèses du modèle central qui constituent la norme pour l'analyse du MEGC des politiques multilatérales de réduction des émissions de gaz carbonique[6].

Conformément à l'analyse appliquée de l'équilibre général, le modèle repose sur les transactions économiques d'une année de référence donnée. Les données de référence nous permettent de déterminer les paramètres des formes fonctionnelles (CES : *Constant Elasticity of Substitution*) à partir d'une série donnée de quantités, de prix et d'élasticité de référence. En ce qui concerne les quantités et les prix de référence, nous recourons à la base de données du projet GTAP 4 (McDougall *et al.*, 1998), suppléée par les statistiques de l'énergie publiées par l'IEA/OCDE (1996) pour l'année 1995, telle qu'elle est décrite par Rutherford et Paltsev (2000).

L'estimation et la répartition exactes des coûts des mesures de réduction de la pollution atmosphérique sont fortement tributaires des projections du scénario de maintien du statu quo (MSQ) relatives entre autres au PIB, au

6. Les formes fonctionnelles du modèle sont présentées dans Böhringer (2003).

TABLEAU 3.1
Survol des secteurs et des régions[a]

Secteurs	Pays
Produits énergétiques	**Pays concernés**
Charbon	États-Unis
Pétrole brut	Pays européens membres de l'OCDE (y compris ZELE[b])
Gaz naturel	Japon
Produits d'huile raffinée	Canada
Électricité	Australie et Nouvelle-Zélande Pays d'Europe centrale et d'Europe orientale Ex-Union soviétique
Produits non énergétiques	**Pays non concernés**
Industries grandes consommatrices d'énergie	Chine
Reste des industries	Inde Asie Mexique et pays de l'OPEP Reste du monde

[a] L'agrégation est basée sur l'ensemble des données du projet GTAP-EG.
[b] Zone européenne de libre-échange.

prix des carburants et à l'accroissement de l'efficacité énergétique (voir Böhringer *et al.*, 2000). Dans le cadre de notre analyse statique comparée, nous évaluons la structure économique du MSQ des régions du modèle, pour l'année 2010, ceci à l'aide des prévisions de développement économique les plus récentes et de la future production de combustibles fossiles[7]. Le calibrage du modèle des économies futures entre 1995 et 2010 prend en considération des informations exogènes publiées par le ministère américain de l'Énergie (DOE : U.S. Department of Energy, 1998) qui portent sur la croissance du PIB, la demande d'énergie et les prix de l'énergie à long terme. Enfin, les fonctions de la production des combustibles fossiles sont ajustées au modèle afin de correspondre aux estimations exogènes de l'élasticité de l'offre.

3. Scénarios des mesures politiques

Les scénarios mettent en évidence les solutions alternatives proposées pour la mise en œuvre du protocole de Kyoto ainsi que les trois principales dimensions de la politique relative aux changements climatiques, énoncées ci-dessous.

7. Les résultats de la simulation portant sur les scénarios de réduction de la pollution sont ensuite comparés aux estimations du maintien du statu quo (MSQ) pour 2010 (voir la quatrième section).

3.1. Objectifs de réduction

Les limites d'émission des pays industrialisés ont été fixées dans le cadre du protocole de Kyoto[8]. Pour les besoins de nos simulations, nous avons tenu compte de deux régimes d'objectifs en matière de réduction des émissions :

OLD L'option *OLD* (ancien) tient compte des objectifs de réduction des émissions oscillant autour de 5,2 % en moyenne, assignés aux pays industrialisés dans le cadre du protocole original de Kyoto.

NEW L'option *NEW* (nouveau) prend en considération les compromis adoptés à Bonn, qui ont accordé d'importants crédits en matière de puits de CO_2. Les pays sont autorisés à déduire certaines quantités de gaz carbonique absorbées par leurs forêts et leurs terres agricoles afin de respecter leurs limitations en matière d'émission.

Le tableau 3.2 recense les objectifs de réduction orignaux (*OLD*) et les nouvelles cibles (*NEW*) des pays. Pour les besoins de nos simulations, nous n'avons retenu que les solutions alternatives visant à atteindre les objectifs de réduction des émanations de dioxyde de carbone, puisqu'il s'agit du principal gaz à effet de serre émis par les pays industrialisés les plus pollueurs.

TABLEAU 3.2
Objectifs de réduction des émissions fixés dans le cadre du protocole original de Kyoto (*OLD*), et objectifs révisés à Bonn, accordant des crédits de puits (*NEW*)

	Anciens engagements (*OLD*)[a] (% des émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990)	Nouveaux engagements (*NEW*)[b] (% des émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990)
États-Unis	93,0	96,8
Europe (incl. EFTA)	92,2	94,8
Japon	94,0	99,2
Canada	94,0	107,9
Australie et Nouvelle-Zélande	106,8	110,2
Europe centrale et de l'Est	92,9	96,1
Ex-URSS	100,0	104,9

[a] UNFCCC (1997).
[b] Estimations calculées par la Commission de l'Union européenne en fonction de UNFCCC (2001).

8. Elles sont énumérées pour chaque pays à l'annexe C, de la version originale de ce chapitre que l'on peut consulter sur le site de la conférence : <www.io2002conference.uqam.ca/conference/papers/bohringer>, p. 38.

3.2. Étendue du marché des permis d'émission

Le compromis adopté à Bonn ne fixe pas de limites précises aux échanges de droits d'émission pour réaliser leurs objectifs. L'étendue des échanges d'émissions admissibles est l'un des principaux points de discorde entre les États-Unis et l'Union européenne. En effet, l'Union européenne réclamait des pays qu'ils réduisent au moins de moitié leurs émissions sur le marché intérieur. En revanche, les États-Unis refusaient l'imposition d'un plafond aux achats de droits d'émission auprès d'autres pays.

Dans nos simulations, nous avons représenté les extrêmes que les pays peuvent atteindre. À notre avis, la seule option stratégique issue des compromis adoptés à Bonn concerne l'échange illimité de permis d'émissions excédentaires entre les pays[9] :

NTR Les pays concernés sont contraints d'adopter des mesures nationales pour respecter leurs engagements en matière de réduction des émissions.

TRD Les échanges de droits d'émission ne sont soumis à aucune restriction, ce qui permet non seulement de répartir équitablement les coûts de réduction marginaux, mais permet en outre aux pays de revendre leurs droits d'émission excédentaires, ce qu'ils n'auraient jamais pu faire dans le cas précédent (*NTR*).

3.3. Participation des États-Unis

En mars 2001, le nouveau gouvernement des États-Unis, présidé par George W. Bush, déclarait au sujet du protocole de Kyoto que « *we have no interest in implementing this treaty* ». Depuis lors, l'Union européenne s'est employée sans relâche, bien qu'en vain, à persuader les États-Unis de ratifier le protocole de Kyoto. Le compromis de Bonn n'a pas réussi à satisfaire les États-Unis, bien qu'il eût satisfait à plusieurs de leurs exigences (tels que les crédits de puits et l'échange des droits d'émission à l'échelle internationale). Il reste que, pour élaborer une politique sur les changements climatiques, il importe d'étudier l'incidence que le retrait des États-Unis et les modifications apportées au protocole auront. Aussi avons-nous décidé de tenir compte de deux options qui donnent un angle de comparaison utile :

USin L'option « USin » suppose que les États-Unis respecteront les engagements qu'ils ont pris dans le cadre du protocole de Kyoto.

USout L'option « USout » reflète la situation actuelle, à savoir la politique américaine en matière de changement climatique, présume que les États-Unis ne ratifieront pas le protocole de Kyoto.

Le tableau 3.3 indique les principaux scénarios élaborés à partir du regroupement des différentes politiques énoncées ci-dessus.

9. À la fin de la section 4 de ce chapitre, nous avons étudié l'incidence sur les résultats de l'ex-Union soviétique et des pays de l'Europe orientale des limites imposées à leurs ventes de permis.

TABLEAU 3.3
Aperçu des scénarios

	Réduction des émissions		Échange des droits d'émission		Ralliement des États-Unis	
	OLD	**NEW**	**NRT**	**TRD**	**Usin**	**USout**
USin_NTR_OLD	X		X		X	
USout_NTR_OLD	X		X			X
USin_TRD_OLD	X			X	X	
USout_TRD_OLD	X			X		X
USin_NTR_NEW		X	X		X	
USout_NTR_NEW		X	X			X
USin_TRD_NEW		X		X	X	
USout_TRD_NEW		X		X		X

4. Résultats des simulations

Les impacts économiques et environnementaux induits par les différents scénarios visant la mise en application des dispositions du protocole de Kyoto sont évalués conformément à un point de référence du scénario de maintien du statu quo (MSQ) situé en 2010 et en l'absence de toute politique de réduction des émissions. Pour ce qui est des résultats obtenus pour l'ensemble des pays concernés ou ceux qui ne le sont pas (appelés NONAB), nous supposons que les États-Unis ne font partie des pays concernés ou de l'OCDE que s'ils respectent les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto (scénario *USin*) ; sinon, ils sont répertoriés dans l'ensemble des pays non concernés. Il y a lieu de souligner que les scénarios *USin_NTR_OLD* et *USin_TRD_OLD* examinent des politiques qui ont fait l'objet de nombreuses et vastes études menées sur l'impact économique du protocole de Kyoto. À des fins de comparaison, ces simulations sont reprises ici avec les nouveaux scénarios qui mettent en lumière les répercussions du retrait des États-Unis et des crédits de puits de carbone. Les résultats de *USin_NTR_OLD* et de *USin_TRD_OLD* correspondent aux estimations quantitatives relevées dans des études récentes (Weyant, 1999 ; UNEP, 2001).

4.1. Respect des dispositions du protocole par les États-Unis – Aucun échange de droits d'émission

Pour commencer, penchons-nous sur les résultats de la simulation des scénarios *USin_NTR_OLD* et *USin_NTR_NEW*. Dans ces cas, les États-Unis atteignent les objectifs fixés par le protocole de Kyoto (version *OLD* ou *NEW*) et respectent leurs engagements en matière de réduction en adoptant les mesures nationales imposées aux pays concernés.

Le tableau 3.4 met en évidence les raisons du retrait des États-Unis et souligne celles qui ont incité le Japon, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande à réclamer un assouplissement de leurs objectifs de réduction des

TABLEAU 3.4

Respect des dispositions du protocole et mesures nationales de réduction de la pollution des États-Unis – Impacts sur les objectifs *OLD* et *NEW*

	Avant le compromis de Bonn				Après le compromis de Bonn			
	Consommation (en % comp. à MSQ)	MAC[a] (C, $US/t)	Réduction des émissions de CO_2 (en %/MSQ)	Fuites (en %)	Consommation (en % comp. à MSQ)	MAC[a] (C, $/t)	Réduction des émissions de CO_2 (en % comp. à MSQ)	Fuites[b] (en %)
États-Unis	–0,67	170	28,2		–0,52	143	25,2	
Europe	–0,44	168	18,2		–0,34	139	15,9	
Japon	–0,88	394	28,3		–0,63	297	24,4	
Canada	–1,81	193	28,9		–1,03	108	18,3	
Australie et Nouvelle-Zélande	–1,05	85	16,8		–0,88	69	14,2	
Europe centrale et de l'Est	0,68	0	–4,9		0,57	0	–4,3	
Ex-URSS	–0,66	0	–4,8		–0,60	0	–4,1	
Chine	–0,09		–1,4	2,5	–0,07		–1,2	2,4
Inde	0,24		–1,5	0,6	0,21		–1,3	0,6
Mexique et OPEP	–0,73		–3,7	3	0,62		–3,2	2,9
Asie	0,14		–3,8	2	0,12		–3,2	1,9
Reste du monde	–0,07		–4,3	3,1	0,06		–3,7	3
TOTAL	–0,36		9	11,1	0,28		7,9	10,9
Pays non concernés	–0,08				0,07			
Pays concernés	–0,46				0,34			
OCDE	–0,47				0,34			

[a] MAC : coûts marginaux de réduction.

[b] Ratio des changements d'émissions observés dans les régions ne dépolluant pas comparativement au total des réductions d'émissions dans les régions qui dépolluent.

émissions au moyen des puits de carbone et de l'échange illimité des droits d'émission des pays visés.

Les réglementations contraignantes en matière de réductions d'émission dictées par les dispositions du protocole original entraînent des coûts d'ajustement non négligeables pour les pays de l'OCDE. En effet, les objectifs d'émission, qui sont fixés par rapport aux niveaux de 1990, exigent des réductions des émissions de gaz carbonique *réelles* nettement supérieures aux niveaux d'émissions préconisés dans le scénario du maintien du statu quo, pour la période budgétaire du protocole (à savoir entre 2008 et 2012). En l'absence de droits d'émissions étrangères, les pays de l'OCDE devront procéder à des réformes majeures pour pouvoir respecter les réglementations contraignantes en matière de réductions d'émissions réelles. Ils devront notamment remplacer leurs modèles de production et de consommation par des modèles à moindre intensité des émissions de carbone, ce qui provoquera une chute de la productivité et du revenu réel[10]. La réduction de la pollution atmosphérique des pays de l'OCDE a des répercussions significatives sur les régions dépourvues de politiques de réduction, puisqu'elle modifie la courbe des prix sur les marchés internationaux, c'est-à-dire les termes de l'échange[11].

Les impacts les plus importants seraient observés sur les marchés internationaux du pétrole brut, du gaz et du charbon. Ainsi, la baisse de la demande mondiale de combustibles fossiles se traduirait par une chute de leurs cours, entraînant des gains économiques pour les importateurs de combustibles fossiles et des pertes pour leurs exportateurs. Ces répercussions sur les marchés des combustibles fossiles auraient également un impact sur le bien-être des pays qui auraient choisi de ne pas réduire leur niveau de pollution. Les conséquences économiques de l'évolution des prix en vigueur sur les marchés internationaux des produits non énergétiques seraient encore plus complexes. La hausse des coûts de l'énergie augmenterait les prix des produits non énergétiques (en particulier ceux des produits grands consommateurs d'énergie) fabriqués dans les pays ayant opté pour une réduction de leur pollution. Les pays importateurs de ces produits devraient alors payer des prix plus élevés tout en étant dans l'impossibilité de les remplacer par des produits importés, plus abordables, provenant de pays qui ne réduiraient pas leur pollution. L'allègement dû à la substitution n'entraînerait pas seulement le *transfert du fardeau*, logique en soi, grâce aux exportations de produits non énergétiques originaires de pays réduisant leur pollution, mais conférerait en outre un avantage compétitif aux pays ne disposant pas d'une politique de réduction de la pollution par rapport aux pays exportateurs réduisant leur pollution. L'augmentation des parts de marché attribuable à l'effet de substitution

10. Dans l'optique d'un seul pays, il existe une corrélation uniforme entre le niveau de réduction, les coûts marginaux imputables aux mesures de réduction de la pollution et les coûts inframarginaux attribuables au bien-être. Il reste que, comme le montre le tableau 3.4, ces relations ne s'appliquent pas à la comparaison entre les pays, puisque les différences entre les prix des produits énergétiques, les intensités énergétiques, les élasticités de substitution, etc., sont aussi importants pour tous les pays.

11. Voir Böhringer et Rutherford (2002) pour une analyse plus approfondie des répercussions des réductions de la pollution atmosphérique sur les termes de l'échange.

pourrait être neutralisée, en partie, par un effet d'échelle opposé : sous l'effet de l'affaiblissement des activités économiques et des revenus, la demande de produits importés par le groupe des pays non pollueurs (en l'occurrence, les pays « concernés ») fléchit, ce qui exerce une pression à la baisse sur les prix à l'exportation des pays qui ne dépolluent pas.

L'adoption d'objectifs de réductions des émissions moins draconiens tels que prescrits à Bonn réduirait de plus de 25 % les coûts en bien-être des pays concernés ; les coûts d'ajustement des pays de l'OCDE, en revanche, resteraient très élevés.

Quant à l'écoefficacité, les mesures nationales de réduction de la pollution adoptées par les pays concernés entraîneraient une réduction globale des émissions de gaz carbonique évaluée à environ 9 % *(OLD)* ou 7,9 % *(NEW)*, comparativement au scénario du maintien du statu quo. Les fuites dépasseraient les 10 %[12] ; elles sont surtout le fruit de l'augmentation de la demande de combustibles de la part des pays qui ne dépolluent pas et de l'évolution des modèles d'échange de produits grands consommateurs d'énergie.

4.2. Retrait des États-Unis – Aucun échange de droits d'émission

Penchons-nous maintenant sur les conséquences économiques et environnementales du retrait des États-Unis dans le cas des mesures nationales obligatoires, illustrées dans le tableau 3.5. Dans l'optique d'une seule région, les changements observés mettent en évidence l'importance de l'effet des termes de l'échange. L'Europe et le Japon seraient encore moins bien lotis, car, après le retrait des États-Unis, les prix des combustibles sur les marchés internationaux n'auraient pas reculé et, par conséquent, les bénéfices que les importateurs retireraient des termes de l'échange s'amenuiseraient. Cet effet est d'ailleurs de plus en plus évident pour les pays en développement qui ne dépolluent pas, tels que l'Inde et les pays d'Asie. En revanche, les pays exportateurs de combustibles tels que le Canada, l'ex-Union soviétique, le Mexique et l'OPEP ainsi que le reste du monde, s'en sortiraient mieux. Le tableau 3.5 montre surtout que le retrait des États-Unis réduirait considérablement la rentabilité de l'adoption mondiale des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les coûts totaux imposés aux autres pays concernés diminueraient légèrement, tout comme la réduction des émissions globales qui reculerait d'un facteur de 3 par rapport au scénario n'envisageant pas le retrait des États-Unis[13].

12. Un taux de fuite de 10 % signifie que les pays qui ne dépolluent pas annulent un dixième des réductions d'émissions de gaz carbonique réalisées par les pays qui dépolluent.
13. Le non-ralliement des États-Unis ne signifie pas seulement que ceux-ci retirent leur contribution directe à la réduction globale des émissions, mais aussi que les fuites nuisibles ont plus que doublé comparativement au cas USin. Dans ces conditions, les États-Unis deviennent la principale source de fuites compte tenu de l'augmentation de la demande nationale de combustibles fossiles provoquée par la baisse des prix à la consommation des combustibles.

TABLEAU 3.5
Répercussions du retrait des États-Unis dans le cas des mesures nationales obligatoires

	Consommation (en % comp. au statu quo)		Réductions de CO_2 (en % comp. au statu quo)		Fuites[a] (en %)	
	USin_NTR	*USout_NTR*	*USin_NTR*	*USout_NTR*	*USin_NTR*	*USout_NTR*
Option de réduction des émissions : KYOTO (avant Bonn)						
États-Unis	–0,67	0,02	28,2	–2		9,1
Europe	–0,44	–0,53	18,2	18,2		
Japon	–0,88	–0,95	28,3	28,3		
Canada	–1,81	–1,09	28,9	28,9		
Australie et Nouvelle-Zélande	–1,05	–0,90	16,8	16,8		
Europe centrale et de l'Est	0,68	0,35	–4,9	–3,7		
Ex-URSS	–0,66	–0,50	–4,8	–3,5		
Chine	–0,09	–0,09	–1,4	–0,9	2,5	3,7
Inde	0,24	0,09	–1,5	–0,8	0,6	0,7
Mexique et OPEP	–0,73	–0,29	–3,7	–1,9	3	3,5
Asie	0,14	0	–3,8	–2,3	2	2,8
Reste du monde	–0,07	–0,08	–4,3	–2,7	3,1	4,5
TOTAL	–0,36	–0,25	9	3,1	11,1	24,2
Pays non concernés	0,08	–0,02				
Pays concernés	–0,46	–0,48				
OCDE	–0,47	–0,50				
Option de réduction des émissions : Après le compromis de Bonn						
États-Unis	–0,52	0,02	25,2	–1,6		8,8
Europe	–0,34	–0,42	15,9	15,9		
Japon	–0,63	–0,70	24,4	24,4		
Canada	–1,03	–0,46	18,3	18,3		
Australie et Nouvelle-Zélande	–0,88	–0,74	14,2	14,2		
Europe centrale et de l'Est	0,57	0,28	–4,3	–3,2		
Ex-URSS	–0,60	–0,45	–4,1	–3		
Chine	–0,07	–0,07	–1,2	–0,8	2,4	3,6
Inde	0,21	0,07	–1,3	–0,7	0,6	0,7
Mexique et OPEP	–0,62	–0,23	–3,2	–1,5	2,9	3,4
Asie	0,12	0	–3,2	–1,8	1,9	2,6
Reste du monde	–0,06	–0,06	–3,7	–2,3	3	4,5
TOTAL	–0,28	–0,19	7,9	2,7	10,9	23,6
Pays non concernés	–0,07	–0,02				
Pays concernés	–0,34	–0,36				
OCDE	–0,34	–0,37				

[a] Niveau des changements d'émissions dans les pays ou régions qui ne dépolluent pas comparativement au total des réductions d'émissions dans les régions qui dépolluent.

En d'autres termes, si les coûts associés au bien-être des pays concernés – excluant les États-Unis – inscrits dans la colonne *USin_NTR,* correspondaient à la moyenne des montants que ces pays acceptent de payer, ce qui serait idéal, le retrait des États-Unis du protocole de Kyoto exigerait qu'ils

triplent ces montants. Cette faible volonté de payer pour les changements climatiques met en évidence le dilemme politico-économique qui existe même au sein des pays industrialisés (Böhringer et Vogt, 2001). Par ailleurs, les scénarios *USout_NTR*- risqueraient de paraître plutôt injustes pour les autres pays de l'OCDE qui accepteraient de dépolluer, car il leur incomberait de supporter des coûts de bien-être importants alors que l'économie américaine ne serait presque pas affectée.

Or, ce n'est pas seulement l'acceptation des accords de Kyoto–Bonn par les autres pays de l'OCDE qui semble irréaliste. Que les États-Unis décident de se retirer ou non, l'ex-Union soviétique n'aimerait pas se voir imposer un scénario qui la priverait des échanges de permis d'émission, car elle enregistrerait des pertes de consommation totales imputables aux effets négatifs des termes de l'échange (pour les recettes tirées de l'exportation du gaz et du pétrole, en particulier). Dans ce contexte, il convient de souligner que la position des États-Unis aura des conséquences importantes sur l'éventuel pouvoir de négociation de l'ex-Union soviétique.

Si les États-Unis décidaient éventuellement de se rallier à la coalition pour la réduction, la question du respect des dispositions du protocole de l'ex-Union soviétique n'aurait plus vraiment d'importance pour les cas de mesures nationales obligatoires, du moins en termes économiques et environnementaux (de toute façon, l'ex-Union soviétique n'est pas concernée par les diminutions de ses émissions). Le retrait des États-Unis donne à l'ex-Union Soviétique un levier de négociation capital, qui lui permettra d'obtenir des concessions auprès des autres pays concernés. Ainsi, sans les États-Unis, l'adoption du protocole de Kyoto exige le ralliement de l'ex-Union soviétique, faute de quoi, les pays qui dépolluent représenteraient moins de 55 % du volume des émissions de gaz carbonique du monde industrialisé atteint en 1990.

Il est légitime de penser que l'ex-Union soviétique se montrera fort exigeante, notamment en ce qui concerne tout plafonnement qu'une tierce partie voudrait imposer aux échanges de droits d'émission entre les pays concernés.

4.3. Retrait des États-Unis – Échange des droits d'émission

Examinons maintenant les derniers scénarios élaborés pour étudier les répercussions de l'échange de droits d'émission. À l'issue de la Conférence de Bonn, aucun pays concerné ne s'est vu fixer de limites quant aux droits d'émission qu'il pouvait se procurer auprès des autres pays concernés pour respecter ses engagements en matière de réduction. Les tableaux 3.6 et 3.7 montrent les conséquences des échanges de droits d'émission entre les pays concernés, qui après Bonn ne semblent plus irréalistes.

L'échange illimité des pays concernés réduit considérablement les coûts totaux assumés par ces pays pour la mise en application des dispositions du protocole en raison de la répartition des coûts marginaux de la réduction entre les différentes régions. L'ensemble des pays de l'OCDE tirent amplement parti des droits d'émission abordables qu'ils acquièrent auprès des pays d'Europe centrale et orientale et de l'ex-Union soviétique. Malgré tout, les

TABLEAU 3.6
Impacts du retrait des États-Unis dans le cas d'échanges de droits sans restriction et objectifs Kyoto (avant Bonn)

	Consommation (en % comp. au statu quo)			Coûts marginaux de réduction (C en $US/t)		
	USin_NTR	***USin_TRD***	***USout_TRD***	***Usin_NTR***	***USin_TRD***	***USout_TRD***
États-Unis	–0,67	–0,40	0	170	61	
Europe	–0,44	–0,16	–0,03	168	61	7
Japon	–0,88	–0,15	–0,03	394	61	7
Canada	–1,81	–0,92	–0,10	193	61	7
Australie et Nouvelle-Zélande	–1,05	–0,82	–0,11	85	61	7
Europe centrale et de l'Est	0,68	1,40	0,09	0	61	7
Ex-URSS	–0,66	7,67	0,81	0	61	7
Chine	–0,09	0,03	0			
Inde	0,24	0,16	0,01			
Mexique et OPEP	–0,73	–0,45	–0,04			
Asie	0,14	0,15	0,01			
Reste du monde	–0,07	–0,01	0			
TOTAL	–0,36	–0,06	0			
Pays non concernés	–0,08	–0,03	0			
Pays concernés	–0,46	–0,07	0			
OCDE	–0,47	–0,19	–0,02			

	Réduction de CO_2 (en % comp. au statu quo)			Fuites[a] (en %)		
	USin_NTR	***USin_TRD***	***USout_TRD***	***Usin_NTR***	***USin_TRD***	***USout_TRD***
États-Unis	28,2	13,3	–0,2			0,8
Europe	18,2	7,5	1,1			
Japon	28,3	7,4	1,2			
Canada	28,9	12,4	2,2			
Australie et Nouvelle-Zélande	16,8	13,4	2,1			
Europe centrale et de l'Est	–4,9	17,9	2,8			
Ex-URSS	–4,8	16,7	2,6			
Chine	–1,4	–1,3	–0,2	2,5	2,2	0,6
Inde	–1,5	–1,1	–0,1	0,6	0,4	0,1
Mexique et OPEP	–3,7	–2,8	–0,3	3	2,3	0,5
Asie	–3,8	–2,5	–0,3	2	1,4	0,3
Reste du monde	–4,3	–2,7	–0,3	3,1	1,9	0,5
TOTAL	9	5,8	0,5	11,1	8,2	2,8

[a] Niveau des changements d'émission observés dans les régions ne dépolluant pas comparativement au total des réductions d'émissions dans les régions qui dépolluent.

TABLEAU 3.7
Impacts du retrait des États-Unis dans le cas d'échanges de droits sans restriction et objectifs après Bonn

	Consommation (en % comp. au statu quo)			Coûts marginaux de réduction (C en $US/t)		
	USin_NTR	***USin_TRD***	***USout_TRD***	***Usin_NTR***	***USin_TRD***	***USout_TRD***
États-Unis	–0,52	–0,25	0	143	39	
Europe	–0,34	–0,09	0	139	39	0
Japon	–0,63	–0,08	0	297	39	0
Canada	–1,03	–0,47	0	108	39	0
Australie et Nouvelle-Zélande	–0,88	–0,55	0	60	39	0
Europe centrale et de l'Est	0,57	0,93	0	0	39	0
Ex-URSS	–0,60	5,31	0	0	39	0
Chine	–0,07	0,02	0			
Inde	0,21	0,11	0			
Mexique et OPEP	–0,62	–0,30	0			
Asie	0,12	0,10	0			
Reste du monde	–0,06	–0,01	0			
TOTAL	–0,28	–0,03	0			
Pays non concernés	–0,07	–0,02	0			
Pays concernés	–0,34	–0,03	0			
OCDE	–0,34	–0,11	0			

	Réduction de CO_2 (en % comp. au statu quo)			Fuites[a] (en %)		
	USin_NTR	***USin_TRD***	***USout_TRD***	***Usin_NTR***	***USin_TRD***	***USout_TRD***
États-Unis	25,2	9	0			0
Europe	15,9	5	0			
Japon	24,4	5	0			
Canada	18,3	8,4	0			
Australie et Nouvelle-Zélande	14,2	9,2	0			
Europe centrale et de l'Est	–4,3	12,5	0			
Ex-URSS	–4,1	11,6	0			
Chine	–1,2	–0,9	0	2,4	1,7	0
Inde	–1,3	–0,7	0	0,6	0,3	0
Mexique et OPEP	–3,2	–1,9	0	2,9	1,7	0
Asie	–3,2	–1,7	0	1,9	1	0
Reste du monde	–3,7	–1,8	0	3	1,5	0
TOTAL	7,9	3,9	0	10,9	6,3	0

[a] Niveau des changements d'émission observés dans les régions qui ne dépolluent pas comparativement au total des réductions d'émission dans les régions qui dépolluent.

coûts en bien-être pour les États-Unis, le Canada, l'Australie et Nouvelle-Zélande seraient considérables dans les scénarios supposant que les États-Unis respectent leurs dispositions du protocole de Kyoto.

Les transferts monétaires vers les pays d'Europe centrale et orientale et l'ex-Union soviétique seraient alors importants et rapporteraient des gains importants en matière de bien-être, plus particulièrement pour l'ex-Union soviétique. Comme on pouvait s'y attendre, l'adoption d'objectifs de réduction des émissions moins contraignants (après Bonn) ne réduirait pas seulement le fardeau qui pèse sur les pays de l'OCDE, mais aussi les bénéfices que les pays d'Europe centrale et orientale et l'ex-Union Soviétique retireraient de leurs ventes de droits d'émission. En effet, l'allégement de la demande de réduction au sein des pays de l'OCDE fait baisser le prix des permis échangeables. L'échange des droits d'émission réduit les fuites globales. Toutefois, si les États-Unis venaient à respecter les dispositions du protocole, la création d'un marché des droits d'émission diminuerait les objectifs de réduction mondiale fixés dans le cadre du protocole original de Kyoto d'un tiers et ceux du protocole révisé à Bonn, de moitié. Ces répercussions négatives sur la réduction mondiale des émissions ne devraient pas faire perdre de vue que les émissions mondiales reculent incontestablement et que les coûts moyens des mesures de réduction des émissions supportés par les pays de l'OCDE qui dépolluent sont beaucoup plus intéressants que lorsque les échanges de droits d'émission ne sont pas autorisés.

Le retrait des États-Unis conjugué à l'échange des droits d'émission entre les autres pays concernés se traduisent par des coûts négligeables pour les pays obligés d'atteindre les objectifs fixés par l'ancien protocole de Kyoto et des coûts presque nuls pour ceux qui aspirent à réaliser les objectifs fixés par le nouveau protocole de Bonn. Depuis que les États-Unis, le plus gros acheteur potentiel de droits d'émission du monde, se sont retirés des accords de Kyoto, le prix des permis d'émission avoisine zéro dans le scénario *OLD*. Les objectifs de Kyoto ayant été assouplis (*NEW*), le prix de ces permis a même atteint zéro, en raison notamment de la faible demande des autres pays concernés et de l'offre de droits d'émission excédentaires de la part de l'ex-Union soviétique et des pays d'Europe centrale et orientale. Si le retrait des États-Unis et l'échange illimité des droits d'émission entre les pays concernés semblent être une bonne nouvelle du point de vue des coûts totaux, il reste que l'écoefficacité a presque disparu. En résumé, la mise en application des dispositions du protocole de Kyoto ne coûte rien, car l'économie mondiale et les émissions de gaz à effet de serre qu'elle produit progressent au même rythme que le scénario du maintien du statu quo.

4.4. Offre monopolistique des droits d'émission

Que l'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale adoptent un comportement concurrentiel sur le marché des permis d'émission reste improbable, surtout si les prix des permis échangés sur le marché international tombent à zéro, car les ventes de droits d'émission n'engendreraient alors

aucun revenu. Qu'adviendra-t-il si ces pays adoptent un comportement monopolistique et décident de limiter leur offre afin de faire grimper le prix des droits d'émission sur le marché international ? Nous avons décidé d'illustrer ce scénario en imposant des plafonds aux exportations de droits d'émission de l'ex-Union soviétique et des pays d'Europe centrale et orientale. Pour ce faire, nous avons attribué à l'ex-Union soviétique et aux pays d'Europe centrale et orientale des contingents d'exportation s'échelonnant entre 0, 10, 20, 30,…, 90 et 100 % de la différence (entre leurs niveaux d'émission en vertu du scénario du maintien du statu quo et les droits d'émission qui leur ont été accordés dans le cadre de la Convention de Bonn). Le tableau 3.8 résume les résultats obtenus en cas de non-respect des dispositions du protocole par les États-Unis et d'une politique d'échange illimité des droits d'émission entre les autres pays membres de l'OCDE[14].

La colonne « 0 » du tableau 3.8 illustre la situation où l'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale n'exportent pas leurs permis d'émission, mais où l'échange des droits d'émission entre les membres de l'OCDE est autorisé. Ce dernier cas permettrait de réduire d'environ 15 % les coûts afférents au respect des dispositions du protocole imposés à l'ensemble des pays de l'OCDE, sans que l'écoefficacité ne s'en ressente, comparativement au cas interdisant tout échange de droits d'émission.

Pour ce qui est du bien-être des régions, la comparaison entre le scénario *USout_NTR_NEW* et la colonne « 0 » montre que l'échange des droits d'émission n'aboutit pas au critère de Pareto. Les effets des termes de l'échange ressortent clairement dans cet exemple : même si l'on sait que, en l'absence d'effets de second rang, l'échange des droits d'émission est censé améliorer l'efficacité *globale*, il n'est pas dit, a priori, que l'échange des droits d'émission profitera nécessairement à *tous les* pays. Cette ambiguïté s'explique par le fait que, dans notre modèle d'équilibre, nous avons tenu compte des modifications apportées aux termes de l'échange, contrairement à la technique de l'équilibre général partiel privilégiée dans les analyses de politiques environnementales.

Lorsque l'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale vendent leurs permis d'émission excédentaires, le prix des permis d'émission de gaz carbonique sur le marché international et les coûts totaux assumés par les pays de l'OCDE stimuleraient l'accroissement des exportations de droits d'émission excédentaires. La colonne « 100 » du tableau 3.8, qui présume que l'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale se débarrassent de tous leurs permis d'émission excédentaires, coïncide avec le scénario *USout_TRD_NEW* illustré dans le tableau 3.6, où les prix des permis étaient nuls et restaient inchangés par rapport au statu quo. L'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale ne tireraient aucun profit dans ces deux cas extrêmes, car la vente des droits d'émission ne leur rapporterait rien.

14. Les gains tirés des quotas d'exportation de l'ex-Union soviétique et des pays d'Europe centrale et orientale, respectivement, augmentent.

TABLEAU 3.8

Quotas d'exportation sur les permis d'émission excédentaires de l'ex-Union soviétique et des pays d'Europe centrale et orientale en cas de non-respect des États-Unis

	USout_NTR_NEW	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Consommation (en % comp. au statu quo)												
États-Unis	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0
Europe	–0,42	–0,45	–0,40	–0,35	–0,29	–0,24	–0,18	–0,12	–0,06	–0,01	0	0
Japon	–0,70	–0,42	–0,36	–0,31	–0,25	–0,20	–0,15	–0,10	–0,05	–0,01	0	0
Canada	–0,46	–0,48	–0,49	–0,47	–0,43	–0,38	–0,30	–0,22	–0,12	–0,01	0	0
Australie et Nouvelle-Zélande	–0,74	–0,72	–0,71	–0,67	–0,60	–0,51	–0,41	–0,29	–0,16	–0,02	0	0
Europe centrale et de l'Est	0,28	0,28	0,40	0,46	0,47	0,44	0,37	0,28	0,16	0,02	0	0
Ex-URSS	–0,45	–0,40	1,10	2,04	2,52	2,61	2,37	1,85	1,09	0,14	0	0
Chine	–0,07	–0,04	–0,03	–0,03	–0,02	–0,02	–0,01	–0,01	0	0	0	0
Inde	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0	0	0
Mexique et OPEP	–0,23	–0,22	–0,18	–0,15	–0,12	–0,09	–0,07	–0,04	–0,02	0	0	0
Asie	0	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0	0
Reste du monde	–0,06	–0,05	–0,05	–0,04	–0,03	–0,03	–0,02	–0,01	–0,01	0	0	0
TOTAL	–0,19	–0,16	–0,13	–0,10	–0,07	–0,05	–0,04	–0,02	–0,01	0	0	0
Pays non concernés	–0,02	–0,01	–0,01	–0,01	–0,01	–0,01	0	0	0		0	0
Pays concernés	–0,36	–0,31	–0,24	–0,19	–0,14	–0,10	–0,07	–0,04	–0,02	0	0	0
OCDE[a]	–0,37	–0,32	–0,28	–0,25	–0,21	–0,17	–0,13	–0,09	–0,05	–0,01	0	0
Coûts marginaux de réduction des émissions (coût en $US/t)												
Europe	130	141	117	95	75	57	41	26	13	2	0	0
Japon	285	141	117	95	75	57	41	26	13	2	0	0
Canada	83	141	117	95	75	57	41	26	13	2	0	0
Australie et Nouvelle-Zélande	83	141	117	95	75	57	41	26	13	2	0	0

Réductions de CO_2 (en % comp. au statu quo)												
États-Unis	–1,6	–1,6	–1,4	–1,2	–1	–0,8	–0,6	–0,4	–0,2	0	0	0
Europe	15,9	17	14,8	12,6	10,5	8,4	6,3	4,2	2,2	0,3	0	0
Japon	24,4	15,8	13,9	12	10,1	8,2	6,2	4,3	2,3	0,3	0	0
Canada	18,3	26,4	23,5	20,5	17,4	14,2	10,9	7,5	4	0,5	0	0
Australie et Nouvelle-Zélande	14,2	26	23,2	20,3	17,2	14,1	10,9	7,6	4,1	0,5	0	0
Europe centrale et de l'Est	3,2	–3,3	–2,8	–2,4	–2	–1,6	–1,2	–0,8	–0,4	0	0	0
Ex-URSS	–3	–3	–2,8	–2,6	–2,3	–1,9	–1,5	–1,1	–0,6	–0,1	0	0
Chine	–0,8	–0,7	–0,6	–0,5	–0,4	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	0	0	0
Inde	–0,7	–0,7	–0,6	–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,2	–0,1	0	0	0
Mexique et OPEP	–1,5	–1,6	–1,3	–1,1	–0,9	–0,7	–0,5	–0,3	–0,2	0	0	0
Asie	–1,8	–1,9	–1,6	–1,3	–1,1	–0,8	–0,6	–0,4	–0,2	0	0	0
Reste du monde	–2,3	–2,4	–2	–1,7	–1,4	–1,1	–0,9	–0,6	–0,3	0	0	0
TOTAL	2,7	2,7	2,3	2	1,7	1,3	1	0,7	0,4	0	0	0
Fuites[b] (en %)												
États-Unis	8,8	9	7,8	6,7	5,6	4,5	3,4	2,3	1,2	0,1	0	0
Chine	3,6	3,6	3,1	2,6	2,1	1,7	1,3	0,8	0,4	0,1	0	0
Inde	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0	0
Mexique et OPEP	3,4	3,4	2,9	2,3	1,9	1,4	1	0,7	0,3	0	0	0
Asie	2,6	2,7	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0	0	0
Reste du monde	4,5	4,6	4	3,4	2,8	2,2	1,7	1,1	0,6	0,1	0	0
TOTAL	23,6	24	20,7	17,5	14,4	11,5	8,6	5,8	3	0,3	0	0

[a] Remarque : l'OCDE ne comprend pas ici les États-Unis (cas de non-respect des dispositions du protocole).
[b] Niveau des changements d'émission des pays qui ne dépolluent pas comparativement au total des réductions d'émission des régions qui dépolluent.

Les résultats chiffrés montrent que l'ex-Union soviétique s'emploierait à réduire ses ventes de permis d'émission excédentaires à 40 % afin de maximiser son bien-être[15]. Dans ce cas, les coûts supportés par les pays de l'OCDE et la réduction des émissions globales diminueraient de moitié environ la valeur retirée des échanges d'émissions (effectués uniquement avec les pays membres de l'OCDE). Le tableau 3.8 illustre les choix possibles entre l'écoefficacité et les coûts totaux imposés aux pays de l'OCDE qui respectent les dispositions du protocole de Kyoto, d'une part, et la répartition du fardeau entre les pays de l'OCDE, l'ex-Union soviétique et les pays d'Europe centrale et orientale, d'autre part.

5. Conclusions

Pour les besoins de l'analyse présentée dans ce chapitre, nous avons étudié plusieurs scénarios de mise en application des dispositions du protocole de Kyoto et comparé différentes options possibles selon trois dimensions politiques importantes : le respect des dispositions du protocole de Kyoto par les États-Unis ou leur retrait ; l'application obligatoire de mesures nationales par rapport à l'échange illimité des droits d'émission entre les pays concernés ; et les objectifs du protocole original de Kyoto par rapport aux objectifs assouplis de Bonn.

Nos résultats indiquent clairement que le retrait des États-Unis du protocole laisse envisager une sérieuse réduction de l'écoefficacité. Si les échanges de droits d'émission entre les autres pays concernés sont presque illimités, ce qui, à l'issue de la Convention de Bonn, semblait fort probable, la réduction des émissions mondiales de gaz carbonique serait nulle, ce qui revient au statu quo. Pourquoi ? Simplement parce que l'offre de droits d'émission excédentaires par la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe centrale et orientale dépasse largement la demande des pays de l'OCDE (sans les États-Unis), ce qui exerce une pression à la baisse sur les prix des permis qui tombent presque à zéro (dans le cas où les objectifs de Kyoto n'avaient pas été assouplis pour accorder des crédits de puits de carbone) ou exactement à zéro (dans le cas où les objectifs de Kyoto tiennent compte des crédits de puits de carbone).

Si les autres pays de l'OCDE décidaient d'adopter des mesures strictement nationales pour remédier aux émissions de gaz à effet de serre, les émissions mondiales de gaz carbonique pourraient être réduites de 2,7 % (si les crédits de puits de carbone sont acceptés), voire de 3,1 % (si les crédits de puits de carbone sont refusés). Cependant, les réductions mondiales d'émission ne représenteraient alors qu'environ un tiers du volume qui pourrait être atteint si les États-Unis respectaient les dispositions du protocole.

15. Il y a lieu de signaler que les pays d'Europe centrale et orientale préfèrent un régime de contingent d'exportation légèrement plus rigoureux. En effet, la forte baisse des prix des combustibles observée sur les marchés internationaux stimulerait les gains qu'ils tirent des termes de l'échange sur les marchés des combustibles fossiles, qui viendraient largement compenser les recettes cédées dans la vente des permis d'émission.

Si les États-Unis respectaient le protocole, les autres pays de l'OCDE encourraient à peu de chose près les mêmes coûts d'ajustement considérables. La volonté implicite de payer devrait donc tripler dans ces pays si les États-Unis se retirent. Une telle politique serait plutôt inacceptable aux yeux des citoyens des pays membres de l'OCDE, du point de vue non seulement de l'efficacité au niveau des coûts, mais aussi de l'équité.

Comparativement à l'instauration d'un programme de mesures strictement nationales, l'offre monopolistique de permis d'émission par la Russie, l'Ukraine et les pays d'Europe centrale et orientale pourrait annuler un volume d'émissions de gaz à effet de serre sur un espace plus étendu et réduire de moitié les coûts afférents au respect des dispositions du protocole imposés aux pays de l'OCDE qui dépolluent. Toutefois, l'écoefficacité reculerait également, et le volume des réductions mondiales d'émissions atteindrait alors à peine 1 % des objectifs révisés du protocole de Kyoto.

Les responsables politiques ont réservé un bon accueil aux négociations sur les changements climatiques menées dans le cadre de la Convention de Bonn. Ils estiment qu'elles représentent un tournant décisif dans les politiques climatiques internationales. En revanche, les effets environnementaux sont loin de nous réjouir : les crédits de puits, l'échange de droits d'émissions et, plus particulièrement, le retrait tenace des États-Unis effaceront les dispositions de protection de l'environnement stipulées dans le protocole de Kyoto.

Malgré tous les résultats de nos estimations, nous pensons que, même à défaut de réductions vraiment significatives des émissions, la ratification du protocole de Kyoto est indispensable au renforcement du processus d'élaboration de politiques et de mesures en faveur de la protection du climat. Sa non-ratification risquerait de faire reculer les efforts de ces dernières années. Il reste à espérer que les États-Unis finissent par se rallier au protocole de Kyoto, en souscrivant à de nouvelles conditions. Les coûts économiques relatifs au respect des dispositions du protocole sont relativement modestes, ce qui pourrait accroître les pressions sur la politique intérieure des États-Unis et jouer en faveur de l'adoption de mesures coordonnées de réduction internationale de la pollution. La ratification du protocole faciliterait dès lors la réalisation efficace des objectifs en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre visée dans la deuxième période d'engagement du protocole après 2012.

Références bibliographiques

BERNSTEIN, P., MONTGOMERY, D.T., RUTHERFORD, T.F., et YANG, G. 1999. Effects of restrictions on international permit trading : The MS-MRT Model. *The Energy Journal* Special Issue : 221-257.

BERGMANN, L. 1990. The development of computable general equilibrium models. Dans *General Equilibrium Modeling and Economic Policy Analysis*, Bergman, L., Jorgenson, D.W., Zalai. E. (dir.). New York : Cambridge University Press, 3-30.

BÖHRINGER, C. 2000. Cooling down hot air : A global CGE analysis of Post-Kyoto carbon abatement strategies. *Energy Policy* 28 : 779-789.

BÖHRINGER, C. 2003. Climate politics from Kyoto to Bonn : From little to nothing ? *The Energy Journal* 23 : 51-71.

BÖHRINGER, C., JENSEN, J., et RUTHERFORD, T.F. 2000. Energy market projections and differentiated carbon abatement in the European Union. Dans *Efficiency and Equity of Climate Change Policy*, C. Carraro (dir.). Dordrecht, NL : Kluwer Academic Publishers, 199-220.

BÖHRINGER, C., et RUTHERFORD, T.F. 2002. Carbon abatement and international spillovers. *Environmental and Resource Economics* 22 : 341-417.

BÖHRINGER C., VOGT, C. 2001. Internationaler Klimaschutz-nicht mehr als symbolische Politik ? *Aussenwirtschaft* 56 : 139-155.

BOLLEN, J., GIELEN, A., et TIMMER, H. 1999. Clubs, ceilings and CDM : Macroeconomics of compliance with the Kyoto protocol. *The Energy Journal* Special Issue : 177-206.

CRIQUI, P., MIMA, S., et VIGUIER, L. 1999. Marginal abatement costs of CO_2 emission reductions, geographical flexibility and concrete ceilings : An assessment using the POLES model. *Energy Policy* 27 : 585-602.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). 1998. Annual Energy Outlook (AEO 1998). Washington, DC : Energy Information Administration. Disponible à : <www.eia.doe.gov>.

ELLERMAN, A.D., WING, I.S. 2000. Supplementarity : An invitation for monopsony. *The Energy Journal* 21 : 29-59.

GRUBB, M., EDMONDS, J., TEN BRINK, P., et MORRISON, M. 1993. The costs of limiting fossil-fuel CO_2 emissions : A survey and analysis. *Annual Review of Energy and Environment* 18 : 397-478.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 1996. *Energy Prices and Taxes, Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries*. Paris, France : IEA publications.

MCDOUGALL, R.A., ELBEHRI, A., et TRUONG, T.P. 1998. *Global Trade Assistance and Protection : The GTAP4 Data Base*. Purdue University, West Lafayette, IN : Center for Global Trade Analysis.

PALTSEV, S.V. 2000. *The Kyoto Protocol : Hot Air for Russia ?*, University of Colorado, Working Paper 00-9.
Disponible à : <debreu.colorado.edu/projects/sergey_hotair.pdf>.

RUTHERFORD, T.F., et PALTSEV, S.V. 2000. GTAP-Energy in GAMS. University of Colorado, Working Paper 00-2.
Disponible à : <debreu.colorado.edu/download/gtap-eg.html>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM, INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (UNEP). 2001. *Climate Change 2001 : Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK : Cambridge University Press.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). 2001. *Review of the Implementation of Commitments and of Other Provisions of the Convention,* FCCC/CP/2001/L.7, VI, 5.

WEYANT, J. (dir.). 1999. The costs of the Kyoto protocol : A multi-model evaluation. *The Energy Journal Special Issue*.

CHAPITRE 4

IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET COÛT ÉCONOMIQUE DU TRAITEMENT DES DÉCHETS

Une analyse d'entrée-sortie†

SHINICHIRO NAKAMURA ET YASUSHI KONDO
École de sciences politiques et économiques
Université de Waseda

† Ce texte a fait l'objet d'une allocution prononcée le vendredi 11 octobre 2002 à la séance d'ouverture de la XIVe Conférence internationale des techniques d'analyses d'entrée-sortie.

Résumé

Toute activité économique génère des déchets en tout genre. Toutefois, l'analyse d'entrée-sortie classique ignore l'interdépendance entre les flux de biens et de déchets. Dans ce chapitre, nous proposons une généralisation du modèle environnemental de Leontief-Duchin en présentant une application à la gestion des déchets. Nous examinons également si ces politiques de gestion des déchets sont économiquement viables. Pour évaluer le cycle de vie d'une telle politique, un modèle de coûts et de prix des déchets, dual au modèle d'entrée-sortie, est élaboré. Le modèle de coûts d'entrée-sortie dual se distingue du modèle d'entrée-sortie conventionnel par la présence de la vente et de l'achat des déchets récupérés. Ce modèle est appliqué à la situation du Japon afin d'évaluer les effets d'une concentration régionale d'incinérateurs. Les résultats montrent que la concentration régionale d'incinérateurs est un moyen efficace de réduire les émissions de CO_2 et d'alléger l'utilisation des décharges publiques, mais que les coûts économiques d'une telle solution sont considérables, à moins d'améliorer de manière significative l'efficacité du transport des déchets.

1. Introduction

Toute activité économique génère des déchets en tout genre qui doivent être traités avant un rejet ultime dans l'environnement. À chaque transfert de biens entre différents secteurs de l'économie correspond un flux intersectoriel de déchets auquel se rajoutent des secteurs de traitement des déchets. À l'origine, l'analyse d'entrée-sortie a été élaborée pour décrire les échanges de biens d'un secteur à l'autre, mais pas pour tenir compte des émissions de déchets inhérentes. Par conséquent, l'analyse d'entrée-sortie classique ne peut prendre en considération l'interaction entre les secteurs de production de biens et d'émission de déchets.

Leontief (1970) a donc généralisé le modèle d'entrée-sortie classique pour tenir compte de l'émission de polluants, de leur réduction et de l'interdépendance qui existe entre les secteurs de production de biens et ceux qui réduisent la pollution. En matière de gestion des déchets, le modèle environnemental d'entrée-sortie de Leontief se caractérise par une correspondance biunivoque stricte entre un polluant (déchet) et son procédé de réduction (traitement ; Nakamura et Kondo, 2002). Duchin (1990) a ensuite généralisé ce modèle d'entrée-sortie environnemental pour y inclure la production de résidus de traitement, sujets à être rejetés dans l'eau de manière définitive. Malheureusement, cette correspondance biunivoque entre les types de déchets et ceux des procédés de traitement n'est pas applicable dans le cas expérimental qui nous intéresse, à savoir le traitement des déchets où les types de déchets et leurs procédés de traitement sont multiples.

Afin de rendre le modèle environnemental d'entrée-sortie applicable aux questions de gestion des déchets, nous avons élaboré un nouveau modèle d'entrée-sortie de déchets (ESD ; Nakamura et Kondo, 2002). Celui-ci peut fonctionner avec une combinaison arbitraire de procédés de traitement appliquée à une combinaison arbitraire de types de déchets ; nous supposons ceci techniquement réalisable. Le nombre de types de déchets et de celui des procédés de traitement peut être établi arbitrairement et ne requiert aucune correspondance. Le modèle peut en outre tenir compte de déchets produits virtuellement par n'importe quelle source de l'économie, y compris les déchets solides municipaux (DSM) produits par les secteurs de la demande finale, les déchets industriels et commerciaux des secteurs de production de biens et services ainsi que par les secteurs de traitement des déchets produisant des résidus.

Le modèle d'ESD, dans sa forme originale, touche à l'aspect quantitatif de l'interdépendance entre biens et déchets, mais ignore les aspects de coûts et de prix. Par ailleurs, aussi prometteur que soit un programme ou une politique de gestion des déchets d'un point de vue de l'environnement, il ne peut être introduit avant d'en démontrer sa viabilité économique. Et, souvent, s'il n'est pas introduit à grande échelle, son efficacité sur le plan de l'environnement ne peut être réalisée.

Avec cela en tête, nous avons conçu un modèle de coût et de prix lié au modèle quantitatif. Dans une analyse d'entrée-sortie classique, on peut l'obtenir facilement. Cependant, ce n'est pas le cas pour le modèle d'ESD, à

cause de l'existence des déchets en tant que coproduits et de leur fonction d'achat et de vente. En effet, le modèle d'ESD se caractérise par cet aspect touchant l'achat et la vente de déchets récupérables. Nous utiliserons comme exemple le modèle d'ESD quantitatif et celui des prix pour évaluer la concentration régionale d'incinérateurs au Japon.

2. Le modèle d'entrée-sortie des déchets

2.1. Le modèle quantitatif

Soit n^{I} le nombre de secteurs de production de biens et services (nommés dorénavant « secteurs de biens »), n^{II} les secteurs de traitement des déchets, n^{W} les types de déchets et ($n := n^{\mathrm{I}} + n^{\mathrm{II}}$). Pour une explication plus claire, nous définissons l'ensemble des nombres naturels se rapportant à chacun de ces secteurs ou types de déchets par : $\mathrm{N}^{\mathrm{I}} := \{1, \ldots, n^{\mathrm{I}}\}$, $\mathrm{N}^{\mathrm{II}} := \{n^{\mathrm{I}} + 1, \ldots, n^{\mathrm{I}} + n^{\mathrm{II}}\}$, $\mathrm{N} := \mathrm{N}^{\mathrm{I}} \cup \mathrm{N}^{\mathrm{II}}$ et $\mathrm{N}^{\mathrm{W}} := \{1, \ldots, n^{\mathrm{W}}\}$. Nous calculons pour le secteur j ($j \in \mathrm{N}$) sa production avec x_j, son intrant provenant du secteur i ($i \in \mathrm{N}$) avec X_{ij}, l'émission de déchets k ($k \in \mathrm{N}$) avec $\mathrm{W}^{\oplus}_{kj}$ et les déchets utilisés k par $\mathrm{W}^{\ominus}_{kj}$. La « production » d'un secteur de traitement de déchets est mesurée par la quantité de déchets traitée. De la même manière, nous définissons la demande finale pour i ($i \in \mathrm{N}$) par $\mathrm{X}_{i\mathrm{F}}$, l'émission de déchets k ($k \in \mathrm{N}^{\mathrm{W}}$) du même secteur par $\mathrm{W}^{\oplus}_{k\mathrm{F}}$ et les déchets k utilisés par ce secteur par $\mathrm{W}^{\ominus}_{k\mathrm{F}}$. L'émission nette de déchets k du secteur j se calcule avec $\mathrm{W}_{kj} = \mathrm{W}^{\oplus}_{kj} - \mathrm{W}^{\ominus}_{kj}$. Lorsque $\mathrm{W}_{kj} > 0$, le secteur j génère une plus grande quantité de déchets k que celle utilisée comme intrant et crée donc une demande positive pour le traitement des déchets. En revanche, lorsque $\mathrm{W}_{kj} < 0$, le secteur j réduit la quantité de déchets k qui doit être traitée. La somme de tous les W_{kj} des secteurs j, w_{k}, donne alors la quantité totale pour un type de déchets k qui doit subir un traitement.

Nous obtenons donc les équations suivantes indiquant la production de biens, la quantité de déchets traités et l'émission nette de déchets :

$$x_i = \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{I}}} \mathrm{X}_{ij} + \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{II}}} \mathrm{X}_{ij} + \mathrm{X}_{i\mathrm{F}} \qquad (i \in \mathrm{N}^{\mathrm{I}}), \tag{1}$$

$$x_l = \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{I}}} \mathrm{X}_{lj} + \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{II}}} \mathrm{X}_{lj} + \mathrm{X}_{l\mathrm{F}} \qquad (l \in \mathrm{N}^{\mathrm{II}}), \tag{2}$$

$$x_k = \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{I}}} \mathrm{X}_{kj} + \sum_{j \in \mathrm{N}^{\mathrm{II}}} \mathrm{X}_{kj} + \mathrm{X}_{k\mathrm{F}} \qquad (k \in \mathrm{N}^{\mathrm{W}}). \tag{3}$$

La production x_{i} ($i \in \mathrm{N}^{\mathrm{I}}$) des secteurs de biens peut être mesurée selon chaque unité spécifique de ces secteurs. Toutefois, nous supposons que chaque type de déchets est mesuré dans une unité commune, c'est-à-dire selon le poids. De même, la production x_{i} ($i \in \mathrm{N}^{\mathrm{II}}$) d'un secteur de traitement des déchets est également mesurée selon le poids.

Soit a_{ij} le coefficient d'entrée classique, $g^{\oplus}_{kj} := \mathrm{W}^{\oplus}_{k}/x_j$ le coefficient d'émission de déchets, $g^{\ominus}_{kj} := \mathrm{W}^{\ominus}_{k}/x_j$ le coefficient d'entrée de déchets et $g_{kj} = g^{\oplus}_{kj} - g^{\ominus}_{kj}$ le coefficient de l'émission nette de déchets où $k \in \mathrm{N}^{\mathrm{W}}$, $j \in \mathrm{N}$. En utilisant une notation matricielle qui repose sur ces coefficients, on peut récrire les équations (1), (2) et (3) comme suit :

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{I}} = \mathbf{A}_{\mathrm{I,I}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{I}} + \mathbf{A}_{\mathrm{I,II}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{II}} + \mathbf{X}_{\mathrm{I,F}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{II}} = \mathbf{A}_{\mathrm{II,I}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{I}} + \mathbf{A}_{\mathrm{II,II}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{II}} + \mathbf{X}_{\mathrm{II,F}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{w} = \mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{I}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{I}} + \mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{II}}\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{II}} + \mathbf{W}_{\cdot,\mathrm{F}} \tag{6}$$

Afin d'élaborer un modèle d'entrée-sortie capable d'analyser les questions de gestion des déchets et de recyclage, Nakamura et Kondo (2002) ont conçu le modèle d'ESD, selon lequel la solution du système d'équations ci-dessus est apportée par

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix} = \left(\mathbf{I} - \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\mathrm{I,I}} & \mathbf{A}_{\mathrm{I,II}} \\ \mathbf{S}\,\mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{I}} & \mathbf{S}\,\mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{II}} \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{\mathrm{I,F}} \\ \mathbf{S}\,\mathbf{W}_{\cdot,\mathrm{F}} \end{pmatrix} \tag{7}$$

où S est une matrice de répartition $n^{\mathrm{II}} \times n^{\mathrm{W}}$ non négative dont la constituante (i, j) de s_{ij} indique la proportion des déchets j traitée selon le procédé i. Le modèle d'ESS de Leontief (1970) et Duchin (1990) correspond à un cas spécial de (7) où S est une matrice unité d'ordre n^{II}. Cette condition est difficilement applicable dans la gestion réelle des déchets, car, en général, il n'y a pas de correspondance biunivoque entre un déchet et son procédé de traitement. On retrouve plutôt, d'une part, plusieurs procédés de traitement pouvant traiter un déchet solide donné, que ce soit séparément ou en combinaison, et, d'autre part, tout déchet solide pouvant aussi être envoyé dans une décharge publique.

Le modèle d'ESD est une généralisation importante du modèle Leontief-Duchin puisque la matrice de répartition S n'est pas tenue d'être symétrique et parce que le nombre d'éléments non nuls dans les rangées ou colonnes n'est plus restreint à un seul.

Soit n^{E} le nombre de types d'émission de déchets. On peut obtenir $\Gamma_{\cdot,\mathrm{I}}$ pour une matrice $n^{\mathrm{E}} \times n^{\mathrm{I}}$ représentant les émissions de déchets d'une unité de production d'un secteur de biens. On peut également calculer $\Gamma_{\cdot,\mathrm{II}}$ pour une matrice $n^{\mathrm{E}} \times n^{\mathrm{II}}$ représentant les émissions de déchets d'une unité de production d'un secteur de traitement des déchets. Le vecteur des émissions totales e est alors obtenu par

$$\boldsymbol{e} = \Gamma \left(\mathbf{I} - \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\mathrm{I,I}} & \mathbf{A}_{\mathrm{I,II}} \\ \mathbf{S}\,\mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{I}} & \mathbf{S}\,\mathbf{G}_{\cdot,\mathrm{II}} \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{\mathrm{I,F}} \\ \mathbf{S}\,\mathbf{W}_{\cdot,\mathrm{II}} \end{pmatrix} + \mathbf{E}_{\cdot,\mathrm{F}}, \tag{8}$$

où $\Gamma = (\Gamma_{\cdot,\mathrm{I}}, \Gamma_{\cdot,\mathrm{II}})$, et $\mathbf{E}_{\cdot,\mathrm{F}}$ représente l'émission directe du secteur de la demande finale.

2.2. Le modèle de prix ESD

Nous nous attarderons maintenant aux volets coût et prix du modèle ESD. Soit p_j le prix de la production du secteur j ($j \in \mathrm{N}$), p_k^w le prix des déchets $k \in \mathrm{N^W}$, V_j le coût des facteurs primaires de production qui inclut la dépréciation ainsi que les taxes moins les subventions, puis $\mathrm{R}_{kj} > 0$ la quantité de déchets $k \in \mathrm{N^W}$ qui était utilisée comme intrant pour le secteur $j \in \mathrm{N} \cup \{\mathrm{F}\}$. La définition du coût dans le modèle ESD, par rapport au modèle classique d'entrée-sortie, se caractérise par cet aspect de l'achat et de la vente des déchets récupérés. La vente de ces déchets est une importante source de revenus pour les entreprises de recyclage, par exemple, les principaux revenus des entreprises de démontage d'automobiles mises au rebut proviennent de la vente de débris de métal à des fabricants d'acier utilisant des fours à arc électriques.

Il y a des cas, cependant, où le prix des déchets est négatif, c'est-à-dire que les déchets sont « acceptés » par l'utilisateur, mais il les fait payer. Par exemple, les fabricants de ciment japonais acceptent, en faisant payer, des pneus mis au rebut et des déchets plastiques qu'ils utilisent comme source de chaleur additionnelle dans leurs fours. Le prix des déchets peut donc devenir négatif. Ainsi, selon le signe du prix, on retrouve trois situations distinctes : les déchets ont une valeur positive quand $p_k^w > 0$; la valeur est nulle, mais les déchets sont tout de même acceptés par d'autres secteurs comme intrants, sans les faire payer, quand $p_k^w = 0$; et la valeur est nulle, mais les déchets sont acceptés moyennant un certain prix, quand $p_k^w < 0$. Ainsi, R_{kj} représentera dorénavant la « vente des déchets », peu importe si le prix des déchets k est positif, nul ou négatif.

Dans le système comptable d'entrée-sortie, l'identité équivaut à la valeur de la production par rapport au coût total. En tenant compte des transactions des déchets, cette identité du secteur j ($j \in \mathrm{N}$) peut être obtenue par :

$$p_j x_j = \underbrace{\sum_{i \in \mathrm{N^I}} p_i a_{ij} x_j}_{(a)} + \underbrace{\sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l \sum_{k \in \mathrm{N}^w} s_{lk} \left(g_{kj}^{\oplus} x_j - \mathrm{R}_{kj} \right)}_{(b)}$$

$$+ \underbrace{\sum_{k \in \mathrm{N}^w} p_k^w g_{kj}^{\ominus} x_j}_{(c)} - \underbrace{\sum_{k \in \mathrm{N}^w} p_k^w \mathrm{R}_{kj}}_{(d)} + \underbrace{\mathrm{V}_j}_{(e)}. \qquad (9)$$

Le coût se répartit en cinq composantes : (*a*) le coût des biens utilisés comme intrants, (*b*) le coût du traitement des déchets, (*c*) le coût des déchets utilisés comme intrants, (*d*) les revenus provenant de la vente de déchets et (*e*) le coût des facteurs primaires utilisés comme intrants. Les éléments (*b*), (*c*) et (*d*) sont uniques au modèle ESD dual des prix. Lorsqu'il n'y a pas de recyclage, l'égalité $\mathrm{R}_{kj} = 0$ s'applique pour tous les k et j, les éléments (*c*) et (*d*) disparaissent et (*b*) se résume au coût du traitement des déchets émis dans le secteur. L'élément (*b*) indique que la valeur de la quantité de déchets à traiter est réduite de la valeur de R_{kj}.

L'expression suivante est obtenue à partir des termes réorganisés, et rend explicite l'apport de la vente des déchets au coût :

$$p_j x_j = \underbrace{\sum_{i \in \mathrm{N^I}} p_i a_{ij} x_j}_{(a)} + \underbrace{\sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l \sum_{k \in \mathrm{N}^w} s_{lk}\, g^{\oplus}_{kj} x_j}_{(f)} + \underbrace{\sum_{k \in \mathrm{N}^w} p^w_k g^{\ominus}_{kj} x_j}_{(c)} - \underbrace{\sum_{k \in \mathrm{N}^w} (p^w_k + \sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l s_{lk})\, \mathrm{R}_{kj}}_{(g)} + \underbrace{\mathrm{V}_j}_{(e)} . \tag{10}$$

Ici, le terme (*f*) représente le coût du traitement des déchets qui aurait été requis si aucun déchet n'avait été vendu. De plus, quand des déchets sont vendus à d'autres secteurs, le prix s'en trouve modifié à cause de l'élément (*g*) de l'équation. Le signe de l'expression à l'intérieur des parenthèses de (*g*) détermine jusqu'où la vente peut réduire le coût. Lorsque $p^w_k > 0$, la vente de déchets réduit à coup sûr le coût de production. Il est important de remarquer que, même si $p^w_k \leq 0$, la vente peut diminuer le coût en supposant que la condition suivante soit satisfaite :

$$p^w_k + \sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l s_{lk} > 0 \Leftrightarrow |p^w_k| = -\, p^w_k < \sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l s_{lk}. \tag{11}$$

Cette situation correspond au cas où la vente à d'autres secteurs s'effectue à un prix négatif et que cela coûte moins cher que de faire traiter les déchets.

La version complète de ce modèle contient la démonstration nécessitant que l'équation du prix suivante puisse dériver de l'équation (10)

$$p_j = \sum_{i \in \mathrm{N^I}} p_i a_{ij} + \sum_{l \in \mathrm{N^{II}}} p_l \sum_{k \in \mathrm{N}^w} s_{lk}(1 - r_k) g^{\oplus}_{kj} + \sum_{k \in \mathrm{N}^w} p^w_k (g^{\ominus}_{kj} - r_k g^{\oplus}_{kj}) + v_j \tag{12}$$

où v_j représente le prix moyen des intrants utilisés par le secteur *j*. En utilisant une notation matricielle, cette équation peut alors être récrite comme suit :

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{p}_{\mathrm{I}} \quad \boldsymbol{p}_{\mathrm{II}}) = (\boldsymbol{p}_{\mathrm{I}} \quad \boldsymbol{p}_{\mathrm{II}}) & \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\mathrm{I,I}} & \mathbf{A}_{\mathrm{I,II}} \\ \mathbf{S(I - D)G}^{\oplus}_{\mathrm{I}} & \mathbf{S(I - D)G}^{\oplus}_{\mathrm{II}} \end{pmatrix} \\ & + \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}(\mathbf{G}^{\ominus}_{\mathrm{I}} - \mathbf{DG}^{\oplus}_{\mathrm{I}} \quad \mathbf{G}^{\ominus}_{\mathrm{II}} - \mathbf{DG}^{\oplus}_{\mathrm{II}}) + (\boldsymbol{v}_{\mathrm{I}} \quad \boldsymbol{v}_{\mathrm{II}}) , \end{aligned} \tag{13}$$

où $\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{p}_{\mathrm{I}}, \boldsymbol{p}_{\mathrm{II}}) = (\boldsymbol{p}_1, \ldots, \boldsymbol{p}_n)$, $\boldsymbol{v} = (\boldsymbol{v}_{\mathrm{I}}, \boldsymbol{v}_{\mathrm{II}}) = (\boldsymbol{v}_1, \ldots, \boldsymbol{v}_n)$, $\boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}_{\boldsymbol{n}} = (\boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}_1, \ldots, \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}_{n^w})$, **D** est une matrice diagonale où le $k^{\text{ième}}$ élément diagonal est r_k, c'est-à-dire $\mathbf{D} = diag\,(r_1, \ldots, r_{n^w})$, et **I** est une matrice diagonale unitaire de dimension concordante. On peut écrire le tout d'une façon plus compacte comme suit :

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\mathrm{I,'}} \\ \mathbf{S(I - D)\, G}^{\oplus} \end{pmatrix} + \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}(\mathbf{G}^{\ominus} - \mathbf{DG}^{\oplus}) + \boldsymbol{v} \tag{14}$$

S'il est possible de résoudre l'équation (14) pour *p*, cette solution peut être obtenue par

$$\boldsymbol{p} = \left\{\boldsymbol{p}^{\boldsymbol{w}}(\mathbf{G}^{\ominus} - \mathbf{DG}^{\oplus}) + \boldsymbol{v})\right\} \left(\mathbf{I} - \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\boldsymbol{t}} \\ \mathbf{S\,(I - D)G}^{\oplus} \end{pmatrix}\right)^{-1}. \tag{15}$$

En comparant les matrices inverses représentées par les équations (15) et (7), on observe que la dernière équation revient à la première pour des **S** et **D** arbitraires seulement si $\mathbf{DG}^{\oplus} = \mathbf{G}^{\ominus}$, ce qui est représenté par :

$$r_k g^{\oplus}_{kj} = g^{\ominus}_{kj} \quad (k \in \mathrm{N}^w,\ j \in \mathrm{N}) \tag{16}$$

Selon cette condition, chaque secteur est autosuffisant en ce qui concerne les déchets qu'il a besoin d'utiliser. Dès lors, il n'y a pas de vente de déchets aux autres secteurs. La solution à l'équation (15) devient alors :

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{v}\left(\mathbf{I} - \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{S}\,(\mathbf{G}^{\oplus} - \mathbf{G}^{\ominus}) \end{pmatrix}\right)^{-1}, \tag{17}$$

ce qui correspond à un nouveau modèle dual de prix du modèle d'entrée-sortie de type Leontief. L'équation (16) répond à la situation où il n'y a aucun recyclage, c'est-à-dire lorsque $r_k = 0$ pour tous les k.

3. Application : les effets d'un traitement régional

3.1. Scénarios et conditions initiales

Nous avons mis sur pied un modèle pour le Japon à partir de tableaux entrées-sorties élaborés en 1995, de données sur les émissions de déchets et le recyclage, ainsi qu'à partir de renseignements techniques sur les procédés de traitement des déchets. Le tableau compilé comprend 78 secteurs industriels, 5 procédés de traitement de base (compostage, gazéification, dilacération, incinération et envoi à une décharge publique), 34 types de déchets différents et 9 types de gros rebuts. L'incinération a été à son tour classifiée en différents types selon la taille des installations, leurs méthodes de récupération d'énergie et de traitement des résidus de l'incinération (Nakamura et Kondo, 2002, pour plus de détails sur le modèle).

Le modèle est appliqué ici afin d'évaluer les répercussions économiques et environnementales d'un traitement régional des déchets, c'est-à-dire que de nombreux petits incinérateurs sont remplacés par un nombre moindre de gros incinérateurs. Le tableau 4.1 indique la capacité proportionnelle des trois types d'incinérateurs, leur mode de fonctionnement et leur utilisation de la chaleur perdue.

Type I Le plus gros, avec une capacité quotidienne de près de 500 tonnes, fonctionne 24 heures par jour. Il produit de l'électricité à partir de la chaleur perdue et il est équipé d'installations de fusion et de solidification pour les résidus de l'incinération.

Type II L'incinérateur de taille moyenne (autour de 180 tonnes par jour) fonctionne également 24 heures par jour. En revanche, il ne produit pas d'électricité et ne possède pas d'installation de fusion ni de solidification des résidus.

TABLEAU 4.1
Types d'incinérateurs et scénarios

Types d'incinérateur	I	II	III
Propriétés des incinérateurs			
Taille [tonne/jour]	500	180	26
Fonctionnement	continu	continu	par lots
Fusion des résidus	oui	non	non
Électricité à partir de la chaleur perdue	oui	non	non
Scénarios			
Année de référence : 1995			
Proportion de la capacité	0,343	0,144	0,513
Nombre d'installations	145	169	4 177
Traitement régional des DSM			
Proportion de la capacité	0,650	0	0,350
Nombre d'installations	274	0	2 876
Traitement régional des DSM et des déchets industriels			
Proportion de la capacité	1,0	0	0
Nombre d'installations	423	0	0

Note : Comprend les DSM et les déchets industriels
Source : Nakamura et Kondo (2002).

Type III Le plus petit des incinérateurs ne fonctionne seulement qu'une partie de la journée.

Le tableau 4.1 présente aussi trois scénarios différents :

Scénario A Estimations de 1995 pour le Japon, où 34 % des déchets à incinérer étaient traités par le type I, 15 %, par le type II et les 51 % qui restent, par le type III.

Scénario B Cas hypothétique de traitement où les déchets solides municipaux (traités par les incinérateurs de type II et de type III dans le scénario A) seraient tous transportés vers des incinérateurs de type I. Le nombre total d'incinérateurs diminue alors pour atteindre 70 % du nombre qui existait en 1995.

Scénario C Autre cas hypothétique où tous les déchets solides, y compris les déchets municipaux et industriels, sont pris en charge par le traitement régional. Tous les déchets sont alors traités par des incinérateurs de type I (leur nombre serait réduit à 13 % du nombre qui existait en 1995).

Chacun de ces scénarios peut être représenté par une matrice de répartition. Par exemple, soit S_B la matrice de répartition qui correspond au scénario B où 65 % des déchets à incinérer sont attribués au type I, et le reste, au type III. Le niveau de production et d'émission sectorielles ainsi que le prix de production qui correspond au scénario B peuvent alors se calculer en substituant S par S_B dans les équations (7), (8) et (14).

Comme il y a moins d'incinérateurs dans le cas d'un traitement régional, les déchets qui sont dirigés vers les incinérateurs de type I doivent être transportés sur une plus grande distance que pour le scénario de 1995 (A). Trois suppositions simplificatrices sont introduites en ce qui concerne le transport des déchets. Premièrement, nous considérons que, selon le cas de 1995 (scénario A), la distance moyenne parcourue lors du transport des déchets est de 12 km, peu importe le type d'incinérateur (il s'agit de la valeur par défaut utilisée dans Tanaka et Matsuto, 1998). De grands incinérateurs étaient utilisés dans des régions fortement peuplées, tandis que de petits l'étaient dans des régions faiblement peuplées. Deuxièmement, nous avons supposé que la superficie d'une région couverte par un incinérateur augmente en fonction de la taille de cet incinérateur. Enfin, troisième supposition, la distance de transport des déchets à l'intérieur d'une même région est proportionnelle à la racine carrée de la superficie de cette région.

Le fait de rediriger les déchets de l'incinérateur de type II à celui de type I fera augmenter la superficie couverte par un incinérateur de $500 \div 180 \approx 2{,}78$ fois. La distance de transport dans cette même région devient $12\ \text{km} \times \sqrt{500 / 180} = 20\ \text{km}$. De même, le fait de transporter des déchets type III au type I donne une distance de transport de $12\ \text{km} \times \sqrt{500 / 26} = 52{,}6$ km. En déterminant ainsi la distance de transport, nous avons pu estimer, à partir d'un modèle technique (Tanaka et Matsuto,1998), le nombre de véhicules et de personnes nécessaires, les dépenses de réparation ou de maintenance et la quantité de carburant requise.

L'élaboration du modèle ESD de prix exige de calculer p^W, soit le prix des déchets. Du tableau entrées-sorties du Japon, on obtient le tableau supplémentaire sur les produits dérivés et les débris qui fournit les données sur leurs entrées-sorties nominales. Nous avons donc calculé le prix de débris de fer, de débris d'autres métaux et de vieux papiers en divisant la valeur nominale par la quantité correspondante indiquée dans le modèle. Pour les autres types de déchets, leur prix était égal à la valeur négative de la moyenne des coûts du traitement des déchets correspondant.

3.2. Résultats

Le scénario A sert de valeur de référence auquel nous comparerons les résultats des autres scénarios en indiquant les écarts par des pourcentages. Le tableau 4.2 présente les principaux résultats. Le traitement régional réduit la production dans la majorité des secteurs. En effet, dans l'ensemble des 80 secteurs, cette réduction a été observée dans 66 secteurs dans le scénario B et dans 72 secteurs dans le C. La plus forte diminution a été obtenue en production d'électricité (–1,5 % pour B et –3,2 % pour C) suivie des produits du charbon ou d'autres produits miniers qui fournissent le carburant dans la production de l'électricité. Cette réduction est le résultat de l'augmentation de la production d'électricité à partir de la chaleur résiduelle qui est une conséquence du traitement régional des déchets. Il faut se souvenir que les incinérateurs de type I produisent de l'électricité à partir de la chaleur résiduelle. Bien que, dans la

TABLEAU 2
Principales répercussions du traitement régional

	Objets du traitement régional	
	Déchets solides municipaux seulement	**Déchets municipaux et industriels**
Production industrielle		
Énergie électrique	–1,45	–3,12
Produits du charbon	–0,51	–1,09
Autres produits miniers	–0,30	–0,64
Réparation de la machinerie	–0,18	–0,38
Produits de raffinerie du pétrole	–0,04	–0,07
Réparation de véhicules motorisés	0,11	0,31
Émission de CO_2	–0,39	–0,83
Emplois	0,016	0,057
Incinération		
Quantité	–0,005	–0,010
Coût par tonne	6,9	35,4
Utilisation des décharges publiques		
Poids	–0,43	–0,92
Superficie	–0,58	–1,25
Volume	–0,59	–1,28
Émission nette de déchets		
Cendres d'incinération	–20,27	–43,82
Poussière	–1,61	–3,46
Laitier en fusion	29,01	62,74

Les nombres indiquent le taux de changement en pourcentage par rapport au scénario de référence.

majorité des secteurs, la production de déchets diminue, il en existe tout de même où l'effet est contraire (par exemple, dans le cas des secteurs étroitement liés au transport comme la réparation des véhicules ou la production de caoutchouc).

Fait intéressant à remarquer : malgré l'augmentation du transport des déchets, la demande globale en produits de raffinerie du pétrole diminue (de –0,4 % pour B et –0,7 % pour C). Cela implique que l'augmentation de la demande en produits du pétrole, qui résulte de la hausse du transport des déchets, est plus que compensée par la diminution de la demande en produits du pétrole engendrée par la baisse dans la production traditionnelle d'électricité.

Par ailleurs, le traitement régional (scénario B) réduit l'émission totale de CO_2 de 0,4 % et le scénario C de 0,8 %. De plus, B permet une baisse de l'utilisation des décharges publiques de 0,4 % en poids et de 0,6 % en volume, et, en ce qui concerne C, de 0,9 % en poids puis de 1,3 % en volume. Des renseignements sur l'émission nette de chaque type de déchets sont nécessaires pour trouver les facteurs qui contribuent à la baisse dans l'utilisation des décharges.

Nous avons constaté que le traitement régional des déchets réduit de façon significative la production de cendres et de poussières d'incinération, alors qu'il fait augmenter le laitier en fusion. Dans le scénario C, en particulier, les cendres d'incinération sont réduites de plus de 60 % relativement au taux de 1995, alors que le laitier en fusion augmente de plus de 60 %. Il faut se rappeler que les incinérateurs de type I transforment les cendres en laitier en fusion. Cette transformation baisse la quantité finale de résidus de 10 % en poids et de 50 % en volume.

Un autre facteur contribue, bien qu'à plus petite échelle, à réduire l'utilisation des décharges. Il s'agit des poussières de cendre provenant de la génération d'électricité que l'on retrouve en plus petite quantité grâce à la réduction, ci-dessus mentionnée, dans la production traditionnelle d'électricité.

Le traitement régional semble donc efficace pour réduire l'émission de CO_2 et l'utilisation des décharges. Cependant, ce bénéfice a un coût : le coût moyen de l'incinération par tonne de déchets qui augmente de 7 % dans B et de 35 % dans C. La hausse du coût de la main-d'œuvre dans le domaine du transport contribue largement à cette augmentation des coûts. Ainsi, les besoins en main-d'œuvre dans l'économie japonaise augmenteraient globalement de 0,02 % pour B et de 0,06 % pour C.

3.3. Discussion

Le Japon est densément peuplé et ne possède que peu de terrains plats, aussi, les décharges publiques constituent-elles une ressource rare. Restreindre leur utilisation revêt alors une très grande importance et doit faire l'objet d'un souci constant tout en maintenant les efforts pour réduire les émissions de CO_2 provenant de carburant fossile. Nos résultats démontrent que le regroupement des incinérateurs en un petit nombre de grandes installations permettant la récupération de l'énergie est un moyen efficace pour atteindre cet objectif. Le coût de cette politique peut cependant être substantiel étant donné l'augmentation du coût du transport des déchets. Il semble donc important d'améliorer l'efficacité du transport des déchets afin de rendre cette politique aussi robuste sur le plan économique que sur le plan environnemental.

4. Conclusion

Dans le monde entier, on constate un souci croissant pour les questions environnementales. Aussi, la gestion des déchets est-elle appelée à devenir une activité de plus grande importance dans nos sociétés. Un programme de gestion des déchets doit, entre autres, être bon autant pour l'environnement que pour l'économie, s'il veut être durable.

Les déchets étant soumis à la loi de conservation de la masse, l'élaboration d'un programme de gestion des déchets doit donc tenir compte de l'interdépendance qui existe entre le flux de biens et de déchets, prise dans

un contexte global. L'analyse d'entrée-sortie peut alors jouer un rôle important en permettant d'élaborer un cadre analytique de base. Le modèle d'ESD a été conçu à cette fin.

Références bibliographiques

DUCHIN, F. 1990. The conversion of biological materials and waste to useful products. *Structural Change and Economic Dynamics* 1 : 243-262.

LEONTIEF, W. 1970. Environmental repercussions and the economic structure : An input output approach. *Review of Economics and Statistics* 52 : 262-271.

NAKAMURA, S., et KONDO, Y. 2002. Input-output analysis of waste management. *Journal of Industrial Ecology* 6 : 39-64.

TANAKA, S., et MATSUTO, T. 1998. *Report on the Development of the Evaluation System That Supports the Integrated Control of Municipal Waste*. Graduate School of Environmental Engineering, Hokkaido University (texte en japonais).

CHAPITRE 5

BILAN ET PROPOSITION : DÉGRADATION MONDIALE DE L'ENVIRONNEMENT AU XXIe SIÈCLE

Un défi pour l'analyse économique d'entrée-sortie

FAYE DUCHIN
Institut polytechnique Rensselaer
Troy, NY, États-Unis

Résumé

La dégradation de l'environnement va représenter un problème particulièrement épineux pour les économistes du XXIe siècle. Elle va remettre en cause les notions de richesse et de pauvreté. L'Association internationale input-output est bien placée pour définir les paramètres de cette recherche et mettre son infrastructure au service de la description et de l'analyse structurelles nécessaires. La matrice de comptabilité sociale permet d'élaborer des représentations structurelles des habitudes de vie des ménages ; cependant, ses potentialités de description et d'analyse sont aujourd'hui loin d'être mises à profit. Ce genre de connaissance, que la collaboration d'autres spécialistes des sciences sociales permettra d'approfondir, pourra servir d'assise à l'ébauche de scénarios sur les changements pratiques à apporter aux différents modes de vie qui ont un impact important sur l'environnement.

Si les économistes de chaque génération, y compris de la nôtre, se sont intéressés aux problèmes de richesse et de pauvreté, la dégradation de l'environnement physique risque de présenter un défi de taille pour les économistes du XXIe siècle et de soulever de nouvelles questions en matière de richesse et de pauvreté. La dégradation mondiale de l'environnement invite avant tout à réfléchir à deux types de questions : Que se passe-t-il ? Comment pouvons-nous l'enrayer ? Les économistes ne peuvent jouer qu'un rôle secondaire en ce qui concerne le premier type de questions, mais ils devront prendre une position de leadership afin de répondre au deuxième type. Cela exigera l'élaboration d'une théorie des modes de vie des ménages et de leurs liens avec la consommation.

Les spécialistes des sciences naturelles appliquées, qui mènent des recherches pour comprendre l'évolution de l'environnement en s'appuyant sur des modèles de circulation générale de l'atmosphère et des océans, ont bénéficié de moyens communautaires. De plus, bon nombre d'institutions nationales et internationales s'ajoute, dont le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), créé conjointement en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Cette communauté reconnaît le rôle central des activités humaines dans l'accumulation des gaz à effet de serre et le fait que le bien-être des êtres humains est tributaire de denrées, de fibres, d'eau et d'air. Mais aucun programme de recherche convaincant n'est encore en mesure de relever le véritable défi qui se pose : trouver des solutions pour réduire les pressions sur l'environnement afin d'avoir un impact réel sur le cours des choses.

Le GIEC a mis en évidence les répercussions sur la température globale moyenne, au cours du prochain siècle, du doublement de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère. Les économistes travaillent de concert avec le GIEC et s'emploient à calculer les volumes d'émissions de gaz carbonique que de futures activités humaines pourraient produire, en se basant sur les projections de quelques variables, telles que la croissance démographique, la consommation énergétique de la production ainsi que les principales évolutions en matière de productivité industrielle. Ils quantifient le ralentissement de la croissance économique imposé par la nécessité de s'adapter à un changement climatique, de même que la fraction de croissance économique qui devra être sacrifiée pour respecter les objectifs de réduction des émissions.

Les défis posés par le changement climatique mondial fournissent l'occasion aux économistes d'entrée-sortie, et en particulier à ceux de l'Association internationale, de poser un ensemble de questions différentes, ce qui permet aussi d'exploiter pleinement le potentiel de leur cadre intellectuel. Pour ce faire, cela exige que nous dépassions notre intérêt traditionnel pour la mise au point de nouvelles techniques et méthodes. Nous devrons formuler plusieurs questions clés auxquelles nous sommes en mesure de répondre et nous unir au sein de notre communauté afin d'adopter une nouvelle façon de procéder. Notre objectif ne devrait pas être de faire de la « mégascience », mais plutôt de créer des partenariats qui valorisent notre contribution et accroissent notre influence sur le courant de la pensée économique dominante.

Notre unique avantage réside dans notre capacité à analyser les choix technologiques et de modes de vie qui s'offrent, afin de les intégrer efficacement aux systèmes de production et de consommation. Notre force réside également dans notre aptitude à traiter des aspects spécifiques qui touchent à la fois le monde physique naturel et le monde social. Nous savons faire cela de manière formelle grâce aux bases de données structurées et aux modèles mathématiques. Ainsi, les modèles d'analyse d'entrée-sortie permettent de représenter des stocks et des flux d'énergie, de matériaux, d'eau (et d'autres variables) mesurés en unités physiques, ainsi que leur vélocité dans l'ensemble du système économique. C'est à cause de cet avantage que les nouveaux champs interdisciplinaires tels que l'économie écologique et de l'écologie industrielle retiennent cette approche. Celle-ci a en effet permis à des ingénieurs et à des agronomes de collaborer à l'étude des conséquences des changements technologiques.

Nombreux sont ceux qui ont étudié le potentiel des grands changements technologiques pour réduire les pressions sur l'environnement global. Leur conclusion est que cela devra également s'accompagner de changements dans le mode de vie, si nous voulons réellement réduire l'ampleur des problèmes liés à l'environnement. Si l'on a déjà commencé à adopter une approche analytique dans l'étude sur les changements de modes de vie, cette dernière en est encore à l'état embryonnaire. La matrice de comptabilité sociale est un cadre formel qui permet une représentation structurelle des modes de vie des ménages. Cependant, le potentiel descriptif qu'elle offre, et surtout, son potentiel analytique ont à ce jour été peu exploités. Les matrices de comptabilité sociale mises au point dans les instituts de statistique se sont révélées trop agrégées pour illustrer pertinemment les pratiques sociales. À l'origine, elles ont été élaborées uniquement pour évaluer les répercussions de politiques sur la distribution des revenus. Maintenant, les solutions de rechange en matière de mode de vie devront être étudiées aussi rigoureusement que les alternatives technologiques. La réalisation de ce programme exige une théorie des ménages parallèlement à une collecte de nouveaux types de données.

Avant de développer une théorie des modes de vie des ménages, je propose que, pour toute société donnée, l'on puisse définir une taxonomie des ménages afin que les ménages d'une même catégorie aient davantage en commun qu'avec ceux des autres catégories. Les auteurs d'études de marché ont mis au point des taxonomies analogues à partir d'habitudes d'achat semblables ; même si les propriétés statistiques des groupes sont confidentielles, leur réussite commerciale indique que ces classifications sont fort pratiques. Moins de 100 catégories sont suffisantes pour classer environ 100 millions de ménages américains, et il existe également des taxonomies pour les ménages d'autres sociétés. Ces quelques dizaines de catégories, ainsi qu'un ensemble provisoire d'une vingtaine d'activités de ménages que j'ai dressées, servent de tableau à double entrée pour les études de cas de différents types de ménages et d'activités retenus. Sur le plan de l'impact environnemental, il ressort de recherches actuelles que les activités des ménages à cibler sont, avant tout, les comportements alimentaires et ceux liés au transport.

Si les ménages d'une même catégorie sont comparables, il nous faut vérifier si cette similitude s'observe dans toutes les activités. En fait, ces catégories représentent des ménages à différentes étapes de leur cycle de vie. Ainsi, d'un ménage à l'autre, il nous faut étudier les transitions typiques et plausibles selon les diverses étapes du cycle de vie, à partir des naissances et des décès, des mariages et des divorces, de l'obtention de diplômes et des changements d'emplois. Nous devons également cerner les caractéristiques des ménages innovants ou qui font figure de modèles, ceux qui innovent et ne craignent pas de changer de mode de vie ; autrement dit, ceux qui devraient être considérés comme des meneurs en matière de technologie de consommation. Par analogie avec l'étude sur l'innovation technologique, nous devrions analyser la diffusion d'innovations en matière de mode de vie, ainsi que l'ouverture d'esprit dont les ménages font preuve à l'égard des modes alternatifs proposés.

Une classe de scénarios sera élaborée pour décrire les différents changements à apporter au mode de vie qui, s'ils étaient adoptés, permettraient réellement de modifier les pressions exercées sur l'environnement naturel physique ainsi que le cours des choses. Un scénario possible serait celui où les ménages adoptent un régime alimentaire de base, utilisent les transports en commun et, où cela est possible, achètent par Internet et prennent des vacances à faible impact écologique. Les résultats des scénarios permettraient de quantifier différentes variables telles que la consommation des combustibles et les émissions de gaz carbonique, l'utilisation des sols et l'assèchement des cours d'eau. Si les changements observés par ces études se révélaient substantiels, des versions plus réalistes pourraient être élaborées afin d'intégrer à cette analyse les changements dans le mode de vie, en commençant par les ménages innovants et en poursuivant l'exercice avec d'autres types de ménages selon des canaux de diffusion appropriés.

La question du changement climatique global demandera l'établissement d'un dialogue et d'une collaboration entre les économistes théoriciens et ceux qui s'intéressent plus particulièrement à l'analyse empirique, ainsi qu'avec d'autres spécialistes des sciences sociales, tels les sociologues et les anthropologues, qui s'intéressent à l'approche systémique ; les spécialistes en prospective, les experts en bases de données, les experts en études de marché et les concepteurs de modèles. Une étude de faisabilité, qui évaluerait les effets d'habitudes alimentaires et de transport, pourrait inaugurer une nouvelle étape dans l'étude sur les changements climatiques à l'échelle mondiale et permettre de concevoir des modèles mathématiques du système social susceptibles de s'adapter à ceux des systèmes géophysiques de la Terre.

RÉPONSE AU PARADOXE DE SOLOW, HAUSSES DE LA PRODUCTIVITÉ AUX ÉTATS-UNIS, FLUX TECHNOLOGIQUES ET FINANCIERS

Cette section comprend les textes de trois auteurs reconnus pour leurs contributions respectives sur les questions des progrès technologiques et pour leurs contributions à l'étude de problématiques macroéconomiques en général.

CHAPITRE 6

LES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET L'ÉCONOMIE AMÉRICAINE†‡

DALE W. JORGENSON
Harvard University

† Allocution présidentielle prononcée devant l'American Economic Association, Nouvelle Orléans, Louisiane, le 6 janvier 2001. Je tiens à remercier pour son soutien financier le Programme de politique technologique et économique de Harvard University. Je tiens également à remercier : Kevin J. Stiroh pour avoir participé à mes recherches et pour m'avoir apporté de précieux commentaires ; Jon Samuels pour m'avoir si admirablement assisté dans mes recherches ; Mun S. Ho pour m'avoir fourni les données sur le travail ainsi que des conseils très utiles ; J. Steven Landefeld, Clinton McCully et David Wasshausen du Bureau d'analyse économique (BEA : Bureau of Economic Analysis) pour avoir fourni des données précieuses en matière informatique. En outre, de nombreux collègues, que je ne peux citer ici, m'ont apporté des suggestions et des conseils précieux. La traduction française de ce texte a été réalisée sous la supervision du professeur Jean-Jacques Laffont, Université de Toulouse. À tous, je leur suis redevable, mais je n'engage que ma seule responsabilité pour les insuffisances éventuelles.

‡ Le texte présenté à la XIVe Conférence internationale de techniques d'analyses d'entrée-sortie à Montréal le 12 octobre 2002 focalisait également sur l'investissement dans le capital humain à formation universitaire ; il a été publié dans Jorgenson *et al.* (2003).

Résumé

La conjonction inhabituelle d'une croissance plus rapide et d'une inflation plus lente a déclenché dans les années 1990 un débat animé chez les économistes qui se sont demandé si les améliorations des performances économiques américaines pouvaient se poursuivre à long terme. Certains affirment que le développement des technologies de l'information (TI) est l'un des épisodes de cette série de chocs positifs, bien que temporaires de cette période. D'autres soutiennent que les TI ont provoqué un changement fondamental dans l'économie américaine, améliorant de façon permanente les perspectives de croissance. Dans ce chapitre, on démontre que la renaissance de la croissance américaine est due au développement et à l'essor des semi-conducteurs et l'on rapporte une analyse du rôle des TI dans ce regain.

1. Introduction

Le redémarrage de l'économie américaine que l'on observe depuis 1995 a dépassé toutes les attentes, à l'exception des plus optimistes. Les modèles de prévision économique nous ont sérieusement induits en erreur et ce n'est que très récemment que les projections sur la croissance ont été revues pour refléter une image plus optimiste[1]. Il n'est pas surprenant de voir que la combinaison inhabituelle d'une croissance plus rapide et d'une inflation plus lente ait déclenché dans les années 1990 un débat chez les économistes qui se sont demandé si les améliorations des performances économiques américaines pouvaient se poursuivre.

Le débat économique est parti de la thèse selon laquelle les années 1990 sont le reflet des années 1970, époque à laquelle une série défavorable de « chocs sur l'offre » a mené à la stagflation – croissance plus faible et inflation plus élevée (Gordon, 1998, 2000 ; Bosworth et Triplett, 2000). De ce point de vue, le développement des technologies de l'information (TI) est l'un des épisodes de cette série de chocs positifs, bien que *temporaires*. L'idée concurrente veut que les TI aient provoqué un changement fondamental dans l'économie américaine, aboutissant à une amélioration *permanente* des perspectives de croissance (Greenspan, 2000).

Le déclin imparable des prix des matériels informatiques a progressivement renforcé le rôle de l'investissement en TI en tant que source de la croissance économique américaine. Le niveau de productivité dans les industries fabriquant des produits TI s'est graduellement accru et un regain de productivité apparaît dans le reste de l'économie. En dépit des différences de méthodes et de sources de données, nous parvenons actuellement à un consensus : le comportement des prix du secteur des TI expliquerait la vague de croissance économique.

Dans la section ci-après, je montre que la réapparition de la croissance américaine est due au développement et à l'essor des semi-conducteurs. La chute des prix du secteur des TI est fortement liée aux développements de la technologie des semi-conducteurs, ce qui est largement reconnu par les techniciens supérieurs et les économistes. Cette technologie a trouvé ses plus larges applications dans les matériels de calcul et de communications, mais a surtout contribué à réduire les coûts d'un grand nombre d'autres produits.

En 1995, la chute du prix des TI s'est accélérée, sous l'impulsion de la chute bien plus brusque encore du prix des semi-conducteurs en 1994. Bien que les analystes prévoient une baisse continue des prix des semi-conducteurs au cours des 10 prochaines années au moins, la récente accélération pourrait n'être que temporaire. Cela peut s'expliquer par un changement dans le cycle de produit des semi-conducteurs passant de trois ans à deux ans, lequel changement est survenu en 1995 à la suite de l'intensification de la concurrence sur les marchés des produits fabriqués à partir des semi-conducteurs.

1. Voir *Congressional Budget Office* (2000) sur les prévisions officielles et *Economics and Statistics Administration* (2000, p. 60), sur les prévisions indépendantes.

Dans la section 3, j'exposerai les grandes lignes qui nous permettront d'analyser le rôle des technologies de l'information dans le regain de croissance aux États-Unis. Les indices de prix à qualité constante permettent de faire la distinction entre le changement des performances des matériels informatiques et le changement des prix pour un niveau de performance donné. Les prix des ordinateurs, en vigueur pendant une période donnée, sont intégrés dans les U.S. National lncome and Products Accounts (NIPA) depuis 1985. Malheureusement, des lacunes importantes demeurent, notamment sur les tendances des prix pour les investissements qui y sont étroitement liés, tels que les logiciels et les matériels de communication.

Le coût du capital est un concept essentiel pour analyser l'impact économique des prix du secteur des technologies de l'information. La chute des prix fournit des stimulants économiques puissants pour la substitution des matériels informatiques aux autres formes de capital et aux autres services du travail. Le taux de baisse des prix du secteur des TI est une composante essentielle du coût du capital, notamment pour évaluer les effets des stocks croissants d'ordinateurs, de matériels de communication et de logiciels.

Dans la section 4, j'analyserai l'impact qu'a eu en 1995 l'accélération de la chute des prix du secteur des TI sur la croissance économique américaine. Je présenterai une frontière des possibilités de production qui englobe les substitutions entre les produits de consommation et les biens d'investissement, ainsi que les services du capital et du travail. Dans ce concept, les équipements en TI sont considérés comme une composante de la production de biens d'investissement et les services du capital liés à ces équipements, comme une composante du facteur capital.

Le facteur capital a été la principale source de la croissance économique américaine au cours de l'après-guerre. Une substitution plus rapide vers le secteur des technologies de l'information a donné davantage de poids aux composantes du capital ayant des productivités marginales plus élevées. L'apport très important du facteur capital depuis 1995 a relancé la croissance de près de un point ; le secteur des TI comptant pour plus de la moitié dans cette augmentation. Si les ordinateurs ont été le fer de lance d'une croissance plus rapide, les matériels de communication et les logiciels ont également apporté d'importantes contributions.

L'accélération de la chute des prix du secteur des technologies de l'information traduit une hausse de la productivité plus rapide dans les industries fabriquant des TI. En fait, c'est à ces industries que l'on doit la majeure partie de la croissance de productivité globale au cours des années 1990. Avant 1995, cela était dû à la chute de la croissance de la productivité dans d'autres secteurs de l'économie. En effet, les industries fabriquant des TI ont contribué pour plus de la moitié à la hausse de productivité observée depuis 1995, mais la croissance plus rapide ne se limite pas à ces industries.

En conclusion, je dirai que la chute des prix du secteur des TI continuera quelques temps encore, ce qui stimulera la substitution suivie des TI à d'autres facteurs productifs. La baisse des prix des produits informatiques est

également un indicateur de la hausse rapide de productivité dans les industries fabriquant des TI. Cependant, il serait prématuré d'extrapoler sur l'accélération récente de la croissance de la productivité dans ces industries et de la placer dans un avenir indéfini, car ce phénomène est relié à la persistance d'un cycle de produit de deux ans pour les semi-conducteurs.

Dans la section 4, je mentionnerai quelques-unes des opportunités de recherche créées par le développement et la diffusion des technologies de l'information. Le nombre important et toujours croissant d'études témoigne de l'impact énorme des technologies de l'information sur les entreprises et les marchés des produits. Priorité doit donc être accordée à une meilleure compréhension des marchés des semi-conducteurs. Bien que plusieurs modèles de marchés pour les semi-conducteurs existent déjà, aucun n'explique le passage d'un cycle de produit de trois à deux ans.

Les effets considérables des technologies de l'information sur les marchés du capital et du travail ont déjà fait l'objet d'un nombre croissant d'articles en économie, mais de nombreuses questions importantes restent à résoudre. Pour les marchés financiers, la relation entre la valeur des capitaux propres et les perspectives de croissance mérite une étude plus approfondie. Pour les marchés du travail, il est nécessaire d'effectuer des recherches plus poussées sur les investissements en technologies de l'information et sur la substitution entre les différents types de travail.

2. L'ère de l'information

C'est sur le développement et l'essor des technologies de l'information que repose la renaissance de la croissance américaine. Une pensée de la « nouvelle économie » – *faster, better, cheaper* – caractérise la vitesse des changements technologiques et les améliorations des produits dans le secteur des semi-conducteurs et la chute précipitée et continue des prix des semi-conducteurs. La baisse de ces prix s'est répercutée sur le prix des produits qui reposent largement sur la technologie des semi-conducteurs, comme les ordinateurs et les matériels de télécommunication. Cette technologie a également permis de réduire les coûts des avions, des automobiles, des instruments scientifiques et de bon nombre d'autres produits.

Les technologies de l'information modernes sont issues de l'invention du *transistor* – dispositif à semi-conducteurs agissant comme un commutateur électrique et codant les informations en mode binaire. Un chiffre binaire ou *bit* représente la valeur zéro et un, correspondant aux positions marche et arrêt du commutateur. Le premier transistor, fabriqué à partir de semi-conducteurs germanium, a été conçu chez Bell Labs en 1947 et ses inventeurs – John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley[2] – ont remporté le prix Nobel de physique en 1956.

L'histoire des TI a ensuite été marquée par l'arrivée du *circuit intégré,* inventé conjointement par Jack Kilby de Texas Instruments en 1958 et Robert Noyce de Fairchild Semiconductor en 1959. Un circuit intégré est composé

2. Concernant Bardeen, Brattain et Shockley, voir : <www.nobel.se/physics/laureates/1956/>.

de milliers – voire de millions – de transistors qui stockent et gèrent les données en mode binaire. Les circuits intégrés ont été conçus au départ pour le stockage et le recouvrement de données, et ces dispositifs à mémoire semi-conducteurs sont devenus connus sous le nom de *puces mémoire*[3].

Le premier brevet pour le circuit intégré a été accordé à Noyce, ce qui a donné lieu à une dizaine d'années de litiges sur les droits de propriété intellectuelle. Ces litiges et leurs conséquences prouvent l'importance capitale de la propriété intellectuelle dans le développement des TI. Kilby s'est vu décerner le prix Nobel de physique en 2000 pour la découverte du circuit intégré ; malheureusement, Noyce est décédé en 1990[4].

2.1. La loi de Moore

En 1965, Gordon E. Moore, alors directeur de recherches chez Fairchild Semi-conduction, a fait une observation prédictive, connue plus tard sous le nom de la loi de Moore[5]. En portant sur un graphique les données sur les puces électroniques, il s'est rendu compte que chaque nouveau modèle de puce contenait presque deux fois plus de transistors que le modèle de puce précédent et qu'il était lancé 18 à 24 mois après le modèle précédent ; cela supposait une croissance exponentielle de la capacité de la puce de 35 à 45 % par an ! La prédiction de Moore, faite à la naissance de l'industrie des semi-conducteurs, a permis de suivre l'évolution de la capacité des puces pendant 35 ans. Il a récemment extrapolé cette tendance pour 10 autres années au moins (Moore, 1997).

En 1968, Moore et Noyce ont fondé Intel Corporation pour accélérer la commercialisation des puces à mémoire (Moore, 1996). Les circuits intégrés ont donné naissance aux *microprocesseurs* avec des fonctions pouvant être programmées par un système logiciel et connus sous le nom de *puces logiques*. Le premier microprocesseur universel d'Intel a été conçu pour un calculateur fabriqué par Busicom, une société japonaise. Intel a conservé les droits de propriété intellectuelle et a commercialisé le dispositif en 1971.

Les tendances à la hausse rapide de la capacité des microprocesseurs et des dispositifs à mémoire illustrent la croissance exponentielle prédite par la loi de Moore. En 1971, la première puce logique contenait 2 300 transistors, alors que le Pentium 4 sorti le 20 novembre 2000 en contenait 42 millions ! En 29 ans, le nombre de transistors a augmenté de 34 % par an. Le taux de la croissance de productivité pour l'économie américaine au cours de cette période a été plus lent suivant deux ordres de grandeur de différence.

---

3. Pezold (2000) fournit des références générales sur les ordinateurs et les logiciels.
4. Concernant Kilby, voir : <www.nobel.se/ohvsics/laureates/2000>. Concernant Noyce, voir : Wolfe (2000, p. 17-65).
5. Moore (1965). Ruttan (2001, p. 316-367) fournit des références générales sur l'économie des semi-conducteurs et des ordinateurs.

2.2. Le prix des semi-conducteurs

La loi de Moore rend compte du fait que les générations successives de semi-conducteurs sont *plus rapides* et *meilleures*. L'économie des semi-conducteurs a débuté sur cette observation qui en découle directement : le prix des semi-conducteurs a baissé à un rythme vraiment surprenant ! La figure 6.1 donne les indices de prix des semi-conducteurs conçus par Bruce T. Grimm (1998) du Bureau of Economic Analysis (BEA) et utilisés dans les U.S. National Income and Product Accounts depuis 1996. Ces indices se partagent entre les puces mémoire et les puces logiques – sept types de puces mémoire et deux types de puces logiques, pour être précis.

Entre 1974 et 1996, les prix des puces mémoire ont été divisés par 27 270, soit une baisse de 40,9 % par an, alors que le facteur implicite de déflation pour le produit intérieur brut (PIB) a été multiplié par 2,7 soit une *hausse* de 4,6 % par an ! Les prix des puces logiques, disponibles pendant une période plus courte – de 1985 à 1996 – ont été divisés par 1 938, soit une baisse de 54,1 % par an, alors que le facteur implicite de déflation du PIB a été multiplié par 1,3, soit une *hausse* de 2,6 % par an ! Les chutes des prix des semi-conducteurs obéissent dans une large mesure à la loi de Moore sur la croissance de capacité des puces, distinguant les semi-conducteurs des autres produits.

La figure 6.1 montre également une vive accélération de la chute des prix des semi-conducteurs en 1994 et 1995. La chute des prix des microprocesseurs est passée à plus de 90 % par an tandis que l'industrie des semi-conducteurs passait d'un cycle de produit de trois ans à un cycle très accéléré de deux ans, ce dont fait état la mise à jour *2000* du International Technology Road Map for Semiconductors[6] préparée par un consortium des associations de l'industrie.

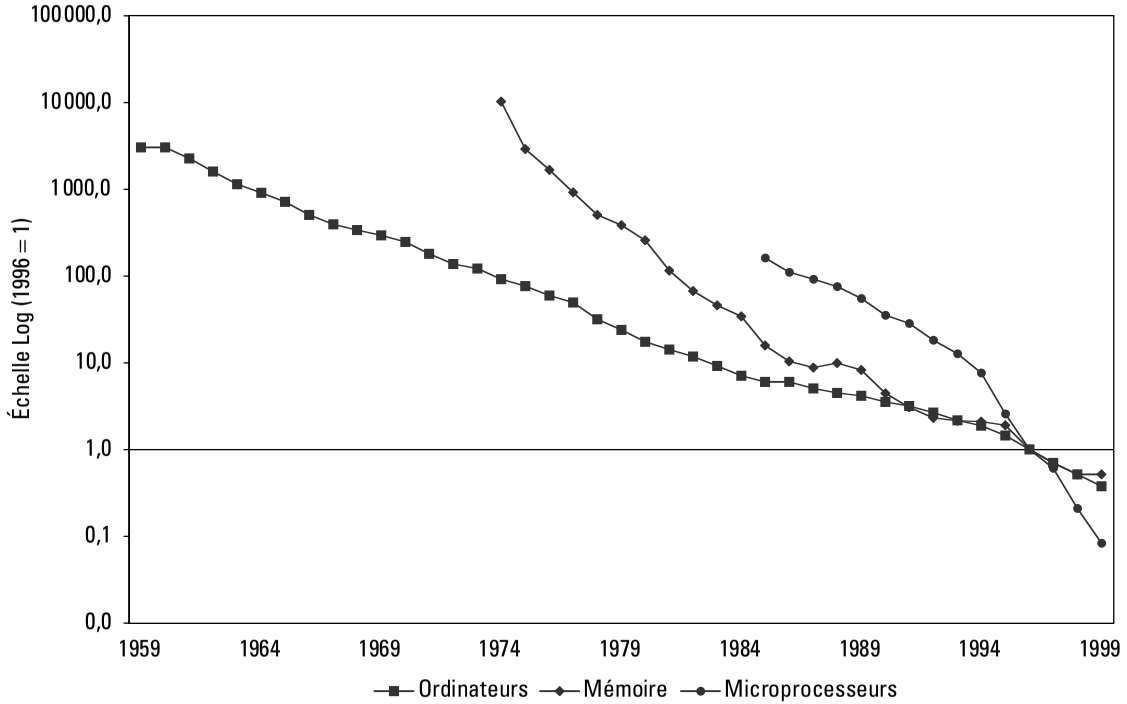
2.3. Indice de prix à qualité constante

L'allure des prix des semi-conducteurs est un test sévère pour les méthodes utilisées dans les statistiques de prix officielles. Le défi consiste à séparer les changements de prix observés lorsque les performances des semi-conducteurs changent et les changements de prix lorsque les performances restent constantes. Pour y parvenir, cela a nécessité une compréhension claire de la technologie, la mise au point de techniques de mesures sophistiquées et l'introduction de méthodes nouvelles pour la collecte des informations requises.

Dulberger (1993) de IBM a présenté un indice pour les prix des semi-conducteurs basé sur un modèle d'appariement. Un tel indice combine les rapports de prix pour des produits présentant les mêmes performances à

6. Concernant *The International Technology Roadmap for Semiconductors* (2000), voir : <http://public.itrs.net/>.

FIGURE 6.1
Prix relatifs des ordinateurs et des semi-conducteurs, 1959-1999



Note : Tous les indices de prix sont divisés par l'indice de prix de production.

différents moments. Dulberger a présenté les indices de prix à qualité constante sur la base de formules de calcul de l'indice, y compris l'indice idéal de Fisher (1922) utilisé dans les comptes nationaux américains (voir Landefeld et Parker, 1997). Précisons que cet indice est une moyenne géométrique des indices de Laspeyres et Paasche.

Diewert (1976) a défini un indice *superlatif* comme étant un indice reproduisant *exactement* une représentation *flexible* de la technologie sous-jacente (ou préférences). Une représentation flexible fournit une approximation de second ordre pour une technologie arbitraire (ou préférences). Konus et Byushgens (1926) ont d'abord montré que l'indice idéal de Fischer est superlatif dans ce contexte. Les indices de Laspeyres et Paasche ne sont pas superlatifs et ne parviennent pas à traduire de manière précise les substitutions entre les produits en changements de prix.

Grimm (1998) a combiné les techniques des modèles d'appariement avec les méthodes hédoniques, basées sur un modèle économétrique des prix des semi-conducteurs à différents moments. Un modèle hédonique donne le prix d'un produit à semi-conducteur en tant que fonction des caractéristiques déterminant les performances, telles que la vitesse de traitement et la capacité de mémoire. Un indice de prix à qualité constante isole le changement de prix en maintenant fixes les caractéristiques des semi-conducteurs.

À partir de 1997, le Bureau of Labor Statistics (BLS) a intégré un indice de prix pour les semi-conducteurs calculé selon la méthode des modèles d'appariement sur l'indice des Prix de Production (PPI : Producer Price Index)*;* et depuis les comptes nationaux se sont basés sur les données calculées à partir du PPI. Reflétant la politique de longue date du BLS, les données historiques n'ont pas été révisées. Les prix des semi-conducteurs reportés dans le PPI avant 1997 ne maintiennent pas la qualité à un niveau constant, ce qui n'a pas permis de traduire la chute rapide des prix des semi-conducteurs et l'accélération en 1994.

2.4. Ordinateurs

Le lancement par IBM de l'ordinateur personnel (PC) en 1981 a été un événement décisif dans l'essor des technologies de l'information. En 1978, la vente à IBM du microprocesseur 8086-8088 d'Intel pour l'intégrer sur le PC a été une percée commerciale majeure pour Intel (voir Moore, 1996). En 1981, IBM a obtenu la licence pour utilisation du système d'exploitation MS-DOS auprès de Microsoft Corporation, société fondée par Bill Gates et Paul Allen en 1975. Le PC a établi une relation Intel / Microsoft qui continue encore aujourd'hui d'exister. En 1985, Microsoft a lancé la première version de Windows, son système d'exploitation phare pour le PC, donnant naissance à la nomenclature Wintel (Windows-Intel) pour traduire cette collaboration continue.

Les ordinateurs centraux, ainsi que les PC, ont commencé à reposer largement sur les puces logiques pour le traitement central et sur les puces mémoire pour la mémoire principale. Cependant, les semi-conducteurs représentent moins de la moitié des coûts des ordinateurs, et les prix des ordinateurs ont baissé bien moins rapidement que les prix des semi-conducteurs. Les mesures précises sur les prix des ordinateurs à qualité de produit constante ont été intégrées aux NIPA en 1985, et au PPI dans les années 1990. Les comptes nationaux reposent désormais sur les données du PPI, mais les données historiques du PPI sur les ordinateurs, telles que les données PPI sur les semi-conducteurs, ne parviennent pas à maintenir la qualité à un niveau constant.

Chow (1967) a été l'un des premiers à utiliser les techniques hédoniques pour établir un indice à qualité constante des prix des ordinateurs lors de recherches menées chez IBM. Chow a relevé des chutes de prix de plus de 20 % par an pendant la période 1960-1965, donnant ainsi un premier aperçu de la remarquable allure des prix des ordinateurs[7]. En 1985, le Bureau of Economic Analysis a intégré aux NIPA les indices de prix à qualité constante pour les ordinateurs et les périphériques conçus par Cole *et al.* (1986) de IBM. Triplett (1986) a examiné l'interprétation économique de ces indices, portant à l'attention d'un large public la chute rapide des prix des ordinateurs.

L'indice BEA-IBM de prix à qualité constante pour les ordinateurs a provoqué des échanges houleux entre le BEA et Denison (1989), l'un des créateurs de la méthodologie de la comptabilité nationale dans les années 1950 et responsable des comptes nationaux au BEA de 1979 à 1982. Denison a attaqué de front la méthodologie BEA-IBM et vigoureusement remis en question l'intégration des indices de prix à qualité constante dans les comptes nationaux[8]. Young (1989), alors directeur du BEA, a reproduit le raisonnement du BEA en faveur de l'intégration des indices de prix à qualité constante.

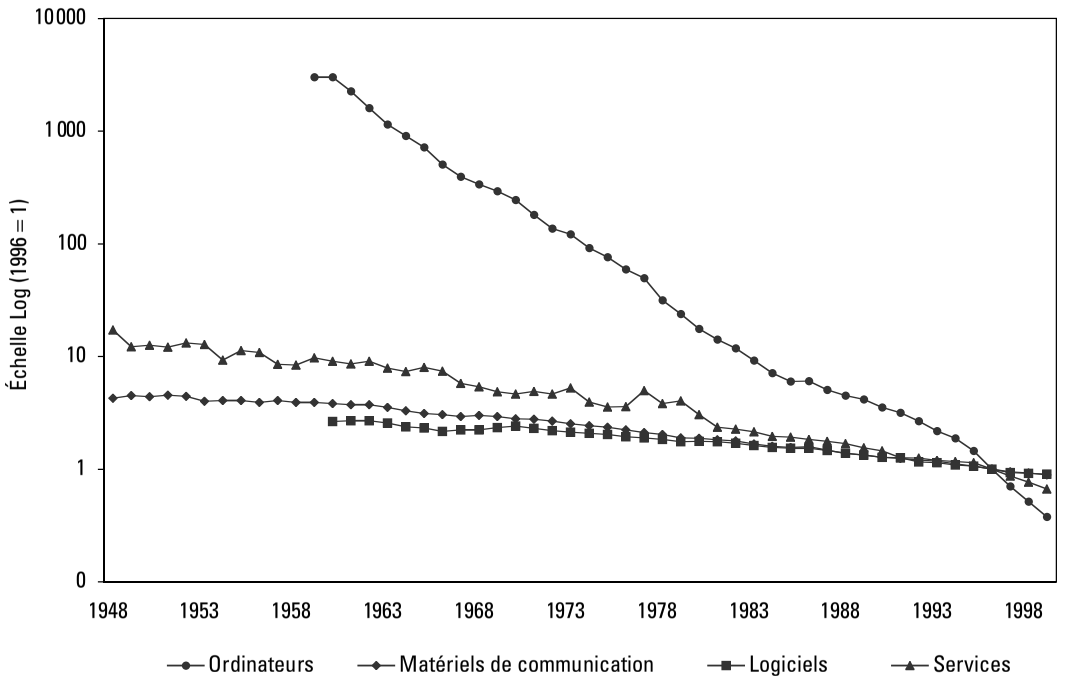
Dulberger (1989) a présenté un rapport plus détaillé sur ses recherches relatives aux prix des processeurs informatiques pour le projet BEA-IBM. La vitesse du traitement et de la mémoire principale a joué un rôle central dans son modèle. Triplett (1989) a mené une étude exhaustive sur les indices de prix hédoniques pour les ordinateurs. Gordon (1989, 1990) a proposé un modèle alternatif des prix des ordinateurs et a identifié les ordinateurs et les matériels de communication, ainsi que les avions commerciaux, comme étant les éléments ayant les taux de chute de prix les plus élevés.

La figure 6.2 montre l'indice BEA à qualité constante des prix des ordinateurs et des périphériques et de leurs composants, y compris les ordinateurs centraux, les PC, les dispositifs à mémoire, d'autres périphériques, et les terminaux. La chute des prix des ordinateurs suit l'allure des prix des

7. De plus amples informations sont données par Berndt (1991, p. 102-149).

8. Denison a cité son article paru en 1957 : « Aspects théoriques de la modification de la qualité, de la consommation des capitaux et de la formation du capital net », en tant que déclaration définitive sur la position traditionnelle du BEA.

FIGURE 6.2
Prix relatifs des ordinateurs, des matériels de communication, des logiciels et des services, 1948-1999



Note : Tous les indices de prix sont divisés par l'indice de prix de production.

semi-conducteurs présentés dans la figure 6.1, mais de façon plus atténuée. L'accélération en 1995 de la chute des prix des ordinateurs suit l'accélération de la chute des prix des semi-conducteurs qui a résulté du passage en 1995 du cycle du produit de trois à deux ans.

2.5. Matériels informatiques et logiciels

La technologie des communications est cruciale pour le développement et la diffusion d'Internet, et c'est sans doute le signe le plus marquant des technologies de l'information dans l'économie américaine[9]. Flamm (1989) a été le premier à comparer l'allure des prix des ordinateurs et les prix des matériels de communication. Ses conclusions ont montré que les prix des matériels de communication baissaient un peu plus lentement que les prix des ordinateurs. De son côté, Gordon (1990) a comparé les résultats de Flamm avec les indices de prix officiels, révélant une distorsion importante des indices officiels.

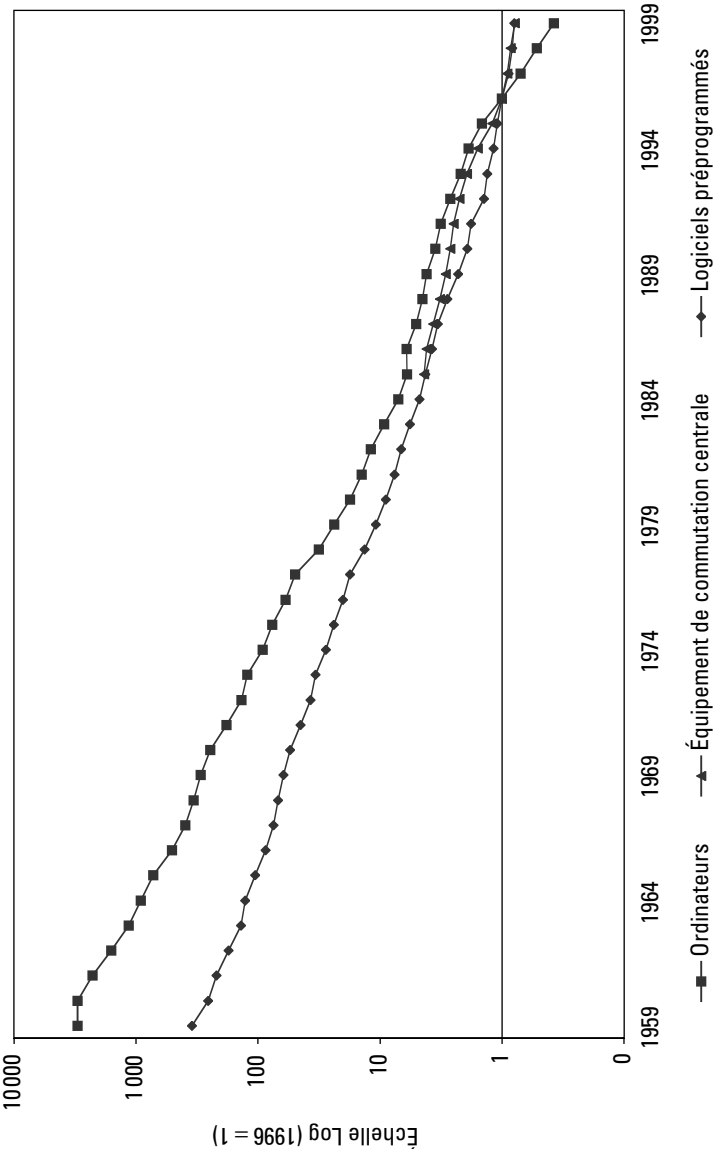
Les équipements de communications constituent un marché important pour les semi-conducteurs, mais les indices de prix à qualité constante ne couvrent qu'une partie de ces matériels. Les équipements de commutation et de terminal reposent largement sur la technologie des semi-conducteurs, de telle sorte que le développement des produits reflète les améliorations des semi-conducteurs. L'indice de prix à qualité constante de Grimm (1997) pour les équipements de commutation des téléphones numériques, comme on peut le voir à la figure 6.3, a été intégré aux comptes nationaux en 1996. La production de services de communication dans les NIPA intègre également un indice de prix à qualité constante pour les téléphones cellulaires.

De nombreux investissements en communications concernent les appareils de transmission, connectant les terminaux de données, les terminaux vocaux et les terminaux vidéo aux équipements de commutation. Les technologies telles que la fibre optique, la diffusion par micro-ondes, et les satellites de communication ont progressé à un rythme qui a même dépassé celui spectaculaire du développement des semi-conducteurs. Une illustration est le multiplexage par répartition en longueur d'onde dense (DWDM : *dense wavelength division multiplexing*), une technologie envoyant simultanément des signaux multiples sur une fibre optique. L'installation de matériel DWDM, qui a commencé en 1997, a doublé la capacité de transmission des câbles optiques tous les 6 à 12 mois[10].

Les logiciels et le matériel informatiques sont essentiels pour les technologies de l'information, en témoigne le volume imposant de dépenses en matière de logiciels. La onzième révision complète des comptes nationaux, publiée par le BEA le 27 octobre 1997, a donné une nouvelle classification aux logiciels informatiques et les a inclus dans les investissements[11]. Avant

9. Choi et Whinston (2000) fournissent des références générales sur Internet. Concernant les indicateurs Internet, voir : <www.internetindicators.com/>.
10. Pour Rashad (2000), c'est la « mort » de la loi de Moore. Hecht (1999) décrit la technologie DWDM et fournit des références générales sur les fibres optiques.
11. Moulton (2000) traite de la onzième révision complète des NIPA et de la mise à jour de 1999.

FIGURE 6.3
Prix relatifs des ordinateurs, des matériels de communication et des logiciels, 1959-1999



Note : Tous les indices de prix sont divisés par l'indice de prix de production.

cette avancée importante, les dépenses professionnelles en matière de logiciels étaient considérées comme des décaissements courants alors que les dépenses personnelles et publiques étaient considérées comme des achats de biens non durables. L'investissement en logiciels croît rapidement et dépasse désormais l'investissement en matériel informatique.

Parker et Grimm (2000) définissent les nouvelles estimations sur les investissements en logiciel. Le BEA distingue trois types de logiciels – préprogrammés, personnalisés et spécifiques. Le logiciel préprogrammé est vendu ou accordé en licence sous une forme standardisée et livré sous forme de bouquets ou de fichiers informatiques téléchargés sur Internet. Le logiciel personnalisé est spécialement conçu pour une application de l'utilisateur et livré avec les services d'analyse, de conception et de programmation permettant la personnalisation. Le logiciel spécifique est un logiciel créé pour une application spécifique. Cependant, seuls les indices de prix pour les logiciels préprogrammé maintiennent les performances à un niveau constant.

Parker et Grimm (2000) présentent un indice de prix à qualité constante pour les logiciels préprogrammés (voir la figure 6.3). Cela combine un modèle hédonique de prix pour les logiciels d'applications professionnelles et un indice basé sur des modèles d'appariement pour les tableurs et les programmes de traitement de texte, indice développé par Oliner et Sichel (1994). Les prix des logiciels préprogrammés ont chuté de plus de 10 % par an entre 1962 et 1998. Depuis 1998, le BEA s'est appuyé sur un indice de prix basé sur des modèles d'appariement de PPI pour tous les logiciels préprogrammés ; avant 1998, les données du PPI ne maintiennent pas la qualité à un niveau constant.

Les prix du BEA pour les logiciels spécifiques se basent sur les niveaux de salaire des programmeurs, ce qui suppose qu'il n'y a aucun changement dans la productivité des programmeurs informatiques, même avec l'investissement croissant en matériels et logiciels informatiques visant à soutenir la création de nouveaux logiciels. Les prix des logiciels personnalisés représentent une moyenne pondérée des prix des logiciels préprogrammés et spécifiques avec des coefficients de pondération arbitraires de 75 % pour les logiciels spécifiques et 25 % pour les logiciels préprogrammés. Ces indices de prix ne maintiennent pas les performances des logiciels à un niveau constant et montrent une image déformée des prix des logiciels, ainsi que des produits logiciels et des investissements.

2.6. Opportunités de recherche

Les indices de prix officiels pour les ordinateurs et les semi-conducteurs fournissent le paradigme pour les mesures économiques. Ces indices traduisent la chute régulière des prix dans le secteur des TI et l'accélération récente de cette chute. Les indices de prix officiels pour les équipements de commutation centrale et les logiciels préprogrammés maintiennent également la qualité à un niveau constant. Le BEA et le BLS, les principales agences statistiques

spécialisées dans la recherche sur les prix, ont effectué le meilleur travail dans ce domaine. Cependant, un rôle important a été joué par la recherche sur les prix chez IBM, qui a longtemps été l'entreprise informatique dominante[12].

Par ailleurs, il importe de souligner que les technologies de l'information ne se limitent pas aux applications de semi-conducteurs. Les équipements de commutation et de terminal pour les communications vocales et vidéo et les communications de données ont commencé à s'appuyer sur la technologie des semi-conducteurs et les recherches empiriques ont montré que les prix de ces équipements reflètent cet état de fait. Les appareils de transmission emploient des technologies évoluant à un rythme bien supérieur à celui des semi-conducteurs. Cet écart important dans nos statistiques de prix officiels ne peut être comblé que par des indices de prix à qualité constante pour tous les types de matériels de communications.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les investissements en logiciels sont plus importants que les investissements en matériels informatiques. Cette constatation n'est apparue qu'en 1999, au moment où le BEA a intégré dans les comptes nationaux de nouvelles mesures sur les investissements en logiciels préprogrammés, personnalisés et spécifiques ; cela représente une étape fondamentale dans la compréhension du rôle des TI dans l'économie américaine. Malheureusement, les prix des logiciels constituent un autre angle mort statistique, car seuls les prix des logiciels préprogrammés sont dûment considérés dans le système officiel des statistiques de prix. Le défi de taille qu'il reste à relever consistera à élaborer des indices de prix qualité constante pour les logiciels personnalisés et les logiciels spécifiques.

3. Le rôle des technologies de l'information (TI)

Au niveau agrégé, les technologies de l'information incluent les ordinateurs, les matériels de communication et les logiciels. Ces produits apparaissent dans le PIB en tant qu'investissements réalisés par les entreprises, les ménages et les gouvernements et constituent des exportations nettes vers le reste du monde. Le PIB comprend également les services liés aux produits informatiques utilisés par les ménages et les gouvernements. La méthode utilisée pour analyser la croissance économique doit tenir compte de la substitution des produits des TI à d'autres produits de biens et services.

Comme la technologie des semi-conducteurs est la force motrice qui se cache derrière l'essor des TI, la chute imparable des prix des semi-conducteurs se répercute sur les prix dans le secteur des TI. Seules les exportations nettes des semi-conducteurs, qui se définissent comme la différence entre les exportations américaines vers le reste du monde et les importations américaines, apparaissent dans le PIB ; les ventes de semi-conducteurs aux fabricants nationaux de TI sont justement compensées par les achats de semi-conducteurs et sont exclues du PIB.

12. Voir Chandler (2000), tableau 1.1, p. 26.

Les indices de prix à qualité constante, tels que ceux revus dans la section précédente, sont une composante essentielle de la méthodologie pour l'analyse du redémarrage de la croissance américaine. Les prix des ordinateurs ont été intégrés aux NIPA en 1985 et font désormais partie du PPI également. Beaucoup plus récemment, les prix des semi-conducteurs ont été intégrés aux NIPA et au PPI. Malheureusement, les preuves relatives à ces évolutions des prix des matériels de communication et des logiciels sont nettement insuffisantes, rendant ainsi les indices de prix officiels extrêmement trompeurs.

3.1. Production

Les données sur la production présentées dans le tableau 6.1 se basent sur la plus récente révision de référence des comptes nationaux, mise à jour jusqu'à la fin de l'année 1999[13]. Le concept de production est similaire – sans être identique – au concept du produit intérieur brut utilisé par le BEA. Les deux mesures comprennent les produits finaux achetés par les entreprises, les gouvernements, les ménages et le reste du monde. Contrairement au concept du BEA, la mesure de la production présentée dans le tableau 6.1 comprend également les imputations pour les flux de services liés à des biens durables, y compris les produits des TI, utilisés par les ménages et les gouvernements.

Les imputations pour les services des matériels informatiques se basent sur le coût du capital pour les TI, tel que décrit plus précisément ci-dessous. Le coût du capital est multiplié par la valeur nominale du stock de TI afin d'obtenir le flux des services imputé provenant des produits de ces TI. Dans le secteur des entreprises, cela correspond au revenu du capital pour des entreprises utilisant ces produits comme facteurs de production. En ce qui concerne les ménages et les gouvernements, le flux du revenu du capital doit être imputé. Le même type d'imputation est utilisé dans les NIPA pour le logement. Ainsi, la valeur locative du logement occupé par un locataire correspond pour les sociétés immobilières au revenu du capital alors que la valeur locative du logement occupé par un propriétaire est imputée aux ménages.

Le PIB exprimé en dollars courants dans le tableau 6.1 est de 9,8 trillions de dollars pour 1999, lequel chiffre comprend les imputations, et la croissance de la production réelle est de 3,46 % en moyenne pour la période de 1948 à 1999. Ces ordres de grandeur peuvent être comparés à la valeur exprimée en dollars courants de 9,3 trillions de dollars en 1999 et au taux moyen de croissance réelle de 3,40 % sur la période de 1948 à 1999 pour le PIB officiel. Le tableau 6.1 présente les valeurs exprimées en dollars courants et les indices de prix du PIB et de la production de TI. Cela comprend, d'une part, la production de biens d'investissement tels que des ordinateurs, des logiciels, des matériels de communication et des biens d'investissement hors TI, et, d'autre part, la production des biens et services de consommation hors TI ainsi que les flux imputés de services de capital des TI provenant des ménages et des gouvernements.

13. Voir Jorgenson et Stiroh (2000b), Annexe A, pour de plus amples informations sur les estimations de production.

TABLEAU 6.1
Produits des technologies de l'information et produit intérieur brut

	Ordinateur		Logiciels		Communications		Services TI		Total TI		PIB	
Année	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix
1948					1,8	0,81	0,4	3,26	2,3	2,47	307,71	0,19
1949					1,7	0,81	0,4	2,19	2,0	2,29	297,00	0,18
1950					1,9	0,83	0,6	2,38	2,5	2,38	338,98	0,19
1951					2,2	0,86	0,8	2,30	3,0	2,43	370,64	0,19
1952					2,7	0,84	1,1	2,50	3,9	2,43	387,43	0,19
1953					3,0	0,80	1,5	2,56	4,5	2,38	418,15	0,20
1954					2,7	0,81	1,3	1,86	3,9	2,15	418,32	0,20
1955					3,0	0,81	1,8	2,25	4,7	2,30	461,31	0,20
1956					3,7	0,82	2,0	2,27	5,7	2,33	484,72	0,21
1957					4,3	0,85	1,9	1,79	6,2	2,22	503,61	0,21
1958					3,8	0,86	2,1	1,84	5,9	2,25	507,20	0,22
1959	0,0	662,98			4,7	0,86	2,7	2,14	7,4	2,37	551,85	0,22
1960	0,2	662,98	0,1	0,58	5,1	0,84	2,8	1,99	8,2	2,28	564,94	0,22
1961	0,3	497,23	0,2	0,59	5,6	0,82	2,8	1,88	9,0	2,19	581,79	0,22
1962	0,3	350,99	0,2	0,59	6,2	0,82	3,3	1,99	10,0	2,20	623,28	0,22
1963	0,8	262,69	0,5	0,59	6,2	0,81	3,3	1,81	10,8	2,08	666,92	0,23
1964	1,0	218,30	0,6	0,57	6,9	0,79	3,6	1,76	12,1	2,01	726,52	0,24
1965	1,3	179,45	0,9	0,58	8,1	0,78	4,7	1,99	15,0	2,03	795,14	0,25
1966	1,9	126,16	1,2	0,54	9,7	0,76	5,2	1,85	18,0	1,88	871,30	0,25
1967	2,1	102,41	1,5	0,58	10,7	0,76	5,0	1,50	19,3	1,75	918,15	0,26
1968	2,1	87,48	1,6	0,58	11,6	0,78	5,4	1,40	20,7	1,71	973,04	0,26
1969	2,7	79,16	2,3	0,63	13,0	0,79	5,8	1,31	23,8	1,70	1 045,84	0,27
1970	3,0	71,13	3,1	0,70	14,4	0,81	6,7	1,34	27,1	1,73	1 105,24	0,29
1971	3,1	54,17	3,2	0,69	14,7	0,83	8,1	1,47	29,0	1,73	1 178,82	0,30
1972	3,9	43,67	3,7	0,70	15,6	0,85	9,0	1,48	32,2	1,72	1 336,21	0,32
1973	3,9	41,39	4,3	0,72	18,2	0,86	12,1	1,78	38,4	1,82	1 502,51	0,34
1974	4,3	33,80	5,3	0,77	19,9	0,90	10,9	1,45	40,4	1,73	1 605,85	0,37
1975	4,0	31,27	6,6	0,83	21,3	0,96	12,0	1,46	43,9	1,79	1 785,82	0,41
1976	4,9	26,12	7,1	0,85	23,8	0,98	14,2	1,58	50,0	1,83	2 017,48	0,44
1977	6,3	22,72	7,5	0,87	28,1	0,97	22,5	2,28	64,4	2,02	2 235,69	0,46
1978	8,5	15,44	9,2	0,90	32,7	0,99	20,3	1,86	70,6	1,85	2 517,69	0,49
1979	11,4	12,81	11,9	0,94	38,4	1,02	26,5	2,18	88,2	1,92	2 834,85	0,54
1980	14,0	9,97	14,5	1,00	43,9	1,07	23,5	1,73	95,9	1,80	2 964,53	0,57
1981	19,2	8,75	17,8	1,08	48,6	1,13	22,4	1,46	108,0	1,76	3 285,23	0,62
1982	22,0	7,80	21,1	1,12	50,9	1,17	25,6	1,49	119,5	1,77	3 445,39	0,66
1983	28,8	6,44	24,9	1,13	55,0	1,17	29,5	1,50	138,1	1,71	3 798,77	0,70
1984	37,4	5,24	30,4	1,15	62,9	1,18	33,3	1,44	163,9	1,63	4 288,08	0,74
1985	39,6	4,48	35,2	1,15	69,9	1,17	38,5	1,44	183,1	1,57	4 542,62	0,75
1986	45,9	4,45	38,5	1,13	72,7	1,17	42,7	1,36	199,7	1,54	4 657,37	0,74
1987	48,6	3,93	43,7	1,14	74,9	1,15	50,3	1,37	217,5	1,50	5 078,08	0,78
1988	54,1	3,72	51,2	1,15	82,1	1,14	59,3	1,40	246,7	1,48	5 651,98	0,83
1989	56,9	3,52	61,4	1,13	85,1	1,13	63,0	1,31	266,3	1,43	5 988,81	0,85
1990	52,4	3,09	69,3	1,12	86,5	1,12	68,5	1,28	276,6	1,38	6 284,94	0,88
1991	52,6	2,85	78,2	1,13	83,9	1,12	67,5	1,13	282,2	1,32	6 403,31	0,90
1992	54,9	2,44	83,9	1,06	88,1	1,11	77,3	1,15	304,1	1,27	6 709,86	0,92
1993	54,8	2,02	95,5	1,06	92,6	1,09	84,7	1,11	327,6	1,21	6 988,79	0,93
1994	57,6	1,80	104,6	1,04	102,6	1,07	96,6	1,12	361,4	1,17	7 503,87	0,96
1995	70,5	1,41	115,7	1,03	112,4	1,03	108,7	1,10	407,2	1,11	7 815,29	0,97
1996	78,3	1,00	131,0	1,00	120,1	1,00	115,1	1,00	444,5	1,00	8 339,01	1,00
1997	86,0	0,73	158,1	0,97	131,5	0,98	123,0	0,90	498,7	0,91	9 009,43	1,04
1998	86,9	0,53	193,3	0,94	140,4	0,95	131,9	0,79	552,5	0,82	9 331,07	1,03
1999	92,4	0,39	241,2	0,94	158,1	0,92	140,9	0,69	632,6	0,75	9 817,43	1,04

Notes : Les valeurs sont exprimées en milliards de dollars courants. Les prix sont normalisés par rapport à la valeur 1 en 1996. Les produits des technologies de l'information représentent le produit intérieur brut par type de produit.

Le trait le plus marquant relatif aux données présentées dans le tableau 6.1 est la chute rapide des prix pour les investissements en ordinateurs, à savoir 17,1 % par an de 1959 à 1995. Depuis 1995, cette chute a quasiment doublé à 32,1 % par an. Par contre, le prix relatif des logiciels a été constant pendant cette période et n'a commencé à chuter qu'à la fin des années 1980. Le prix des matériels de communication s'est comporté de façon similaire à celui des logiciels, alors que l'utilisation par les ménages et les gouvernements des services de capital liés aux ordinateurs et aux logiciels montre des chutes de prix similaires aux investissements en informatique.

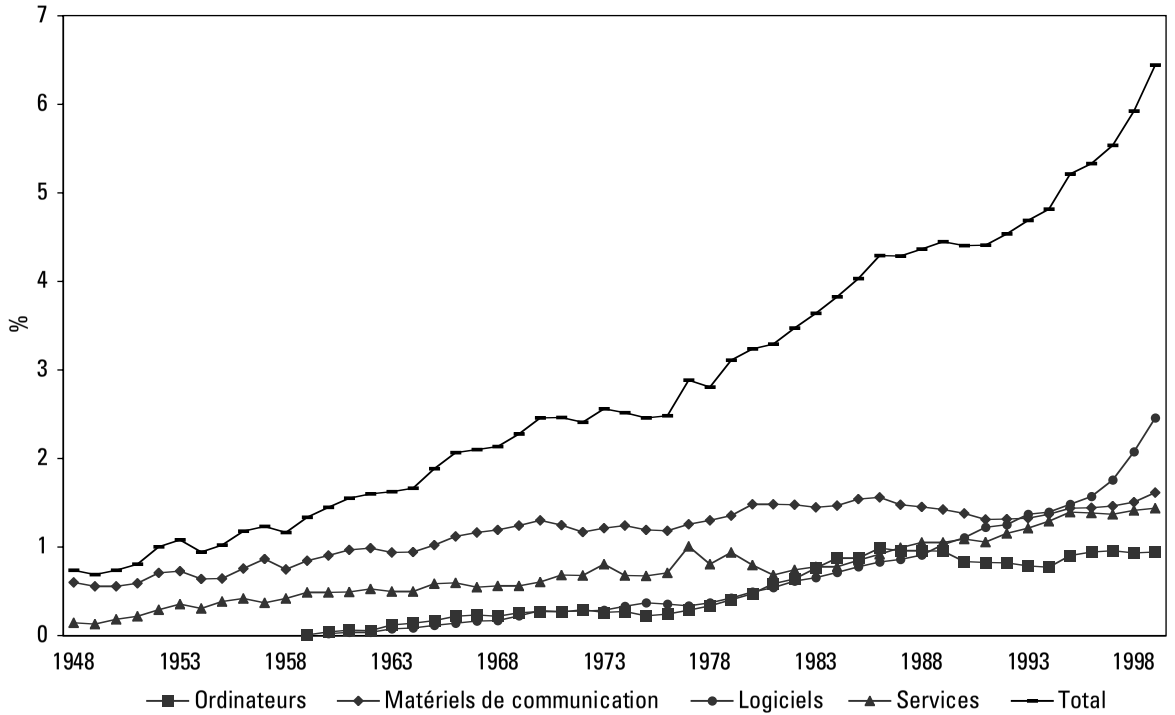
La partie supérieure du tableau 6.2 rassemble les taux de croissance des prix et des volumes pour les principales catégories de produits pour la période 1990-1995 et la période 1995-1999. Les investissements des entreprises en ordinateurs, logiciels et matériels de communication sont les principales catégories de dépenses liées aux TI. Les ménages et les gouvernements ont également dépensé des sommes assez considérables en ordinateurs, logiciels, matériels de communication et dans les services des technologies de l'information. La figure 6.4 montre que les produits de logiciels constituent la plus importante catégorie des TI en tant que part du PIB, suivis par les produits des ordinateurs et des matériels de communication.

TABLEAU 6.2
Taux de croissance de la production et des facteurs de production

	1990-1995		1995-1999	
	Prix	**Volume**	**Prix**	**Volume**
		Production		
Produit intérieur brut	1,99	2,36	1,62	4,08
Technologie de l'information	–4,42	12,15	–9,74	20,75
Ordinateurs	–15,77	21,71	–32,09	38,87
Logiciels	–1,62	11,86	–2,43	20,80
Matériels de communications	–1,77	7,01	–2,90	11,42
Services des technologies de l'information	–2,95	12,19	–11,76	18,24
Investissements hors technologie de l'information	2,15	1,22	2,20	4,21
Utilisation des produits et services hors technologie de l'information	2,35	2,06	2,31	2,79
		Facteurs de production		
Revenu intérieur brut	2,23	2,13	2,36	3,33
Service de capital des technologies de l'information	–2,70	11,51	–10,46	19,41
Service de capital des ordinateurs	–11,71	20,27	–24,81	36,36
Service de capital logiciel	–1,83	12,67	–2,04	16,30
Services de capital matériel de communication	2,18	5,45	–5,90	8,07
Services de capital hors technologie de l'information	1,53	1,72	2,48	2,94
Services de travail	3,02	1,70	3,39	2,18

Note : Taux de croissance en pourcentage annuel moyen.

FIGURE 6.4
Parts de production des technologies de l'information par type, 1948-1999



Note : Part du produit intérieur brut en dollars constants.

3.2. Services du capital

Dans cette section, il sera question des estimations de capital pour l'économie américaine pendant la période allant de 1948 à 1999[14]. Elles reposent sur les données du BEA sur les investissements ; la méthode de l'inventaire permanent génère des estimations du stock de capital et celles-ci sont agrégées, les prix des services étant utilisés comme coefficient de pondération. Cette approche, que l'on doit à Jorgenson et Griliches (1996), est basée sur l'identification des prix des services avec les productivités marginales de différents types de capital. Les estimations sur les prix des services intègrent le coût du capital[15].

Le coût du capital est un facteur d'annualisation qui transforme le prix d'un bien en prix du facteur capital correspondant (Jorgenson et Yun, 1991, p. 7). Ceci comprend le taux nominal de rendement, le taux d'amortissement et le taux de moins-value due à la chute des prix. Le coût du capital est un concept essentiel pour l'économie des technologies de l'information (Jorgenson et Stiroh, 1995, p. 300-303), en raison de la chute stupéfiante des prix des TI comme on l'a mis en évidence au tableau 6.1.

Le coût du capital est utilisé dans de nombreux domaines de l'économie, notamment dans la modélisation du comportement des producteurs, dans la mesure de la productivité et dans l'économie de la fiscalité[16]. La plupart des questions importantes relatives à la mesure du coût du capital ont été débattues pendant des décennies. La première d'entre elles concerne l'intégration du pourcentage de la baisse des prix des biens dans le coût du capital. L'hypothèse de prévision parfaite ou de prévisions rationnelles est rapidement apparue comme la formulation la plus appropriée et a ainsi été utilisée dans la plupart des applications du coût du capital[17].

La deuxième question empirique vise 10 mesures de la dépréciation économique. La stabilité des modèles de dépréciation face aux changements des politiques fiscales et des chocs des prix a fait l'objet d'études attentives. Les taux d'amortissement présentés par Jorgenson et Stiroh (2000a) résument de très nombreuses recherches empiriques sur l'allure des prix des biens[18]. Enfin, une troisième question empirique se rapporte à la structure fiscale pour le revenu du capital, cela dépend des lois fiscales en vigueur pendant chaque

14. Voir Jorgenson et Stiroh (2000b), Annexe B, pour de plus amples informations sur les estimations de capital.
15. Jorgenson (2000) présente un modèle de capital en tant que facteur de production. BLS (1983) décrit la version de ce modèle utilisée dans les statistiques officielles sur la productivité. Pour une mise à jour récente, voir : <www.bls.gov/bls/newsrels.htm>. Hulten (2001) fait une analyse des documents disponibles.
16. Lau (2000) effectue des recherches sur les applications du coût du capital.
17. Voir, à titre d'illustration, Jorgenson *et al.* (1987, p. 40-49), et Jorgenson et Griliches (1996).
18. Jorgenson et Stiroh (2000b, tableau B4, p. 196-197) présente les taux d'amortissement utilisés dans cette étude. Fraumeni (1997) décrit les taux d'amortissement utilisés dans les NIPA. Jorgenson (2000) effectue des recherches sur les études empiriques relatives à la dépréciation.

période donnée. La résolution de ces questions a préparé la voie à l'utilisation de mesures plus précises du coût du capital pour tous les éléments d'actif figurant dans les comptes nationaux, y compris les technologies de l'information[19].

La définition du capital comprend tous les éléments d'actif corporels dans l'économie américaine, les équipements et structures, ainsi que les biens durables et fonciers et les stocks des consommateurs et des gouvernements. Les flux de services du capital liés aux biens durables et utilisés par les ménages et les gouvernements entrent dans les mesures de la production ainsi que dans les mesures des facteurs de production. Une part sans cesse croissante de ces flux de services est associée aux investissements en TI. Les investissements en TI faits par les entreprises, les ménages et les gouvernements doivent être inclus dans le PIB, avec les services du capital des TI des ménages et des gouvernements, afin de traduire tous les effets des TI sur l'économie américaine.

Le tableau 6.3 présente les stocks de capital de 1948 à 1999, ainsi que les indices de prix pour le total de l'actif corporel national et l'actif TI – ordinateurs, logiciels et matériels de communication. Le stock national des biens corporels dans le tableau 6.3 est estimé à 35,4 trillions de dollars en 1999, chiffre bien plus élevé que les 27,9 trillions de dollars de capital fixe estimés par Herman (2000) du BEA. Les différences les plus manifestes reflètent l'intégration des stocks et des biens fonciers dans le tableau 6.3.

Les investissements en TI des entreprises, ainsi que les achats d'ordinateurs, de logiciels et de matériels de communication par les ménages et les gouvernements, ont augmenté de manière spectaculaire ces dernières années, mais restent relativement peu importants. En effet, les stocks de tous les biens TI combinés ne représentent que 4,35 % du stock national des biens corporels en 1999. Le tableau 6.4 présente les estimations du flux des services du capital et les indices de prix correspondants pour la période 1948-1999.

La différence entre la croissance des services du capital et le stock de capital réside dans l'amélioration de la qualité du capital, provenant de la substitution d'éléments d'actif par des produits à marge supérieure. Le passage aux TI augmente la qualité du capital, puisque les ordinateurs, les logiciels et les matériels de communication sont des produits générant des marges relativement fortes. Les estimations sur le stock de capital ne suffisent pas à expliquer cette amélioration de la qualité et sous-estiment largement l'impact des investissements sur la croissance.

La croissance de la qualité du capital représente un peu moins de 20 % de la croissance du facteur capital pour la période de 1948 à 1995. Cependant, les améliorations de la qualité du capital ont régulièrement augmenté en importance relative. Ainsi, ces améliorations ont fait un bond à 44,9 % de la croissance totale du facteur capital entre 1995 et 1999, reflétant

19. Voir Jorgenson et Yun (2001). Diewert et Lauwrence (2000) étudient, pour leur part, les mesures du prix et du volume du capital.

TABLEAU 6.3
Stock de capital des technologies de l'information et actif corporel national

	Ordinateurs		Logiciels		Communications		Total TI		Total des actifs corporels nationaux	
Année	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix
1948					4,7	0,81	4,7	1,37	711,7	0,13
1949					5,9	0,82	5,9	1,37	750,5	0,13
1950					7,3	0,84	7,3	1,41	824,5	0,13
1951					9,0	0,87	9,0	1,46	948,1	0,14
1952					10,6	0,84	10,6	1,41	1 017,5	0,14
1953					12,2	0,81	12,2	1,36	1 094,9	0,15
1954					13,7	0,81	13,7	1,37	1 146,9	0,15
1955					15,2	0,81	15,2	1,36	1 238,4	0,15
1956					17,5	0,82	17,5	1,38	1 373,2	0,16
1957					20,7	0,86	20,7	1,44	1 494,1	0,17
1958					22,5	0,86	22,5	1,45	1 562,3	0,17
1959	0,2	752,87	0,1	0,54	24,7	0,86	25,0	1,45	1 655,7	0,18
1960	0,2	752,87	0,1	0,54	26,5	0,84	26,8	1,42	1 755,3	0,18
1961	0,5	564,66	0,3	0,55	28,8	0,83	29,5	1,39	1 854,8	0,18
1962	0,6	398,58	0,4	0,55	31,7	0,83	32,7	1,38	1 982,7	0,19
1963	1,1	298,31	0,8	0,56	33,8	0,81	35,7	1,34	2 088,5	0,19
1964	1,6	247,90	1,1	0,55	36,4	0,79	39,1	1,31	2 177,3	0,19
1965	2,2	203,79	1,6	0,55	40,0	0,78	43,8	1,28	2 315,4	0,20
1966	2,9	143,27	2,3	0,52	44,5	0,76	49,7	1,22	2 512,1	0,20
1967	3,7	116,30	3,2	0,56	50,8	0,77	57,6	1,22	2 693,3	0,21
1968	4,3	99,34	3,8	0,56	57,7	0,79	65,7	1,23	2 986,0	0,22
1969	5,3	89,90	5,1	0,61	65,4	0,80	75,7	1,25	3 319,1	0,24
1970	6,2	80,77	7,0	0,68	74,4	0,83	87,5	1,29	3 595,0	0,25
1971	6,3	61,52	7,9	0,67	82,1	0,84	96,3	1,28	3 922,6	0,26
1972	7,3	49,59	9,1	0,67	90,6	0,86	107,0	1,29	4 396,8	0,28
1973	8,6	47,00	10,7	0,69	99,9	0,88	119,2	1,31	4 960,3	0,31
1974	9,1	38,38	13,2	0,75	112,8	0,91	135,0	1,35	5 391,6	0,32
1975	9,7	35,51	16,3	0,80	128,7	0,98	154,6	1,43	6 200,5	0,36
1976	10,4	29,66	18,3	0,82	142,1	1,01	170,7	1,45	6 750,0	0,38
1977	12,4	25,81	20,4	0,84	152,3	0,99	185,1	1,42	7 574,4	0,41
1978	14,1	17,46	23,5	0,87	171,8	1,02	209,4	1,42	8 644,9	0,46
1979	19,3	14,47	28,7	0,91	195,0	1,04	243,0	1,43	9 996,7	0,51
1980	24,2	11,27	35,3	0,97	225,7	1,09	285,2	1,47	11 371,0	0,56
1981	33,6	9,90	43,6	1,04	260,9	1,15	338,1	1,53	13 002,5	0,63
1982	42,4	8,84	52,0	1,08	290,0	1,19	384,3	1,55	13 964,7	0,66
1983	52,6	7,32	60,6	1,09	314,3	1,20	427,5	1,53	14 526,0	0,68
1984	66,2	5,95	72,3	1,11	344,8	1,20	483,3	1,50	15 831,0	0,71
1985	77,7	5,08	84,2	1,11	375,0	1,20	537,0	1,46	17 548,6	0,77
1986	86,0	4,34	94,9	1,10	404,3	1,18	585,1	1,41	18 844,3	0,80
1987	94,1	3,71	108,5	1,11	434,8	1,17	637,4	1,37	20 216,2	0,84
1988	107,2	3,45	125,2	1,12	467,7	1,16	700,0	1,35	21 880,1	0,89
1989	121,0	3,23	144,4	1,11	499,7	1,15	765,1	1,33	23 618,7	0,93
1990	122,3	2,89	165,2	1,10	527,1	1,14	814,5	1,29	24 335,1	0,94
1991	124,6	2,58	189,9	1,10	548,3	1,13	862,8	1,27	24 825,7	0,95
1992	128,2	2,17	203,8	1,04	569,7	1,11	901,7	1,21	25 146,8	0,95
1993	135,6	1,82	231,8	1,05	589,5	1,10	956,9	1,17	25 660,4	0,95
1994	150,4	1,61	255,8	1,02	612,8	1,07	1 019,0	1,13	26 301,0	0,95
1995	170,3	1,33	286,7	1,03	634,1	1,03	1 091,1	1,07	27 858,4	0,98
1996	181,6	1,00	318,1	1,00	659,3	1,00	1 158,9	1,00	29 007,9	1,00
1997	198,7	0,76	365,2	0,97	695,8	0,98	1 259,7	0,94	30 895,3	1,04
1998	210,0	0,55	431,2	0,95	730,9	0,94	1 372,1	0,87	32 888,5	1,07
1999	232,4	0,41	530,6	0,95	778,5	0,90	1 541,5	0,81	35 406,9	1,11

Notes : Les valeurs sont exprimées en milliards de dollars courants. Les prix sont normalisés par rapport à la valeur 1 en 1996. L'actif corporel national comprend l'actif immobilisé et les biens durables fonciers et les stocks des consommateurs.

TABLEAU 6.4
Service de capital des technologies de l'information et revenu intérieur brut

	Ordinateurs		Logiciels		Communications		Total TI		PIB	
Année	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix	Valeur	Prix
1948					1,7	1,20	1,7	4,31	307,7	0,14
1949					1,3	0,79	1,3	2,83	297,0	0,14
1950					1,8	0,91	1,8	3,27	339,0	0,15
1951					2,1	0,90	2,1	3,21	370,6	0,15
1952					2,6	0,94	2,6	3,36	387,4	0,15
1953					3,2	0,96	3,2	3,46	418,2	0,15
1954					2,7	0,70	2,7	2,49	418,3	0,15
1955					3,6	0,85	3,6	3,05	461,3	0,16
1956					4,2	0,87	4,2	3,12	484,7	0,17
1957					3,7	0,68	3,7	2,44	503,6	0,17
1958					4,1	0,68	4,1	2,45	507,2	0,17
1959	0,2	444,36	0,1	0,63	5,2	0,80	5,5	2,87	551,9	0,18
1960	0,2	433,59	0,1	0,62	5,4	0,75	5,6	2,68	564,9	0,18
1961	0,3	637,21	0,1	0,58	5,6	0,71	6,0	2,59	581,8	0,18
1962	0,4	508,68	0,2	0,62	6,6	0,76	7,2	2,71	623,3	0,19
1963	0,6	311,81	0,3	0,58	6,5	0,67	7,3	2,34	666,9	0,20
1964	0,8	211,28	0,4	0,60	7,1	0,67	8,3	2,26	726,5	0,21
1965	1,3	182,17	0,6	0,59	9,1	0,78	11,0	2,52	795,1	0,22
1966	2,2	173,57	1,0	0,64	9,6	0,73	12,8	2,40	871,3	0,23
1967	2,3	110,97	1,1	0,50	9,8	0,66	13,2	2,01	918,2	0,23
1968	2,6	87,05	1,6	0,60	10,2	0,61	14,5	1,86	973,0	0,24
1969	2,8	68,23	1,7	0,52	11,3	0,61	15,8	1,76	1 045,8	0,25
1970	3,6	65,38	2,3	0,56	13,3	0,65	19,1	1,83	1 105,2	0,26
1971	5,2	72,48	3,7	0,77	14,9	0,67	23,9	1,99	1 178,8	0,27
1972	4,9	48,57	4,0	0,71	16,6	0,69	25,4	1,85	1 336,2	0,30
1973	4,4	33,06	4,5	0,71	22,8	0,88	31,7	2,04	1 502,5	0,32
1974	6,6	38,82	5,1	0,70	20,3	0,72	32,0	1,84	1 605,9	0,34
1975	5,9	28,43	6,7	0,80	23,2	0,77	35,7	1,85	1 785,8	0,37
1976	6,6	26,07	7,7	0,81	25,0	0,78	39,2	1,84	2 017,5	0,41
1977	7,0	20,69	8,4	0,82	41,8	1,20	57,2	2,40	2 235,7	0,44
1978	11,8	22,49	9,7	0,86	35,5	0,93	57,0	2,07	2 517,7	0,47
1979	11,6	13,33	11,6	0,90	47,9	1,14	71,1	2,15	2 834,9	0,51
1980	16,6	11,81	13,6	0,91	42,0	0,90	72,2	1,82	2 964,5	0,53
1981	17,7	7,89	15,5	0,90	40,5	0,79	73,6	1,53	3 285,2	0,58
1982	19,6	5,93	17,6	0,89	43,1	0,77	80,3	1,41	3 445,4	0,60
1983	26,4	5,46	20,6	0,91	49,4	0,82	96,4	1,43	3 798,8	0,66
1984	36,1	4,87	25,4	0,96	54,3	0,83	115,7	1,41	4 288,1	0,71
1985	39,6	3,70	30,6	0,99	63,1	0,89	133,3	1,35	4 542,6	0,73
1986	43,1	3,04	35,3	0,99	69,3	0,89	147,6	1,27	4 657,4	0,73
1987	53,4	2,93	42,1	1,04	86,5	1,02	181,9	1,36	5 078,1	0,77
1988	52,7	2,31	50,5	1,10	104,1	1,14	207,3	1,36	5 652,0	0,81
1989	57,6	2,08	60,4	1,13	105,8	1,07	223,8	1,29	5 988,8	0,84
1990	64,7	2,01	67,2	1,08	109,8	1,04	241,7	1,25	6 284,9	0,86
1991	64,2	1,76	70,8	1,00	104,2	0,93	239,2	1,12	6 403,3	0,88
1992	71,7	1,66	89,9	1,11	112,2	0,96	273,7	1,16	6 709,9	0,91
1993	77,8	1,45	90,4	0,98	126,9	1,03	295,1	1,11	6 988,8	0,92
1994	80,1	1,19	109,5	1,05	142,4	1,10	331,9	1,10	7 503,9	0,96
1995	99,3	1,12	115,5	0,99	160,7	1,16	375,6	1,09	7 815,3	0,96
1996	123,6	1,00	131,9	1,00	149,0	1,00	404,5	1,00	8 339,0	1,00
1997	134,7	0,76	156,2	1,02	157,1	0,98	448,1	0,92	9 009,4	1,04
1998	152,5	0,59	178,2	0,97	162,0	0,93	492,6	0,82	9 331,1	1,04
1999	157,7	0,42	204,4	0,91	175,3	0,91	537,4	0,72	9 817,4	1,06

Notes : Les valeurs sont exprimées en milliards de dollars courants. Les prix sont normalisés par rapport à la valeur 1 en 1996.

la très rapide restructuration du capital visant à profiter de la brusque chute des prix des TI. Le stock de capital est peu à peu devenu une mesure du facteur capital moins précise et il est aujourd'hui nettement insuffisant.

La figure 6.5 présente les services du capital relatifs aux TI comme une part du revenu intérieur brut. La partie inférieure du tableau 6.2 récapitule les taux de croissance des prix et les volumes de capital pour la période de 1990 à 1995 et la période de 1995 à 1999. La croissance des services des TI passe de 11,51 % par an pendant la période allant de 1990 à 1995 à 19,41 % pendant la période allant de 1996 à 1999, alors que la croissance des services du capital hors TI passe de 1,72 % à 2,94 %. Ce qui témoigne d'un renversement de tendance, puisque, jusqu'à fin 1995, la croissance du capital avait ralenti.

3.3. Services du travail

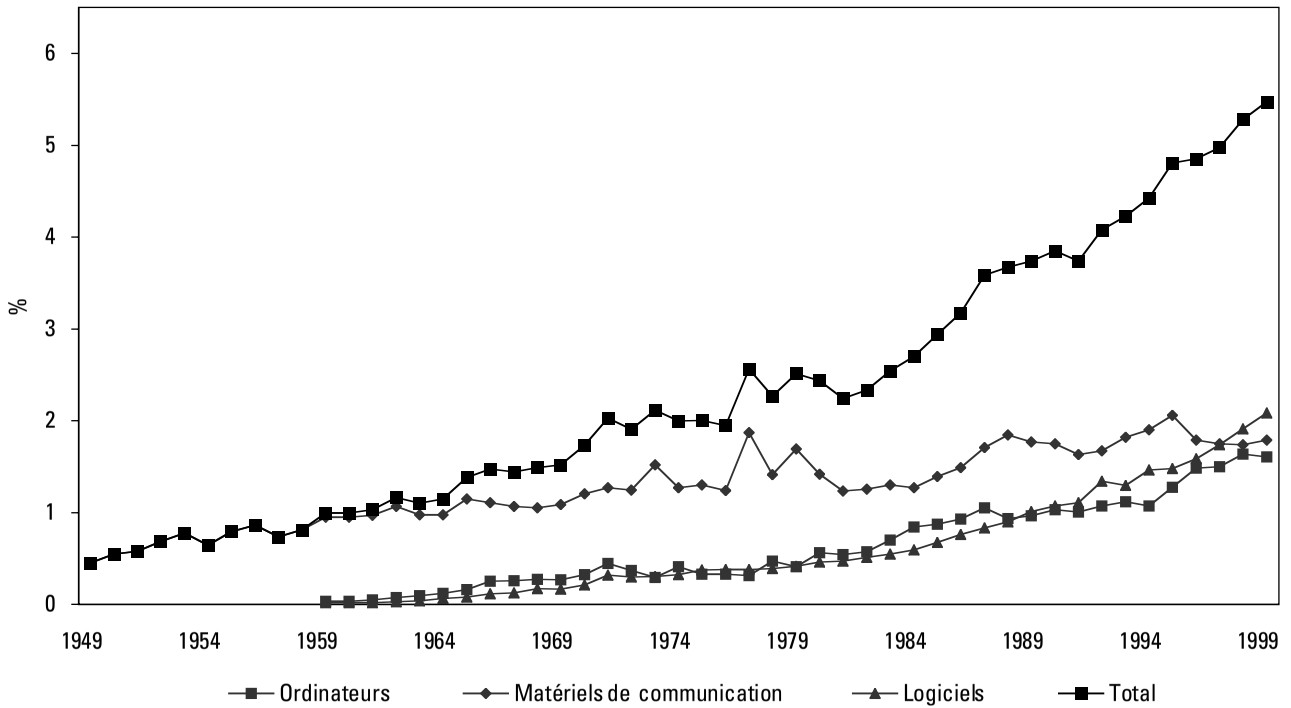
Cette section présente les estimations du facteur travail pour l'économie américaine de 1948 à 1999. Celles-ci intègrent les données individuelles des recensements de la population de 1970, 1980 et 1990, ainsi que les enquêtes annuelles sur l'état de la population (CPS : Current Population Surveys). Les indices à qualité constante pour le prix et le volume du facteur travail rendent compte du caractère hétérogène de la population active au regard du sexe, de la catégorie professionnelle, de l'âge et de la formation, ce qui correspond à l'approche de Jorgenson *et al.* (1987). Les estimations ont été revues et mises à jour par Ho et Jorgenson (2000)[20].

La distinction entre le facteur travail et les heures de travail est analogue à celle qui existe entre les services de capital et le stock de capital. La croissance de la qualité de travail est la différence entre la croissance du facteur travail et les heures travaillées. La qualité du travail reflète la substitution des travailleurs fabriquant des produits à forte marge par des travailleurs fabriquant des produits à marge faible. Le tableau 6.5 présente les estimations du facteur travail, des heures de travail et de la qualité du travail.

La valeur des dépenses de main-d'œuvre dans le tableau 6.5 est de 5,8 trillions de dollars en 1999, soit 59,3 % de la valeur de la production. Cette part reflète de manière précise le concept du revenu intérieur brut, y compris les imputations pour la valeur des services de capital pour les ménages et les gouvernements. Comme cela est montré dans le tableau 6.7, le taux de croissance du facteur travail s'est accéléré et est passé de 1,70 % entre 1990 et 1995 à 2,18 % entre 1995 et 1999. Cela est dû essentiellement à l'augmentation des heures travaillées, qui sont passées de 1,17 % pour la période allant de 1990 à 1995 à 1,98 % pour la période allant de 1995 à 1999, car la participation de la main-d'œuvre a augmenté et les taux du chômage ont fortement baissé.

20. Voir Jorgenson et Stiroh (2000b), Annexe C, pour de plus amples informations sur les estimations relatives au facteur travail. Gollop (2000) examine, quant à lui, les mesures du volume de travail.

FIGURE 6.5
Parts du facteur de production des technologies de l'information par type, 1948-1999



Note : Part du revenu intérieur brut en dollars constants.

TABLEAU 6.5
Services de travail

Année	Services de travail				Emploi	Heures hebdomadaires	Rémunération horaire	Heures travaillées
	Prix	Quantité	Valeur	Quantité				
1948	0,08	1 924,6	156,1	0,75	61 536	39,1	1,2	125 127
1949	0,09	1 860,0	171,5	0,75	60 437	38,5	1,4	121 088
1950	0,09	1 961,0	179,2	0,76	62 424	38,5	1,4	125 144
1951	0,10	2 133,0	214,4	0,78	66 169	38,7	1,6	133 145
1952	0,10	2 197,2	227,2	0,79	67 407	38,5	1,7	135 067
1953	0,11	2 254,3	241,8	0,80	68 471	38,3	1,8	136 331
1954	0,11	2 190,3	243,9	0,81	66 843	37,8	1,9	131 477
1955	0,11	2 254,9	256,7	0,81	68 367	37,8	1,9	134 523
1956	0,12	2 305,0	275,0	0,82	69 968	37,5	2,0	136 502
1957	0,13	2 305,1	295,5	0,83	70 262	37,0	2,2	135 189
1958	0,14	2 245,3	309,1	0,83	68 578	36,7	2,4	130 886
1959	0,14	2 322,1	320,1	0,84	70 149	36,8	2,4	134 396
1960	0,15	2 352,2	344,1	0,84	71 128	36,5	2,5	135 171
1961	0,15	2 378,5	355,0	0,86	71 183	36,3	2,6	134 451
1962	0,15	2 474,1	376,7	0,87	72 673	36,4	2,7	137 612
1963	0,15	2 511,4	386,2	0,88	73 413	36,4	2,8	139 050
1964	0,16	2 578,1	417,6	0,88	74 990	36,3	3,0	141 447
1965	0,17	2 670,6	451,9	0,89	77 239	36,3	3,1	145 865
1966	0,18	2 788,5	500,3	0,89	80 802	36,0	3,3	151 448
1967	0,19	2 842,4	525,5	0,90	82 645	35,7	3,4	153 345
1968	0,20	2 917,0	588,3	0,91	84 733	35,5	3,8	156 329
1969	0,22	2 992,1	646,6	0,91	87 071	35,4	4,0	160 174
1970	0,23	2 938,6	687,3	0,91	86 867	34,9	4,4	157 488
1971	0,26	2 924,9	744,5	0,90	86 715	34,8	4,7	156 924
1972	0,27	3 011,7	817,6	0,91	88 838	34,8	5,1	160 873
1973	0,29	3 135,0	909,4	0,91	92 542	34,8	5,4	167 271
1974	0,31	3 148,2	988,5	0,91	94 121	34,2	5,9	167 425
1975	0,35	3 082,9	1 063,9	0,92	92 575	33,8	6,5	162 879
1976	0,38	3 174,4	1 194,0	0,92	94 922	33,9	7,1	167 169
1977	0,41	3 277,4	1 334,5	0,92	98 202	33,8	7,7	172 780
1978	0,44	3 430,3	1 504,2	0,92	102 931	33,8	8,3	180 842
1979	0,47	3 554,7	1 673,2	0,92	106 463	33,7	9,0	186 791
1980	0,52	3 535,7	1 827,9	0,92	107 061	33,3	9,9	185 591
1981	0,55	3 563,8	1 968,8	0,93	108 050	33,2	10,6	186 257
1982	0,60	3 519,7	2 096,3	0,93	106 749	32,9	11,5	182 772
1983	0,63	3 586,7	2 269,8	0,94	107 810	33,1	12,2	185 457
1984	0,66	3 786,7	2 499,1	0,94	112 604	33,2	12,9	194 555
1985	0,69	3 882,9	2 679,0	0,95	115 205	33,1	13,5	198 445
1986	0,75	3 926,3	2 931,1	0,95	117 171	32,9	14,6	200 242
1987	0,74	4 075,1	3 019,7	0,96	120 474	32,9	14,6	206 312
1988	0,75	4 207,7	3 172,2	0,96	123 927	32,9	15,0	211 918
1989	0,80	4 348,4	3 457,8	0,97	126 755	33,0	15,9	217 651
1990	0,84	4 381,5	3 680,8	0,97	128 341	32,9	16,8	219 306
1991	0,88	4 322,0	3 800,2	0,98	127 080	32,5	17,7	214 994
1992	0,94	4 353,9	4 086,9	0,98	127 238	32,6	19,0	215 477
1993	0,96	4 497,4	4 297,7	0,99	129 770	32,8	19,5	221 003
1994	0,96	4 628,3	4 453,1	0,99	132 799	32,9	19,6	226 975
1995	0,98	4 770,7	4 660,5	1,00	135 672	33,0	20,0	232 545
1996	1,00	4 861,7	4 861,7	1,00	138 018	32,8	20,6	235 798
1997	1,03	4 987,9	5 122,0	1,00	141 184	33,0	21,1	242 160
1998	1,08	5 108,8	5 491,5	1,00	144 305	33,0	22,2	247 783
1999	1,12	5 204,8	5 823,4	1,00	147 036	32,9	23,1	251 683

Notes : Les valeurs sont exprimées en milliards de dollars courants. Les prix sont normalisés par rapport à la valeur 1 en 1996. Les chiffres de l'emploi sont exprimés en milliers de travailleurs. Les heures hebdomadaires correspondent aux heures par travailleur, divisées par 52. La rémunération horaire est exprimée en dollars courants et les heures travaillées, en millions d'heures.

La croissance de la qualité du travail a diminué considérablement à la fin des années 1990, passant de 0,53 % entre 1990 et 1995 à 0,20 % entre 1995 et 1999. Ce ralentissement traduit les fameuses tendances démographiques dans la composition de la population active, ainsi que l'épuisement du groupe des travailleurs disponibles. L'augmentation des heures travaillées ne traduisant pas ces changements de la croissance de la qualité du travail, elle constitue une mesure fort trompeuse du facteur travail.

4. La renaissance de la croissance américaine

L'économie américaine connaît un nouvel essor tout à fait remarquable depuis le milieu des années 1990, avec une croissance en augmentation continue de la production, de la productivité salariale et de la productivité globale des facteurs. L'objectif de cette section est de quantifier les sources de la croissance au cours des années 1948 à 1999 et pendant les diverses sous-périodes. Nous tenterons essentiellement d'expliquer l'accélération brutale du niveau de l'activité économique depuis 1995 et, en particulier, de mettre en évidence le rôle des technologies de l'information.

Le cadre approprié pour l'analyse de l'impact des technologies de l'information est la frontière des possibilités de production, exprimant les produits des biens d'investissement des TI ainsi que les facteurs de production des services du capital des TI. Un avantage majeur de ce cadre est le fait que les prix des produits et des facteurs de production des TI sont liés par le prix des services du capital des TI. Il permet de reproduire avec succès les substitutions entre produits et facteurs de production du fait du développement rapide des TI. Il comprend également les coûts d'ajustement tout en permettant aux marchés financiers d'être modélisés de façon indépendante.

En conséquence de l'essor rapide des TI, un certain nombre des concepts les plus familiers de la croissance économique ont été remplacés. La fonction globale de production arrive en tête de ceux-ci. Le stock de capital en tant que mesure des facteurs de production du capital n'est plus adapté pour capter l'importance croissante des TI, car il occulte la restructuration des facteurs de production de capital qui est une source majeure du redémarrage de la croissance. En fin de compte, les heures travaillées doivent être remplacées en tant que mesure des facteurs de production du travail.

4.1. La frontière des possibilités de production

La *frontière des possibilités de production* décrit les combinaisons efficaces des produits et des facteurs de production pour l'économie dans son ensemble[21]. La production agrégée Y comprend des biens d'investissement et de consommation.

21. La frontière des possibilités de production a été introduite dans la mesure de la productivité par Jorgenson (1996, p. 27-28).

Ces produits sont fabriqués à partir du facteur de production agrégé X, comprenant les services du capital et du travail. La productivité correspond à une augmentation neutre de sens de Hicks des facteurs de production cumulés.

La frontière des possibilités de production prend la forme de :

$$Y\ (I_n, I_c, I_s, I_t, C_n, C_c) = A \cdot X\ (K_n, K_c, K_s, K_t, L) \qquad (1)$$

où les produits comprennent les biens d'investissement hors TI, I_n et les investissements dans le matériel informatique I_c, les logiciels I_s et les matériels de communication I_t, ainsi que les biens et services de consommation hors TI C_n et les services du capital des TI aux ménages et aux gouvernements C_c. Les facteurs de production comprennent les services du capital hors TI K_n et les services du matériel informatique K_c, des logiciels K_s et des matériels de télécommunications K_t, ainsi que les facteurs de production du travail L[22]. La *productivité globale des facteurs* (TFP : Total Factor Productivity) est caractérisée par A.

L'avantage majeur de la frontière des possibilités de production est le rôle explicite qu'elle joue sur les prix à qualité constante des produits des TI. Ces derniers sont utilisés comme déflateurs pour les dépenses nominales en investissements dans les TI afin d'obtenir les quantités de TI. Les investissements en TI sont cumulés en stocks de capital TI. Le flux des services du capital des TI est un cumul de ces stocks avec les prix des services comme pondération. De même, les prix à qualité constante des services du capital des TI sont utilisés pour *déflater* les valeurs nominales de consommation de ces services.

Un autre avantage majeur de la frontière des possibilités de production réside dans l'incorporation des coûts d'ajustement. Par exemple, un accroissement de la production de biens d'investissement en TI exige l'abandon d'une partie de la production de biens de consommation et de biens d'investissement hors TI – entraînant ainsi un coût élevé de rajustement du taux – de l'investissement des TI. Cependant, les coûts d'ajustement sont externes à l'unité de production et sont entièrement reflétés dans les prix des TI ; ces prix incluent les prévisions attendues des prix futurs des services du capital en TI.

4.2. Fonction de production agrégée

La fonction de production agrégée employée par Solow (1957, 1960) et, plus récemment, par Greenwood *et al.* (1997, 2000), Hercowitz (1998) et Harberger (1998) est une méthodologie concurrente. La fonction de production donne des produits uniques en tant que fonction des facteurs de production du capital et du travail. Il n'existe aucun rôle pour des prix séparés des biens d'investissement et de consommation et, de ce fait, aucune place pour des indices de prix à qualité constante des TI pour des produits de biens d'investissement en TI.

22. Les services de biens durables aux gouvernements et aux ménages sont inclus à la fois dans les intrants et dans les produits.

Greenwood, Hercowitz et Krusell utilisent un indice de prix pour la consommation afin de *déflater* les produits de tous les biens d'investissement, y compris les TI. Avec des prix à qualité constante de biens d'investissement qui diffèrent des prix de biens de consommation, ils empruntent à Solow (1960) le concept de l'incorporation (*embodiment*) afin de convertir les produits des biens d'investissement en une forme appropriée à l'évaluation du stock de capital[23]. L'investissement a deux prix : l'un sert à mesurer la production et l'autre, le stock de capital. Cet illogisme peut être supprimé en faisant simplement la distinction entre les produits de biens de consommation et de biens d'investissement, comme dans les comptes nationaux et dans l'équation (1). Le concept d'incorporation peut alors être abandonné.

Implicitement, Greenwood, Hercowitz et Krussell ont fait renaître la controverse autour de l'introduction d'un indice de prix à qualité constante pour les ordinateurs dans les comptes nationaux. Ils ont en effet ranimé la proposition de Denison (1993) d'utiliser un indice de prix de consommation pour faire baisser l'investissement dans les NIPA. Pour Denison, cela constituait un bon moyen d'éviter l'introduction d'indices de prix à qualité constante pour les ordinateurs. L'approche de Denison a conduit à une sous-estimation sérieuse de la croissance du PIB et à une surestimation de l'inflation.

Une autre limite de la fonction de production globale est reliée au fait qu'elle ne parvient pas à intégrer les coûts d'ajustement. Lucas (1967) a présenté un modèle de production avec des coûts d'ajustement internes. Hayashi (2000) montre comment calculer ces coûts d'ajustement à partir du Q de Tobin (1969), soit le rapport de la valeur sur le marché boursier de l'unité de production à la valeur sur le marché des actifs de l'unité. La mise en œuvre de cette approche exige simultanément la modélisation de la production et l'évaluation des actifs. Si les coûts d'ajustement sont externes, comme dans la frontière des possibilités de production (1), l'évaluation des actifs peut être modélisée séparément de la production[24].

4.3. Sources de la croissance

Dans l'hypothèse où les marchés de produits et de facteurs sont concurrentiels, l'équilibre de production implique que la croissance de la production pondérée par les parts des produits est la somme pondérée de la croissance des facteurs de production et de la croissance de la productivité globale des facteurs :

$$\overline{w}_{I,n}\Delta \ln \mathrm{I}_n + \overline{w}_{I,c}\Delta \mathrm{I}_c + \overline{w}_{I,s}\Delta \mathrm{I}_s + \overline{w}_{i,t}\Delta \mathrm{I}_t + \overline{w}_{\mathrm{C},n}\,\mathrm{C}_n + \overline{w}_{\mathrm{C},c}\Delta \ln \mathrm{C}_c =$$
$$\overline{v}_{K,n}\Delta \ln \mathrm{K}_n + \overline{v}_{\mathrm{K},c}\Delta \ln \mathrm{K}_c + \overline{v}_{\mathrm{K},s}\Delta \ln \mathrm{K}_s + \overline{v}_{\mathrm{K},j}\Delta \ln \mathrm{K}_t + \overline{v}_{\mathrm{L}}\Delta \ln \mathrm{L} + \Delta \ln \mathrm{A} \quad (2)$$

23. Whelan (1999) utilise également le concept de la transposition de Solow.
24. Voir, par exemple, Campbell et Shiller (1998).

où w et v indiquent les valeurs moyennes des parts. La somme des parts des produits et des facteurs de production est égale à 1 dans l'hypothèse supplémentaire de rendements d'échelle constants,

$$\overline{w}_{I,n} + \overline{w}_{I,c} + \overline{w}_{I,s} + \overline{w}_{i,t} + \overline{w}_{C,n} + \overline{w}_{C,c} = \overline{v}_{K,n} + \overline{v}_{K,c} + \overline{v}_{K,s} + \overline{v}_{K,j} + \overline{v}_{L} = 1$$

L'équation (2) permet d'obtenir les apports des produits ainsi que les facteurs de production pour la croissance économique américaine. Le taux de croissance de la production est une moyenne pondérée des taux de croissance de la production en biens de consommation et d'investissement, et l'apport de chaque produit est son taux de croissance pondéré. De même, le taux de croissance des facteurs de production est une moyenne pondérée des taux de croissance des services du capital et du travail, et l'apport de chaque facteur de production est son taux de croissance pondéré. L'apport de la productivité globale des facteurs, c'est-à-dire le taux de croissance du facteur d'augmentation A dans l'équation (2), est la différence entre les taux de croissance de la production des facteurs de production.

Le tableau 6.6 présente les résultats pour la période 1948-1999 et diverses sous-périodes d'une comptabilité de la croissance basée sur l'équation (2) et réalisée par Jorgenson et Stiroh (1999, 2000a). La croissance économique est ventilée par catégories de produits et de facteurs de production, quantifiant l'apport des TI aux produits d'investissement et de consommation, ainsi qu'aux facteurs de production du capital. Ces estimations considèrent les ordinateurs, les logiciels et les matériels de communication comme des catégories distinctes des TI.

En remaniant l'équation (2), les résultats peuvent être présentés en termes de productivité moyenne du travail (ALP), définie comme $Y = Y / H$, le rapport de production Y aux heures travaillées H, et $k = K / H$, le rapport de services du capital K par rapport aux heures travaillées

$$\Delta \ln y = \overline{v}_{K} \Delta \ln k + \overline{v}_{L} (\Delta \ln L - \Delta \ln H) + \Delta \ln A \qquad (3)$$

L'équation (3) répartit la croissance ALP en trois sources. La première est l'*intensification du capital,* c'est-à-dire la croissance du capital aux heures travaillées, qui indique la substitution capital-travail. La deuxième est l'amélioration de la qualité du travail, qui traduit la proportion grandissante d'heures effectuées par des travailleurs ayant une productivité marginale élevée. Enfin, la troisième est la croissance du TFP, qui contribue point par point à la croissance de l'ALP.

4.4. Apports de l'investissement en TI

La figure 6.5 a déjà décrit l'accroissement rapide de l'importance donnée aux services des TI, qui, à son tour, reflète le rythme intensif des baisses subies par les prix des TI. En 1995-1999, le prix des services du capital pour les ordinateurs a chuté de 24,81 % par an, comparé à une augmentation de 36,36 % du capital due aux ordinateurs. En conséquence, la valeur des services liés aux ordinateurs s'est accrue de façon considérable. Cependant, la valeur actuelle des ordinateurs exprimée en dollars ne représentait que de 1,6 % du produit intérieur brut en 1999.

TABLEAU 6.6
Sources de la croissance du produit intérieur brut

	1948-1999	1948-1973	1973-1990	1990-1995	1995-1999
			Production		
Produit intérieur brut	3,46	3,99	2,86	2,36	4,08
Apport des technologies de l'information	0,40	0,20	0,46	0,57	1,18
Ordinateurs	0,12	0,04	0,16	0,18	0,36
Logiciels	0,08	0,02	0,09	0,15	0,39
Matériels de communication	0,10	0,08	0,10	0,10	0,17
Services des technologies de l'information	0,10	0,06	0,10	0,15	0,25
Apport des services hors technologie de l'information	3,06	3,79	2,40	1,79	2,91
Apport de l'investissement hors technologie de l'information	0,72	1,06	0,34	0,23	0,83
Apports de l'utilisation de produits et services hors technologie de l'information	2,34	2,73	2,06	1,56	2,08
			Facteurs de production		
Revenu intérieur brut	2,84	3,07	2,61	2,13	3,33
Apport des services de capital des technologies de l'information	0,34	0,16	0,40	0,48	0,99
Ordinateurs	0,15	0,04	0,20	0,22	0,55
Logiciels	0,07	0,02	0,08	0,16	0,29
Matériel de communication	0,11	0,10	0,12	0,10	0,14
Apport des services de capital hors technologies de l'information	1,36	1,77	1,05	0,61	1,07
Apport des services de travail	1,14	1,13	1,16	1,03	1,27
Productivité globale des facteurs	0,61	0,92	0,25	0,24	0,75

Notes : Taux de croissance en pourcentage annuel moyen. L'apport d'un produit ou d'un facteur de production constitue le taux de croissance, multiplié par la part de la valeur.

L'accumulation rapide des logiciels semble avoir diverses causes. Le prix des services liés aux logiciels n'a baissé que de 2,04 % par an entre 1995 et 1999. Néanmoins, les sociétés ont très rapidement accumulé des logiciels, avec un accroissement de 16,30 % par an des services du capital réel. Une explication possible est que les sociétés répondent aux baisses des prix des ordinateurs en investissant dans des facteurs de production complémentaires comme les logiciels. Cependant, une explication plus plausible encore est que les indices de prix utilisés pour *déflater* les investissements de logiciels ne parviennent pas à maintenir la qualité à un niveau constant, ce qui conduit à une surestimation de l'inflation et à une sous-estimation de la croissance.

Bien que la baisse des prix relative aux matériels de communication au cours de la période 1995-1999 soit comparable à celle des logiciels, les investissements dans ces matériels sont plus en harmonie avec les prix. Cependant, les prix des matériels de communication ne réussissent pas à maintenir la qualité constante. La technologie des équipements de commutation, par exemple, est semblable à celle des ordinateurs ; les investissements dans cette catégorie sont *déflatés* par un indice de prix à qualité constante

mis au point par le BEA. Les déflateurs de prix conventionnels sont utilisés pour les matériels de transmission, tels que les câbles en fibre optique ; cela conduit à une sous-estimation des taux de croissance des investissements, du stock de capital, des services du capital et du PIB, ainsi qu'à une surestimation du taux d'inflation.

Les figures 6.6 et 6.7 mettent en évidence les apports croissants des TI à la croissance économique américaine. La figure 6.6 montre la ventilation entre les produits des TI et hors TI relatifs aux sous-périodes allant de 1948 à 1999, alors que la figure 6.7 décompose l'apport des TI selon ses composantes. Bien que l'importance des TI se soit accrue de façon régulière, la figure 6.6 montre que les investissements récents et l'essor de la consommation ont pratiquement doublé l'apport des TI. La figure 6.7 révèle qu'à la fin des années 1990 les investissements en ordinateurs à eux seuls représentent le principal facteur d'apport des TI, mais que les investissements en logiciels et matériels de communication prennent une importance de plus en plus grande.

Les figures 6.8 et 6.9 présentent une ventilation similaire des facteurs de production des TI selon la production ; l'apport de ces facteurs de production s'accroît de façon encore plus forte. La figure 6.8 indique que l'apport des TI représente maintenant plus de 48,1 % de l'apport total des facteurs de production du capital. La figure 6.9 montre que le matériel informatique constitue le principal facteur d'apport des TI pour ce qui est des facteurs de production, reflétant ainsi la part grandissante et le taux de croissance en augmentation constante des investissements en matériels informatiques à la fin des années 1990.

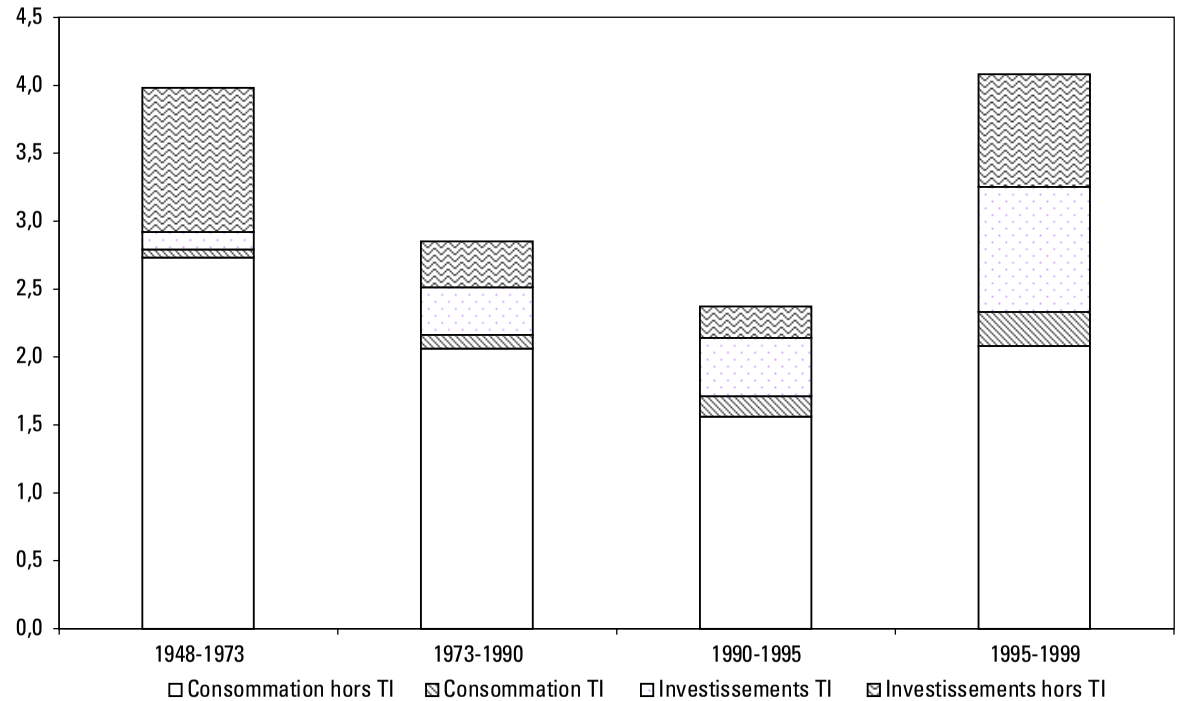
Les investissements des entreprises privées prédominent dans les TI, selon Jorgenson et Stiroh (1999, 2000a)[25]. Viennent ensuite les dépenses des ménages en matériels et en services informatiques. Pour obtenir un tableau complet, il faut également ajouter à cela les achats du gouvernement en matériels et services informatiques, ainsi que les exportations nettes de produits des TI.

Les sociétés, les consommateurs, les gouvernements et les acheteurs d'exportations américaines réagissent aux changements de prix concernant ces produits, accroissant ainsi les apports des ordinateurs, des logiciels et des matériels de télécommunication.

Le tableau 6.2 a montré que les prix des investissements en ordinateurs ont chuté de plus de 32 % par an, le prix des logiciels de 2,4 %, le prix des matériels de communication de 2,9 %, et le prix des services des TI de 11,8 % au cours de la période 1995-1999, alors que les prix hors TI ont augmenté de 2,2 %. En réaction à ces changements de prix, les entreprises, les ménages et les gouvernements ont accumulé des ordinateurs, des logiciels et des matériels de communication beaucoup plus rapidement que toute autre forme de capital.

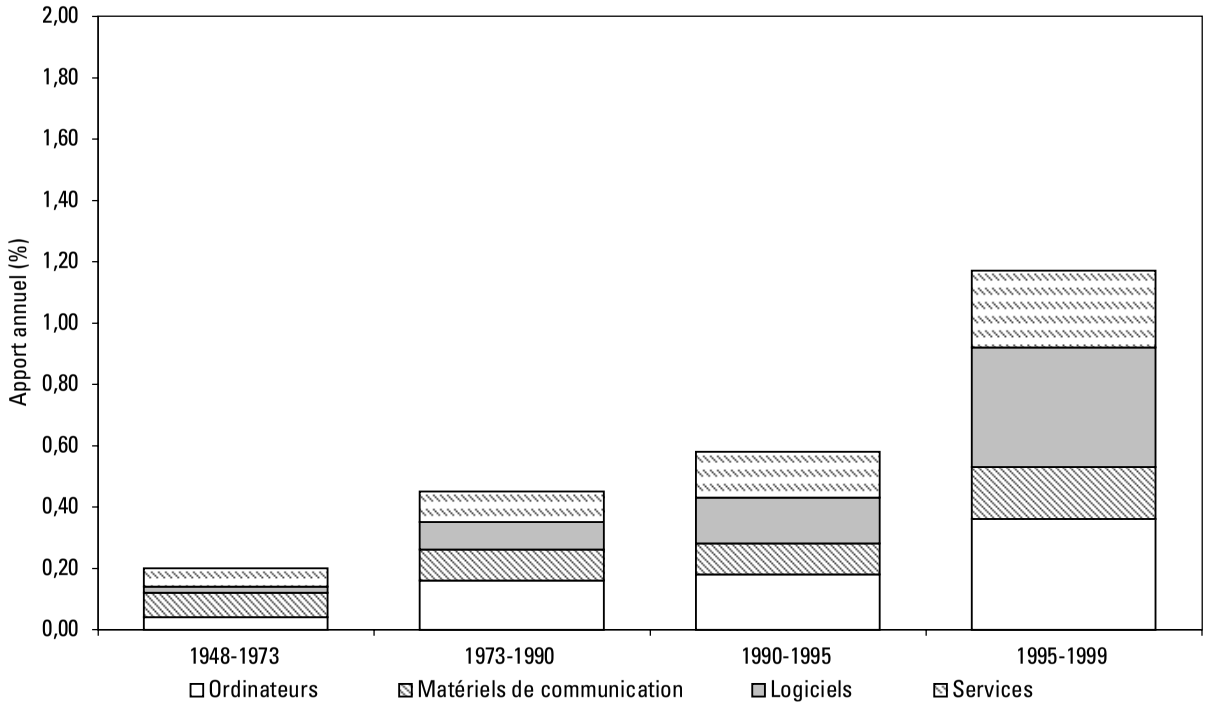
25. Bosworth et Triplett (2000) comparent les résultats de Jorgenson et Stiroh (2000b) avec ceux de Oliner et Sichel (2000).

FIGURE 6.6
Apport de production des technologies de l'information



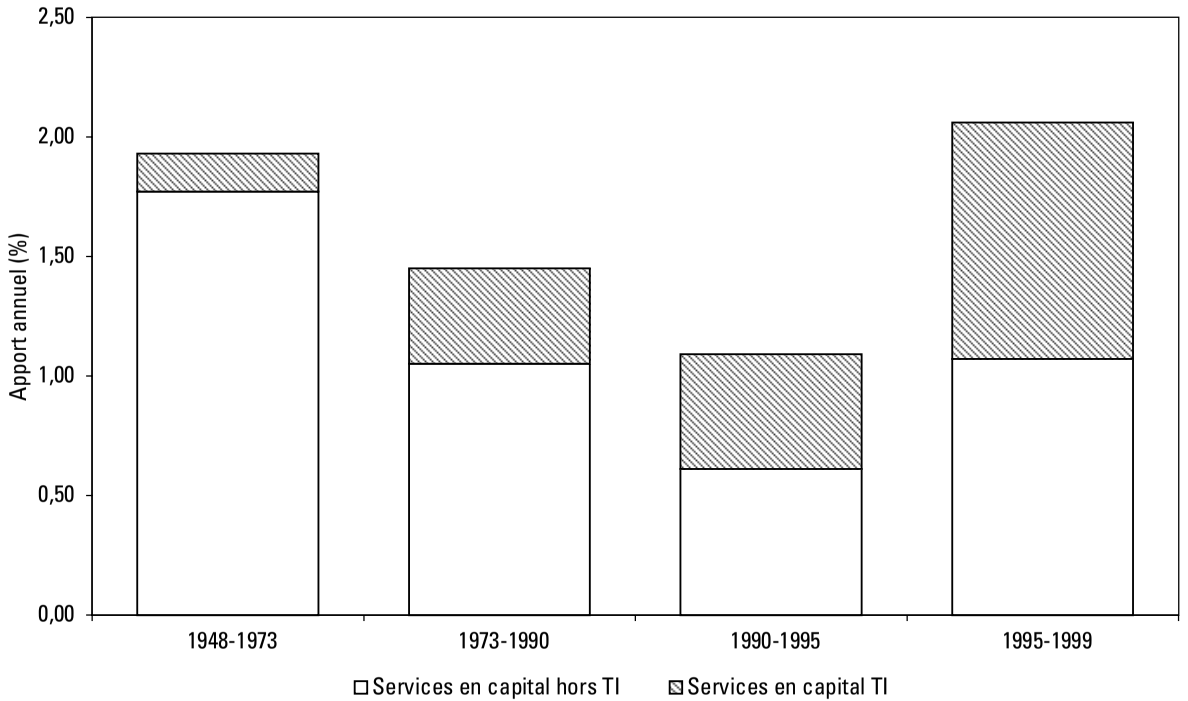
Note : Les apports de production représentent les taux de croissance annuels moyens, pondérés par les parts de production.

FIGURE 6.7
Apport de production des technologies de l'information par type



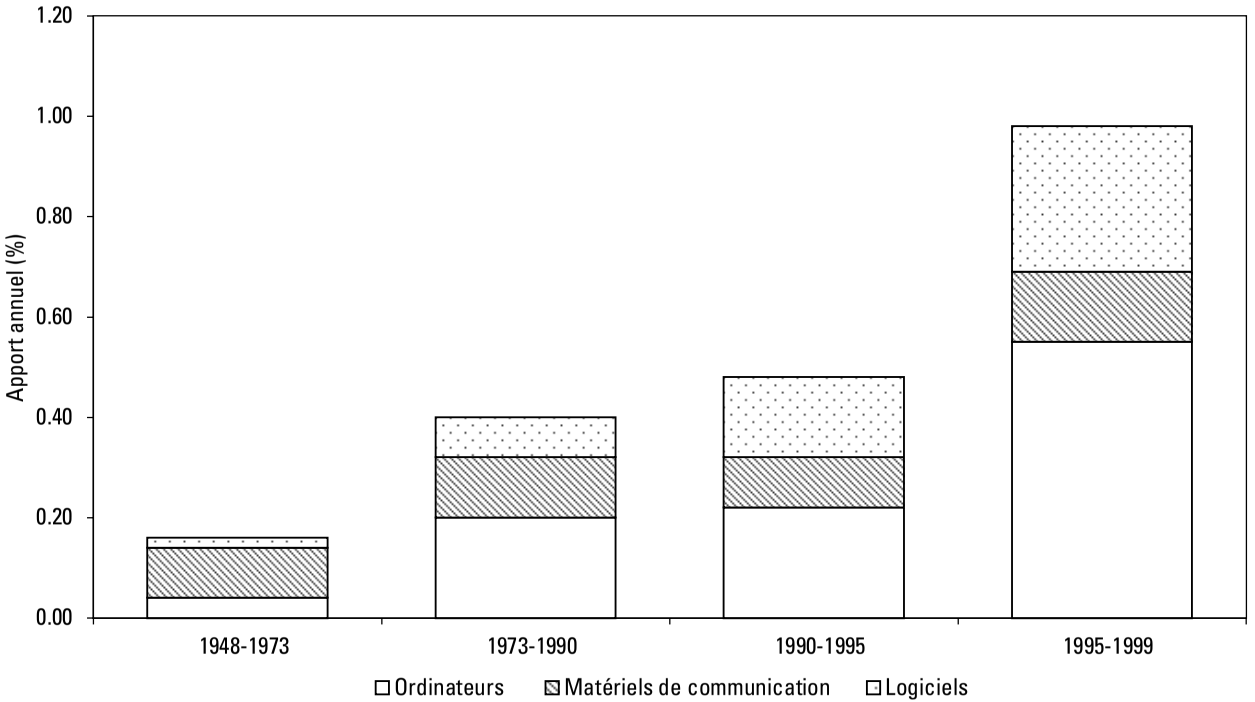
Note : Les apports de production représentent les taux de croissance annuels moyens, pondérés par la production.

FIGURE 6.8
Apport du facteur capital des technologies de l'information



Note : Les apports des facteurs capital représentent les taux de croissance annuels moyens, pondérés par les parts de revenus.

FIGURE 6.9
Apport du facteur capital des technologies de l'information par type



Note : Les apports des facteurs capital représentent les taux de croissance annuels moyens, pondérés par les parts de revenus.

4.5. Productivité globale des facteurs

Le prix ou l'approche « duale » de la mesure de la productivité permet de cerner le rôle de la production des TI en tant que source de la croissance de productivité au niveau industriel[26]. Le taux de croissance de la productivité est mesuré comme la baisse du prix des produits, plus une moyenne pondérée des taux de croissance des prix des facteurs de production, les parts de valeur des facteurs de production étant les coefficients de pondération. Pour l'industrie informatique, cette expression est dominée par deux conditions : la baisse du prix des ordinateurs et la part du prix des semi-conducteurs. Pour l'industrie des semi-conducteurs, l'expression est dominée par la baisse du prix des semi-conducteurs[27].

Jorgenson *et al.* (1987) ont utilisé le modèle de Domar (1961) pour retrouver l'origine de la croissance de la productivité globale au niveau des industries individuelles[28]. Plus récemment, Harberger (1998), Gullickson et Harper (1999), ainsi que Jorgenson et Stiroh (2000a, 2000b) ont utilisé le modèle à des fins similaires. La croissance de productivité pour chaque industrie est pondérée par le rapport de production brute de l'industrie au produit intérieur brut (PIB) pour estimer l'apport de l'industrie à la croissance de la productivité globale des facteurs.

TABLEAU 6.7
Sources de la croissance de la productivité moyenne du travail

	1948-1999	1948-1973	1973-1990	1990-1995	1995-1999
Produit intérieur brut	3,46	3,99	2,86	2,36	4,08
Heures travaillées	1,37	1,16	1,59	1,17	1,98
Productivité moyenne du travail	2,09	2,82	1,26	1,19	2,11
Apport de l'intensification du capital	1,13	1,45	0,79	0,64	1,24
Technologies de l'information	0,30	0,15	0,35	0,43	0,89
Hors technologies de l'information	0,83	1,30	0,44	0,21	0,35
Apport de la qualité du travail	0,34	0,46	0,22	0,32	0,12
Productivité globale des facteurs	0,61	0,92	0,25	0,24	0,75
Technologies de l'information	0,16	0,06	0,19	0,25	0,50
Hors technologies de l'information	0,45	0,86	0,06	–0,01	0,25
			Addendum		
Facteurs de production travail	1,95	1,95	1,97	1,70	2,18
Qualité du travail	0,58	0,79	0,38	0,53	0,20
Facteur capital	4,12	4,64	3,57	2,75	4,96
Stock de capital	3,37	4,21	2,74	1,82	2,73
Qualité du capital	0,75	0,43	0,83	0,93	2,23

Notes : Les taux de croissance sont donnés en pourcentage annuel moyen. Les apports sont définis dans l'équation (2).

26. L'approche duale est décrite par Jorgenson *et al.* (1987, p. 53-63).
27. Dulberger (1993), Triplett (1996) et Oliner et Sichel (2000) présentent des modèles des relations entre les industries informatiques et les industries des semi-conducteurs.
28. Voir Jorgenson *et al.* (1987, p. 63-66 et p. 301-322).

Si la production de semi-conducteurs était uniquement utilisée pour produire des ordinateurs, son apport à la croissance de la productivité de l'industrie informatique, pondérée par la production de l'industrie informatique, annulerait alors sa part indépendante dans la croissance de la productivité globale des facteurs. C'est le rapport de la valeur de la production de semi-conducteurs au PIB multiplié par le taux de la baisse du prix des semi-conducteurs. En fait, les semi-conducteurs sont utilisés pour produire des matériels de télécommunications et bien d'autres produits. Cependant, la valeur de la production de semi-conducteurs est dominée par des facteurs de production dans la production de TI.

La formule d'agrégation de Domar peut être approximée en exprimant les baisses des prix des ordinateurs, des matériels de communication et des logiciels relativement au prix du revenu intérieur brut, c'est-à-dire un cumul des prix des services du capital et du travail. Les taux de la baisse relative des prix des TI sont pondérés par les rapports des productions de produits informatiques au PIB. Le tableau 6.8 fournit des détails relativement

TABLEAU 6.8
Sources de la croissance de la productivité globale des facteurs

	1948-1999	1948-1973	1973-1990	1990-1995	1995-1999
Croissance de la productivité totale des facteurs	0,61	0,92	0,25	0,24	0,75
	Apports de la croissance de la TFP				
Technologies de l'information	0,16	0,06	0,19	0,25	0,50
Ordinateurs	0,09	0,02	0,12	0,15	0,32
Logiciels	0,02	0,00	0,02	0,05	0,09
Matériels de communication	0,05	0,03	0,06	0,05	0,08
Hors technologies de l'information	0,45	0,86	0,06	–0,01	0,25
	Changements des prix relatifs				
Technologies de l'information	–6,16	–4,3	–7,4	–7,2	–11,5
Ordinateurs	–23,01	–23,5	–21,1	–18,0	–34,5
Logiciels	–3,29	–3,0	–3,2	–3,9	–4,8
Matériels de communication	–3,71	–3,1	–4,2	–4,0	–5,3
Hors technologies de l'information	–0,41	–0,9	0,0	0,1	–0,1
	Parts de la valeur nominale moyenne				
Technologies de l'information	2,07	1,09	2,60	3,46	4,26
Ordinateurs	0,40	0,10	0,61	0,81	0,94
Logiciels	0,51	0,08	0,60	1,30	1,84
Matériels de communication	1,16	0,91	1,39	1,34	1,48
Hors technologies de l'information	97,20	98,46	96,55	95,35	94,35

Notes : Les taux de croissance sont donnés en pourcentage annuel moyen. Les prix sont relatifs au prix du revenu intérieur brut. Les apports représentent les changements de prix relatifs, pondérés par les parts produits de valeur nominale moyenne.

à cette ventilation de la productivité globale des facteurs pour les périodes 1990 à 1995 et 1995 à 1999 ; les contributions des TI et hors TI sont présentées dans la figure 6.10. Les produits informatiques contribuent pour un demi point de pourcentage à la croissance de la productivité globale des facteurs pour la période 1995-1999, comparé à un quart de point de pourcentage pour la période 1990-1995. Cela reflète la baisse de plus en plus rapide des changements de prix relatifs provenant de la réduction du cycle de production des semi-conducteurs.

4.6. Croissance de la production

Cette section présente les sources de croissance du PIB pour toute la période 1948-1999. Les services du capital contribuent pour 1,70 %, les services du travail pour 1,14 %, et la croissance de la productivité globale des facteurs pour seulement 0,61 %. La croissance des facteurs de production est la source de près de 82,3 % de la croissance américaine au cours du dernier demi-siècle, alors que la productivité globale des facteurs représente 17,7 %. La figure 6.11 montre la part relativement modeste de la productivité globale des facteurs au cours de toutes les sous-périodes.

Plus des trois quarts de la contribution du capital reflètent l'accumulation du stock de capital tandis que l'amélioration de la qualité du capital en représente environ un quart. De même, l'augmentation des heures de travail représente 80 % de la contribution du travail ; le reste provient des améliorations de la qualité du travail. Les substitutions entre facteurs de production du capital et facteurs de production du travail en réponse aux changements de prix sont des composantes essentielles des sources de la croissance économique.

L'observation de l'économie américaine avant et après 1973 fait apparaître des caractéristiques bien connues des faits historiques. Après une forte production et une croissance de la productivité globale des facteurs dans les années 1950, 1960 et au début des années 1970, l'économie américaine a ralenti nettement jusqu'en 1990, la croissance de la production chutant de 3,99 % à 2,86 % et la croissance de la productivité globale des facteurs déclinant de 0,92 % à 0,25 %. La croissance des facteurs de production du capital a également ralenti pour passer de 4,64 % au cours de la période 1948-1973 à 3,57 % au cours de la période 1973-1990. Cela a contribué à une stagnation de la croissance de la productivité moyenne du travail – qui était de 2,82 % au cours de la période 1948-1973 pour passer à 1,26 % au cours de la période 1973-1990.

Pour ce qui est du début des années 1990, la croissance de la production s'est accrue de 1,72 % au cours des années 1995-1999. L'apport de la production des TI a presque doublé au cours des années 1990-1995, mais représentait toujours seulement 28,9 % de la croissance accrue de la production. Bien que l'apport des TI se soit accru de façon régulière au cours de la

FIGURE 6.10

Apports des technologies de l'information à la croissance de la productivité globale des facteurs

Note : Les apports représentent les changements de prix relatifs annuels moyens, pondérés par les parts de production nominales moyennes du tableau 6.8.

période 1948-1999, il y a eu une réaction très forte à l'accélération de la baisse des prix informatiques en 1995. Néanmoins, plus de 70 % de la croissance plus élevée des produits peuvent être attribués aux produits hors TI.

Entre 1990 et 1995 et 1995 et 1999, la part des facteurs de production du capital s'est accrue de 0,95 %, l'apport des facteurs de production du travail n'a progressé que de 0,24 %, et la productivité globale des facteurs a augmenté de 0,51 %. La croissance de la productivité moyenne du travail s'est accrue de 0,92 % parce qu'une intensification plus rapide du capital et une croissance de la productivité globale des facteurs compensent une amélioration plus lente de la qualité du travail. La croissance des heures travaillées s'est accrue avec la baisse du chômage qui a connu un niveau inégalé depuis 30 ans. Les marchés du travail se sont rétrécis de façon considérable, alors que les taux de participation de la force de travail augmentaient[29].

L'apport des facteurs de production du capital reflète la forte hausse de l'investissement de la fin des années 1990, les entreprises, les ménages et les gouvernements ayant investi énormément d'argent dans les bâtiments et les matériels, et particulièrement dans les ordinateurs, les logiciels et les matériels de communication. L'apport du capital, essentiellement dans les TI, est beaucoup plus important que l'apport du travail. L'apport des services du capital des TI s'est accru de façon régulière au cours de la période 1948-1999, mais la figure 6.9 reflète l'impact du déclin de plus en plus rapide des prix des TI.

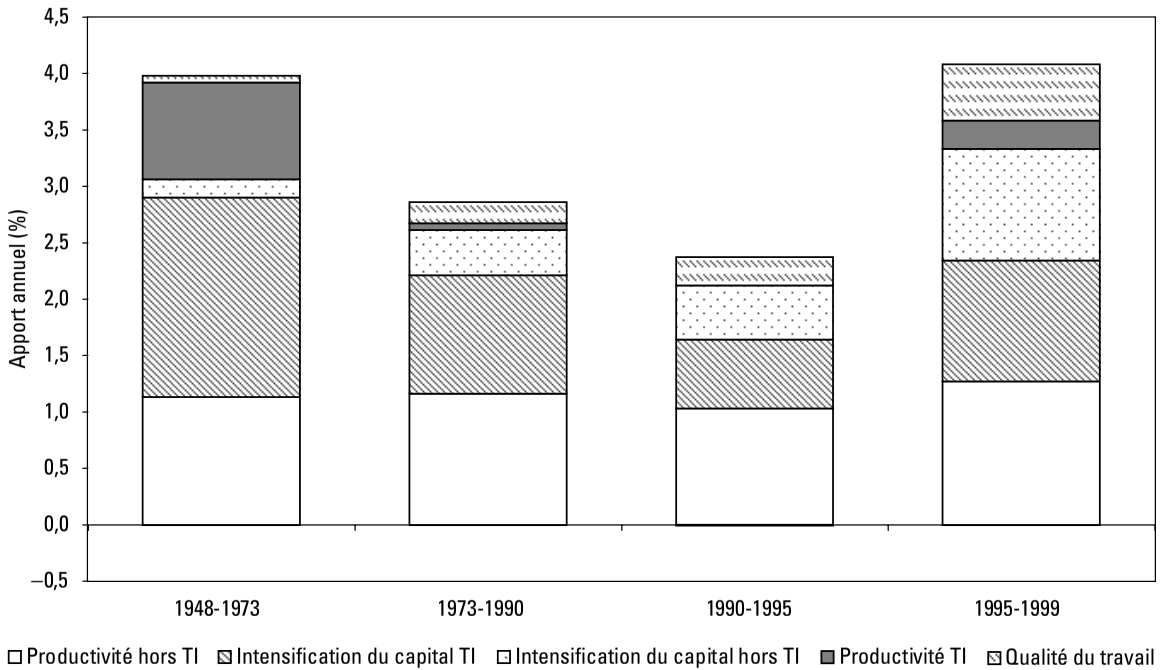
Après avoir conservé un taux moyen de 0,25 % pour la période 1973-1990, la croissance de productivité globale des facteurs est tombée à 0,24 % au cours de la période 1990-1995, pour regrimper à 0,75 % au cours de la période de 1995-1999. Cela est une source majeure de croissance de la production et de la productivité moyenne du travail pour l'économie américaine (figures 6.11 et 6.12). Alors que la croissance de la productivité globale des facteurs pour la période 1995-1996 est plus basse que le taux de la période 1948-1973, l'économie américaine est en train de se relever de la croissance de productivité très faible des deux dernières décennies. Bien que seulement la moitié de l'accroissement de la productivité globale des facteurs entre les périodes 1990-1995 et 1995-1999 puisse être attribuée à la production des TI, cela est bien plus important que la part de 4,26 % de TI dans le PIB.

4.7. Productivité globale du travail

La croissance de la production est la somme de l'augmentation des heures et de la productivité moyenne du travail. Le tableau 6.7 indique la ventilation entre augmentation des heures et productivité moyenne du travail pour les mêmes périodes que celles données dans le tableau 6.6. Pour la période 1948-1999, l'augmentation de la productivité moyenne du travail prédominait

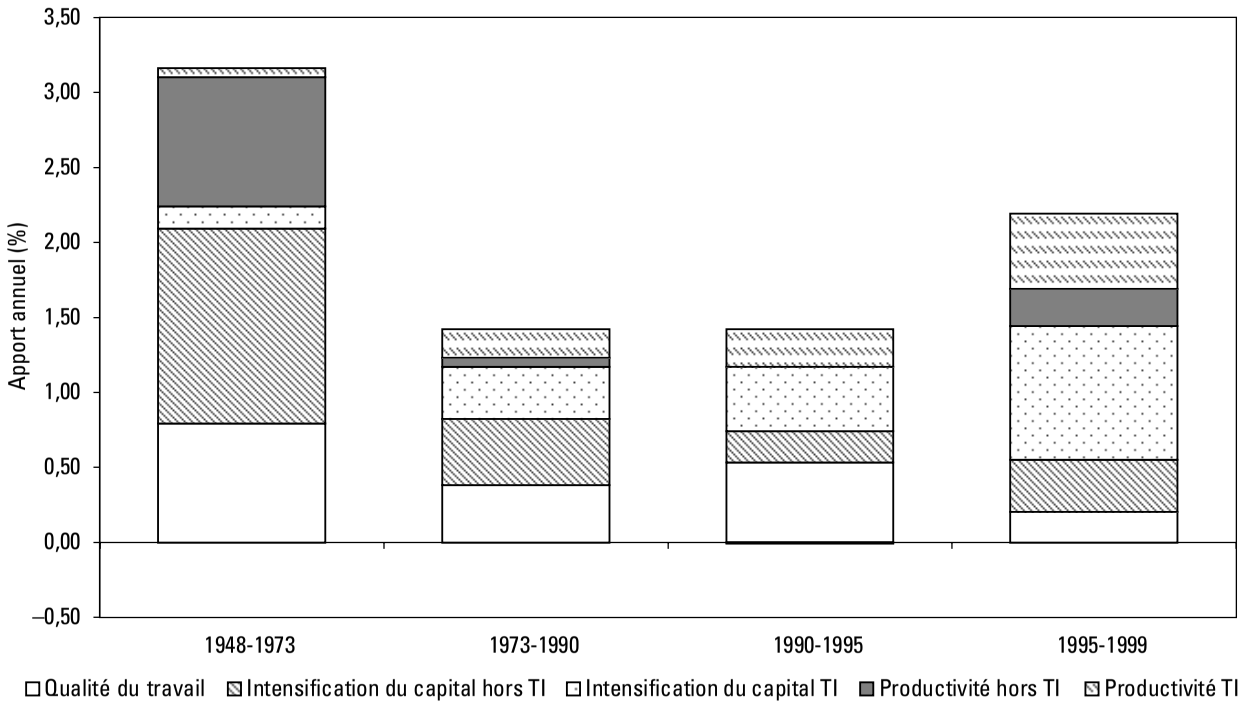
29. Katz et Krueger (1999) analysent la performance récente du marché du travail américain.

FIGURE 6.11
Sources de la croissance du produit intérieur brut



Note : Les apports de facteur de production représentent les taux de croissance annuels moyens, pondérés par les parts de revenus nominales moyennes du tableau 6.6. Les apports de productivité proviennent du tableau 6.8.

FIGURE 6.12
Sources de la croissance de la productivité moyenne du travail



Note : Les apports proviennent du tableau 6.7.

dans la croissance de la production, s'accroissant d'un peu plus de 2 % par an pour la période 1948-1999, alors que l'augmentation des heures était d'environ 1,4 % par an. Ainsi qu'indiqué dans l'équation (3), la croissance de la productivité moyenne du travail dépend de l'intensification du capital, de l'effet qualité du travail et de la croissance de la productivité globale des facteurs.

La figure 6.12 illustre le ralentissement bien connu de la productivité des années 1970 et 1980, mettant l'accent sur l'accélération de la croissance de la productivité du travail à la fin des années 1990. Le ralentissement ressenti jusqu'en 1990 reflète l'intensification réduite du capital, la baisse de la croissance de la qualité du travail et la croissance ralentie de la productivité globale des facteurs. La croissance de la productivité moyenne du travail a baissé encore davantage au début des années 1990 avec une forte baisse de l'intensification du capital, compensée en partie par une reprise de la croissance de la qualité du travail et une petite hausse de la croissance de la productivité globale des facteurs. Une baisse des heures s'est associée à une croissance ralentie de la productivité moyenne du travail au cours de la période 1990-1995 pour provoquer une baisse supplémentaire de la croissance de la production. Lors de reprises cycliques précédentes de la période d'après-guerre, la croissance de la production s'est accélérée au cours de la reprise, entraînée par une augmentation plus rapide des heures et de la productivité moyenne du travail.

L'augmentation croissante de la production au cours de la période 1995-1999 reflète de façon presque parfaite une hausse des heures de travail et de la productivité moyenne du travail[30]. En comparant les périodes 1990-1995 et 1995-1999, le taux de croissance des produits s'est accru de 1,72 % – du fait d'un accroissement des heures travaillées de 0,81 % et d'une autre augmentation de la croissance de la productivité moyenne du travail de 0,92 %. La figure 6.12 montre que l'accélération de la croissance de la productivité moyenne du travail est due à l'intensification du capital ainsi qu'à une augmentation plus rapide de la productivité globale des facteurs. L'intensification du capital a contribué à hauteur de 0,60 %, compensant ainsi un apport négatif de qualité du travail de 0,20 %. L'accélération de la productivité globale des facteurs a apporté 0,51 %.

4.8. Opportunités de recherche

L'utilisation d'ordinateurs, de logiciels et de matériels de communication doit être soigneusement distinguée de la production des TI[31]. Des augmentations massives de la puissance de calcul, comme celles expérimentées par l'économie américaine, produisent deux effets sur la croissance. Tout d'abord, alors que les producteurs de TI deviennent plus efficaces, davantage de matériels

30. Stiroh (2000) montre que la croissance de la productivité moyenne du travail est concentrée dans les industries produisant et utilisant des TI.

31. The Economics and Statistics Administration (2000).

informatiques et de logiciels sont produits à partir des mêmes facteurs de production, ce qui accroît la productivité des industries produisant des TI et contribue à la croissance de la productivité globale des facteurs pour l'économie dans son ensemble. La productivité du travail s'accroît également tant au niveau de l'industrie qu'au niveau global.

Ensuite, l'investissement dans les technologies de l'information accroît la capacité de production des industries utilisant les TI. Depuis que les personnels travaillent avec davantage et de meilleurs matériels, cela accroît la productivité moyenne du travail par le biais de l'intensification du capital. Si les apports faits à la production globale sont absorbés par l'intensification du capital, la croissance de la productivité globale des facteurs s'en trouve inchangée[32]. Toutefois, le développement accru des TI affecte la croissance de la productivité globale des facteurs uniquement si des excédents en provenance des industries produisant les TI sont dirigés vers les industries utilisant des TI.

Premièrement, il faut établir l'impact de l'investissement dans les TI au niveau industriel. Stiroh (1998) a tout d'abord montré que cet impact concerne surtout un petit nombre d'industries utilisant les TI, puis, en 2000, il a soutenu que la croissance cumulée de la productivité moyenne du travail peut être attribuée à la croissance de la productivité dans les industries produisant les TI et dans celles utilisant les TI. Deuxièmement, il s'agit de remonter l'augmentation de la croissance de la productivité globale des facteurs à sa source dans les industries individuelles. Jorgenson et Stiroh (2000a, 2000b) présentent une méthodologie et des résultats préliminaires.

5. L'économie à l'ère de l'Internet

L'augmentation régulière de l'importance des TI a créé de nouvelles opportunités de recherche dans tous les secteurs de l'économie. Les historiens économiques, avec en tête Chandler (2000) et David (2000)[33], ont placé l'ère de l'informatique dans le contexte historique. Le paradoxe de Solow (1987), suivant lequel nous trouvons des ordinateurs partout sauf dans les statistiques de productivité[34], représente un point de départ. Puisque les ordinateurs ont maintenant laissé une empreinte indélébile sur les statistiques de productivité, il reste à savoir si la rapidité ahurissante du changement technologique dans le domaine des semi-conducteurs différencie cette renaissance des périodes antérieures de croissance rapide ?

Les marchés du capital et du travail ont été gravement marqués par les technologies de l'information. Une incertitude énorme plane sur la relation entre valeurs des capitaux propres et perspectives de croissance future

32. Baily et Gordon (1988).
33. Voir également David (1990) et Gordon (2000).
34. Griliches (1994), Brynjolfsson et Yang (1996) ainsi que Triplett traitent du paradoxe Solow.

de l'économie américaine[35]. Certains attribuent la valeur croissante des capitaux propres, depuis que l'accélération de la croissance a commencé en 1995, à l'accumulation des éléments d'actif incorporels, tels que la propriété intellectuelle et le capital organisationnel. D'autres associent les valeurs élevées des actions technologiques à une bulle qui a éclaté au cours de l'année 2000.

Le comportement des marchés du travail pose également des énigmes majeures. Les écarts de salaire de plus en plus importants entre les travailleurs selon qu'ils possèdent une formation plus ou moins poussée sont attribués à l'informatisation sur le lieu de travail. Une explication possible pourrait être que les travailleurs hautement qualifiés sont complémentaires aux TI, alors que les travailleurs peu qualifiés peuvent être remplacés. Une autre explication est que les changements techniques associés aux TI sont influencés par les compétences et, de ce fait, contribuent à accroître les salaires des travailleurs hautement qualifiés par rapport à ceux des travailleurs peu qualifiés[36].

Enfin, les technologies de l'information affectent les marchés de produits et les organisations professionnelles, comme en atteste le nombre important et toujours croissant d'ouvrages spécialisés[37], mais il reste à élaborer[38] un modèle totalement satisfaisant de l'industrie des semi-conducteurs. Un tel modèle induirait la demande en semi-conducteurs des investissements en technologies de l'information, en réaction aux prix en chute rapide des TI. Il s'agirait essentiellement de définir le cycle du produit pour des générations successives de nouveaux semi-conducteurs de façon endogène.

L'industrie des semi-conducteurs et les industries des technologies de l'information sont d'envergure mondiale, avec une distribution internationale du travail sophistiquée[39] ; ce qui soulève d'importantes questions sur la renaissance de la croissance américaine. Où se trouve la preuve d'une nouvelle économie dans les autres principaux pays industrialisés ? Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'absence d'indices de prix à qualité constante pour les semi-conducteurs et les technologies de l'information dans les systèmes comptables nationaux en dehors des États-Unis[40]. Une autre énigme est que plusieurs participants importants des TI – la Corée, la Malaisie, Singapour et Taiwan – sont des économies « nouvellement industrialisées ». Que cela laisse-t-il présager pour des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde ?

---

35. Campbell et Shiller (1998) et Shiller (2000) abordent les valeurs des capitaux propres et les perspectives de croissance. Kiley (1999), Brynjolfsson et Hitt (2000) ainsi que Hall (2000) présentent des modèles d'investissement avec des coûts d'ajustement internes.
36. Acemoglu (2000) et Katz (2000) étudient les travaux publiés sur les marchés du travail et les changements technologiques.
37. Voir, par exemple, Grove (1996) concernant le marché des ordinateurs et des semi-conducteurs, et Christensen (1997) concernant le marché des dispositifs à mémoire.
38. Irwin et Klenow (1994), Flamm (1996, p. 305-424) et Helpman et Trajtenberg (1998, p. 111-119) présentent des modèles de l'industrie des semi-conducteurs.
39. Le rôle des technologies de l'information dans la croissance économique américaine est traité par The Economics and Statistics Administration (2000) ; les comparaisons des pays de l'OCDE (2000) sont également fournies.
40. Les disparités entre les États-Unis et les autres pays de l'OCDE ont été établies par Wykoff (1995). Schreyer (2000) a fait les premiers pas pour combler cet intervalle.

Comme les décideurs tentent de remplir les fossés de plus en plus grands entre les informations requises pour une politique bien élaborée et les données disponibles, la division traditionnelle du travail entre agences de statistiques et les organes dirigeants est en train de se rompre. Entre-temps, les décideurs monétaires doivent fixer des politiques sans aucune mesure certaine de changements de prix. De même, les décideurs fiscaux se trouvent face à des révisions permanentes des prévisions de croissance qui affectent de façon radicale les perspectives d'avenir en matière d'impôts sur le revenu et de dépenses gouvernementales.

La stagflation des années 1970 a fortement ébranlé la révolution keynésienne, conduisant à une contre-révolution néoclassique menée par Lucas (1981), qui a transformé la macroéconomie. La renaissance inattendue de la croissance américaine des années 1990 possède un potentiel lui permettant également de modifier les perspectives de recherches économiques. En fait, cela laisse déjà présager tout un flux d'excellents livres sur l'économie des technologies de l'information[41]. Nous sommes, par conséquent, les heureux bénéficiaires d'un nouvel ordre du jour en matière de recherche économique, qui pourrait stimuler notre réflexion et revitaliser notre discipline.

Références bibliographiques

ACEMOGLU, D. 2000. *Technical Change, Inequality, and the Labor Market*. Department of Economics. Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, July.

BAILY, M.N., et GORDON, R.J. 1988. The productivity slowdown, measurement issues, and the explosion of computer power. *Brookings Papers on Economic Activity* 2 : 347-420.

BERNDT, E.R. 1991. *The Practice of Econometrics : Classic and Contemporary*. Reading, MA : Addison-Wesley.

BOSWORTH, B.P., et TRIPLETT, J.E. 2000. *What's New About the New Economy ? IT, Growth and Productivity*. Washington, DC : The Brookings Institution.

BRYNJOLFSSON, E., et HITT, L.M. 2000. Beyond computation : Information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives* 4 : 23-48.

BRYNJOLFSSON, E., et KAHIN, B. 2000. *Understanding the Digital Economy*. Cambridge, MA : The MIT Press.

BRYNLOLFSSON, E., et YANG, S. 1996. Information technology and productivity : A review of the literature. *Advances in Computers* 43 : 179-214.

BUREAU OF LABOR STATISTICS. 1983. *Trends in Multifactor Productivity 1948-1981*. Washington, DC : U.S. Government Printing Office.

CAMPBELL, J.Y., et SHILLER, R.J. 1998. Valuation ratios and the long-run stock market outlook. *Journal of Portfolio Management* 24 : 11-26.

41. Voir par exemple Shapiro et Varian (1999), Brynjolfsson et Kahin (2000), et Choi et Whinston (2000).

CHANDLER, A.D., Jr. 2000. The information age in historical perspective. Dans *A Nation Transformed by Information : How Information Has Shaped the United States from Colonial Times to the Present*, Chandler, A.D, Cortada, J.W. (dir.). New York : Oxford University Press, 3-38.

CHOI, S.-Y., et WHINSTON, A.B. 2000. *The Internet Economy : Technology and Practice*. Austin, TX : SmartEcon Publishing.

CHOW, G.C. 1967. Technological change and the demand for computers. *American Economic Review* 57 : 117-130.

CHRISTENSEN, C.M. 1997. *The Innovator's Dilemma*. Boston, MA : Harvard Business School Press.

COLE, R., CHEN, Y.C., BARQUIN-STOLLEMAN, J.A., DULBERGER, E.R., HELVACIAN, N., et HODGE, J.H. 1986. Quality-adjusted price index for computer processors and selected peripheral equipment. *Survey of Current Business* 66 : 41-50.

CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE. 2000. *The Budget and Economic Outlook : An Update*. Washington, DC : U.S. Government Printing Office, July.

COUNCIL OF ECONOMIC ADVISERS. 2000. *Annual Report*. Washington, DC : U.S. Government Printing Office, February.

DAVID, P.A. 1990. The dynamo and the computer : An historical perspective on the productivity paradox. *American Economic Review* 80 : 355-361.

DAVID, P.A. 2000. Understanding digital technology's evolution and the path of measured productivity growth : Present and future in the mirror of the past. Dans *Understanding the Digital Economy*, Brynjolfsson, E. et Kahin, B. (dir.), 49-98.

DENISON, E.F. 1957. Theoretical aspects of quality change, capital consumption, and net capital formation. Dans *Problems of Capital Formation*, Conference on Research in Income and Wealth. Princeton, NJ : Princeton University Press, 215-261.

DENISON, E.F. 1989. *Estimates of Productivity Change by Industry*. Washington, DC : Brookings Institution Press.

DENISON, E.F. 1993. Robert J. Gordon's Concept of Capital. *Review of Income and Wealth* 39 : 89-102.

DIEWERT, W.E. 1976. Exact and superlative index numbers. *Journal of Econometrics* 4 : 115-146.

DIEWERT, W.E., et LAWRENCE, D.A. 2000. Progress in measuring the price and quantity of capital. Dans *Econometrics and the Cost of Capital*, Lau, J.L. (dir.), 273-326.

DOMAR, E. 1961. On the measurement of technological change. *Economic Journal* 71 : 709-729.

DULBERGER, E.R. 1989. The application of a Hedonic Model to a quality-adjusted price index for computer processors. Dans *Technology and Capital Formation*, D.W. Jorgenson, D.W., Landau, R. (dir.), 37-76.

DULBERGER, E.R. 1993. Sources of decline in computer processors : Selected electronic components. Dans *Price Measurements and Their Uses*, Foss, M.F., Manser, M.E., Young, A.H. (dir.). Chicago, IL : University of Chicago Press, 103-124.

ECONOMICS AND STATISTICS ADMINISTRATION. 2000. *Digital Economy : 2000*. Washington, DC : U.S. Department of Commerce.

FISHER, I. 1922. *The Making of Index Numbers*. Boston, MA : Houghton-Mifflin.

FLAMM, K. 1989. Technological advance and costs : Computers versus communications. Dans *Changing the Rules : Technological Change, International Competition, and Regulation in Communications,* Crandall, R.C., Flamm, K. (dir.). Washington, DC : Brookings Institution Press, 13-61.

FLAMM, K. 1996. *Mismanaged Trade? Strategic Policy and the Semiconductor Industry*. Washington, DC : Brookings Institution Press.

FRAUMENI, B.M. 1997. The measurement of depreciation in the U.S. National Income and Product Accounts. *Survey of Current Business* 77 : 7-23.

GOLLOP, F.M. 2000. The cost of capital and the measurement of productivity. Dans *Econometrics and the Cost of Capital*, Lau, L.J. (dir.), 85-110.

GORDON, R.J. 1989. The postwar evolution of computer prices. Dans *Technology and Capital Formation*, Jorgenson, D.W., Landau, R. (dir.), 77-126.

GORDON, R.J. 1990. *The Measurement of Durable Goods Prices*. Chicago, IL : University of Chicago Press.

GORDON, R.J. 1998. Foundations of the goldilocks economy : Supply shocks and the time-varying NAIRU. *Brookings Papers on Economic Activity* 2 : 297-333.

GORDON, R.J. 2000. Does the « New Economy » measure up to the great inventions of the past. *Journal of Economic Perspectives* 14 : 49-74.

GREENSPAN, A. 2000. *Challenges for Monetary Policy-Makers*. Washington, DC : Board of Governors of the Federal Reserve System, 19 octobre.

GREENWOOD, J., HERCOWITZ, Z., et KRUSELL, P. 1997. Long-run implications of investment-specific technological change. *American Economic Review* 87 : 342-362.

GREENWOOD, J., HERCOWITZ, Z., et KRUSELL, P. 2000. The role of investment-specific technological change in the business cycle. *European Economic Review* 44 : 91-115.

GRILICHES, Z. 1994. Productivity, R&D, and the data constraint. *American Economic Review* 94 : 1-23.

GRIMM, B.T. 1997. *Quality Adjusted Price Indexes for Digital Telephone Switches*. Washington, DC : Bureau of Economic Analysis, 20 mai.

GRIMM, B.T. 1998. Price indexes for selected semiconductors : 1974-96. *Survey of Current Business* 78 : 8-24.

GROVE, A.S. 1996. *Only the Paranoid Survive : How to Exploit the Crisis Points that Challenge Every Company*. New York : Doubleday.

GULLICKSON, W., et HARPER, M.J. 1999. Possible measurement bias in aggregate productivity growth. *Monthly Labor Review* 122 : 47-67.

HALL, R. 2000. e-Capital : The link between the stock market and the labor market in the 1990's. *Brookings Papers on Economic Activity* 2, 73-118.

HARBERGER, A. 1998. A vision of the growth process. *American Economic Review* 88 : 1-32.

HAYASHI, F. 2000. The cost of capital, Q, and the theory of investment demand. Dans *Econometrics and the Cost of Capital*, Lau, L.J. (dir.), 55-84.

HECHT, J. 1999. *City of Light*. New York : Oxford University Press.

HELPMAN, E., et TRAJTENBERG, M. 1998. Diffusion of general purpose technologies. Dans *General Purpose Technologies and Economic Growth*, Helpman, E. (dir.). Cambridge, MA : The MIT Press, 85- 120.

HERCOWITZ, Z. 1998. The "embodiment" controversy : A review essay. *Journal of Monetary Economics* 41 : 217-224.

HERMAN, S.W. 2000. Fixed assets and consumer durable goods for 1925-99. *Survey of Current Business* 80 : 19-30.

HO, M.S., et JORGENSON, D.W. 2000. *The Quality of the U.S. Workforce, 1948-99.* Cambridge, MA : Department of Economics, Harvard University.

HULTEN, C.R. 2001. Total factor productivity : A short biography. Dans *New Developments in Productivitv Analvsis*, Hulten, C.R., Dean, E.R., Harper, M.J. (dir.). Chicago, IL : University of Chicago Press.

INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS. 2000. *2000 Update.* Austin, TX : Sematech Corporation, décembre.

IRWIN, D.A., et KLENOW, P.J. 1994. Learning-by-doing spillovers in the semiconductor industry. *Journal of Political Economy* 102 : 1200-1227.

JORGENSON, D.W. 1996. *Postwar U.S. Economic Growth.* Cambridge, MA : The MIT Press.

JORGENSON, D.W. 1997. *Capital Theory and Investment Behavior.* Cambridge, MA : The MIT Press.

JORGENSON, D.W. 2000. *The Econometrics and Producer Behavior.* Cambridge, MA : The MIT Press.

JORGENSON, D.W., GOLLOP, M., et FRAUMENI, B.M. 1987. *Productivity and U.S. Economic Growth.* Cambridge, MA : Harvard University Press.

JORGENSON, D.W., et GRILICHES, Z. 1996. The explanation of productivity change. Dans Jorgenson (1996), 51-98.

JORGENSON, D.W, HO, M.S., et STIROH, K.J. 2003. Growth of US industries and investments in information technology and higher education. *Economic Systems Research* 15 : 279-325.

JORGENSON, D.W., et LANDAU, R. (dir.). 1989. *Technology and Capital Formation.* Cambridge, MA : The MIT Press.

JORGENSON, D.W., et STIROH, K.J. 1995. Computers and growth. *Economics of Innovation and New Technology* 3 : 295-316.

JORGENSON, D.W., et STIROH, K.J. 1999. Information technology and growth. *American Economic Review* 89 : 109-115.

JORGENSON, D.W., et STIROH, K.J. 2000a. Raising the speed limit : U.S. economic growth in the information age. *Brookings Papers on Economic Activity* l : 125-211.

JORGENSON, D.W., et STIROH, K.J. 2000b. U.S. economic growth and the industry level. *American Economic Review* 90 : 161-167.

JORGENSON, D.W., et YUN, K.-Y. 1991. *Tax Reform and the Cost of Capital.* New York : Oxford University Press.

JORGENSON, D.W., et YUN, K.-Y. 2001. *Lifting the Burden : Tax Reform, the Cost of Capital, and U.S. Economic Growth.* Cambridge, MA : The MIT Press.

KATZ, L.F. 2000. Technological change, computerization, and the wage structure. Dans *Understanding the Digital Economy*, Brynjolfsson, E., Kahin, B. (dir.), 217-244.

KATZ, L.F., et KRUEGER, A. 1999. The high-pressure U.S. market of the 1990's. *Brookings Papers on Economic Activity* 1 : 1-87.

KILEY, M.T. 1999. *Computers and Growth with Costs of Adjustment : Will the Future Look Like the Past ?* Washington, DC : Board of Governors of the Federal Reserve System, juillet.

KONUS, A.A., et BYUSHGENS, S.S. 1926. On the problem of the purchasing power of money. *Economic Bulletin of the Conjuncture Institute,* Supplement, 151-172.

LANDEFELD, J.S, et PARKER, R.P. 1997. BEA's Chain Indexes, time series, and measures of long-term growth. *Survey of Current Business* 77 : 58-68.

LAU, Lawrence J. (dir.). 2000. *Econometrics and the Cost of Capital.* Cambridge, MA : The MIT Press.

LUCAS, R.E., Jr. 1967. Adjustment costs and the theory of supply. *Journal of Political Economy* 75 : 321-34.

LUCAS, R.E., Jr. 1981. *Studies in Business-Cycle Theory.* Cambridge, MA : The MIT Press.

MOORE, G.E. 1965. Cramming more components onto integrated circuits. *Electonics* 38 : 114-117

MOORE, G.E. 1996. Intel – Memories and the microprocessor. *Daedalus* 125 : 55-80.

MOORE, G.E. 1997. *An Update on Moore's Law.* Santa Clara, CA : Intel Corporation, 30 septembre.

MOULTON, B.R. 2000. Improved estimates of the National Income and Product Accounts for 1929-99 : Results of the comprehensive revision. *Survey of Current Business* 80 : 11-17, 36-145.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). 2000. *A New Economy ?* Paris, France : Organisation for Economic Co-operation and Development.

OLINER, S.D., et SICHEL, D.E. 1994. Computers and output growth revisited : How big is the puzzle ? *Brookings Papers on Economic Activity* 2 : 273-317.

OLINER, S.D., et SICHEL, D.E. 2000. The resurgence of growth in information technology the story ? *Journal of Economic Perspectives* 14 : 3-22.

PARKER, R.P., et GRIMM, B.T. 2000. *Recognition of Business Government Expenditures on Software as Investment : Methodology and Quantitative Impacts, 1959-98.* Washington, DC : Bureau of Economic Analysis, 14 novembre.

PETZOLD, C. 2000. *Code : The Hidden Language of Computer Hardware and Software.* Redmond, WA : Microsoft Press.

RASHAD, R. 2000. *The Future – It Isn't What It Used to Be.* Seattle, WA : Microsoft Research, 3 mai.

RUTTAN, V.W. 2001. *The Computer and Semiconductor Industries, Technology, Growth, and Development.* New York : Oxford University Press, 316-367.

SCHREYER, P. 2000. *The Contribution of Information and Communication Technology to Output Growth : A Study of the G7 Countries.* Paris, France : OECD, 23 mai.

SHAPIRO, C., et VARIAN, H.R. 1999. *Information Rules.* Boston, MA : Harvard Business School Press.

SHILLER, R. 2000. *Irrational Exuberance*. Princeton, NJ : Princeton University Press

SOLOW, R.M. 1957. Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics* 39 : 312-320.

SOLOW, R.M. 1960. Investment and technical progress. Dans *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Arrow, K.J., Karlin, S., Suppes, P. (dir.). Stanford, CA : Stanford University Press, 89-104.

SOLOW, R.M. 1987. We'd better watch out. *New York Review of Books*, 12 juillet.

STIROH, K.J. 1998. Computers, productivity, and input substitution. *Economic Inquiry* 36 : 175-191

STIROH, K.J. 2000. *Information Technology and the U.S. Productivity Revival : What Does the Industry Data Say ?* New York, NY : Federal Reserve Bank of New York, décembre.

TOBIN, J. 1969. A general equilibrium approach to monetary theory. *Journal of Money, Credit and Banking* 1 : 15-29.

TRIPLETT, J.E. 1986. The economic interpretation of Hedonic methods. *Survey of Current Business* 66 : 36-40.

TRIPLETT, J.E. 1989. Price and technological change in a capital good : Survey of research on computers. Dans Jorgenson et Landau (1989), 127-213.

TRIPLETT, J.E. 1996. High-tech industry productivity and hedonic price indices. Dans *Industry Productivity*. Paris, France : OECD, 119-142.

TRIPLETT, J.E. 1999. The Solow productivity paradox : What do computers do to productivity ? *Canadian Journal of Economics* 32 : 309-334.

WHELAN, K. 1999. *Computers, Obsolescence, and Productivity*. Washington, DC : Board of Governors of the Federal Reserve System, septembre.

WOLFE, T. 2000. Two men who went west. *Hooking UP*. New York : Farrar, Straus, and Giroux, 17-65.

WYKOFF, A.W. 1995. The impact of computer prices on international comparisons of productivity. *Economics of Innovation and New Technology* 3 : 277-293.

YOUNG, A. 1989. BEA's measurement of computer output. *Survey of Current Business* 69 : 108-115.

CHAPITRE 7

RÉESTIMATION DE LA MATRICE DES FLUX TECHNOLOGIQUES INTERINDUSTRIELS†

FREDERIC M. SCHERER
John F. Kennedy School of Government
Harvard University

† Une version détaillée de cette communication présentée le lundi 14 octobre 2002 à Montréal est publiée en anglais dans Scherer (2003).

Résumé

Dans ce chapitre, l'auteur fait un retour sur une étude complétée au début de 1980 sur une matrice entrées-sorties très ventilée des flux technologiques d'industries américaines ayant effectué de la recherche et développement (R-D) vers des industries susceptibles d'utiliser les résultats de ces activités de R-D. Dans la présente étude, l'auteur vérifie si la matrice désirée des flux technologiques aurait pu être obtenue à l'aide d'informations rendues publiques, ou au moyen de renseignements qui auraient pu être recueillis en marge d'enquêtes existantes, sans pour autant entraîner un coûteux effort en main-d'œuvre dans l'élaboration de microdonnées permettant d'extraire des renseignements d'un vaste échantillon de brevets d'inventions individuels. Cet exercice est réalisé en examinant trois problématiques conceptuelles importantes, à savoir 1) le choix de la matrice à utiliser, 2) la diagonale et 3) les biens d'équipement. Les résultats démontrent qu'il est tout à fait possible d'élaborer des matrices de flux technologiques utiles en se fondant sur des approches moins intensives en main-d'œuvre que celles employées dans l'effort de recherche original. L'auteur souligne toutefois que cela ne peut être accompli sans l'instauration d'une méthode systématique permettant de structurer la collecte des données requises.

1. Introduction

Au début des années 1980, dans le cadre d'un projet financé par la Fondation nationale des sciences (NSF : U.S. National Science Foundation), j'ai estimé une matrice très ventilée des flux technologiques d'industries américaines ayant effectué de la recherche et développement (R-D) vers des industries susceptibles d'utiliser les résultats de ces activités de R-D. Les résultats de ces travaux de recherche, qui ont été élargis afin d'analyser comment les flux technologiques avaient agi sur la croissance de la productivité dans les années 1960 et 1970, sont détaillés dans Scherer (1982a, 1982b, 1984). Dans la présente étude, je retourne sur le lieu du crime 20 ans plus tard, pour vérifier si la matrice désirée des flux technologiques aurait pu être obtenue à l'aide d'informations rendues publiques, ou au moyen de renseignements qui auraient pu être recueillis en marge d'enquêtes existantes, sans pour autant entraîner un coûteux effort d'élaboration de microdonnées permettant d'extraire des renseignements d'un vaste échantillon de brevets d'inventions individuels.

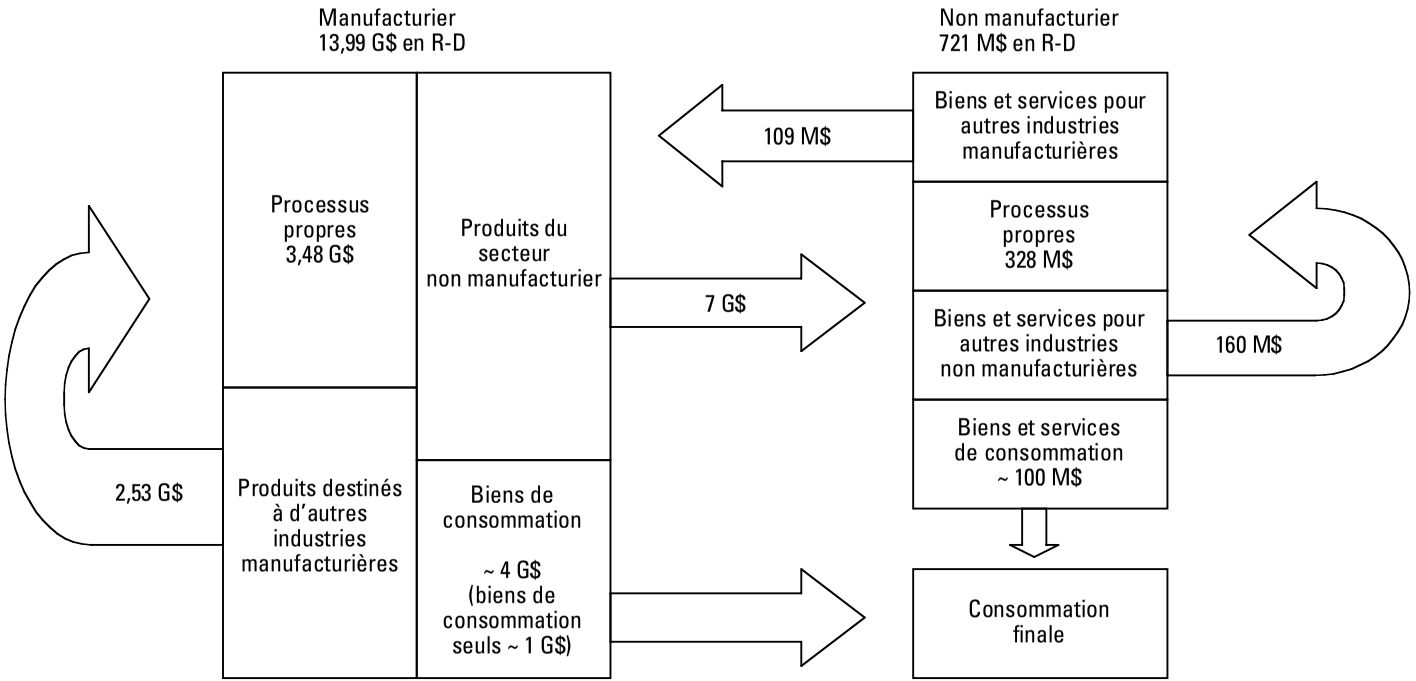
2. Importance du problème

La figure 7.1 présente un schéma global de la matrice des flux technologiques qui en résulte. En 1974, aux États-Unis, 95 % des activités de R-D financées par les sociétés étaient effectuées dans les industries non manufacturières (depuis, la contribution des industries non manufacturières, et plus particulièrement celles de l'informatique et de la biotechnologie, qui relèvent de la catégorie des services, a progressé de plus de 38 %). Grosso modo, en 1974, la moitié de la technologie créée par le secteur manufacturier a été transmise au secteur non manufacturier, stimulant, dans une certaine mesure, la croissance de la productivité de ces secteurs. Seuls 7 % des activités de R-D menées visaient uniquement à améliorer ou à concevoir de nouveaux produits de consommation.

3. Le premier effort d'évaluation des flux technologiques

Persuadé, à tort ou à raison, que les méthodes de mesure alors en vigueur exigeaient que l'on analyse des industries *utilisant* des produits novateurs pour évaluer l'incidence de la R-D sur la croissance de la productivité, je me suis lancé, à la fin des années 1970, dans un projet visant à suivre les flux technologiques intégrés, de l'industrie d'origine jusqu'à l'industrie d'utilisation. Le livre précurseur de Schmookler (1966) formulait la base conceptuelle de cet objectif. Terleckyj (1974) avait estimé antérieurement une matrice des flux technologiques sur une petite échelle et s'en était servi pour évaluer la contribution des activités de R-D dans la croissance de la productivité.

FIGURE 7.1
Flux technologiques industriels de l'économie des États-Unis : 1974



L'événement qui a précipité le tout a été la publication, alors imminente, par la Commission fédérale du commerce des États-Unis (FTC, 1981), de données sur les dépenses en matière de R-D pour 1974, ventilées (en 263 secteurs) et révélant un degré de chevauchement interindustriel nettement inférieur aux données antérieures. Il y a lieu de noter que la collecte de ce que l'on a appelé les *données sur les activités d'affaires* (LBD : Line of Business Data) s'est déroulée en dépit d'une violente opposition et de procédures entamées par plus d'une centaine de sociétés américaines, avec l'aide inestimable de Wassily Leontief. Compte tenu de ces nouvelles données et de la consternation provoquée à l'époque par la chute des taux de croissance de la productivité des États-Unis, accompagnées par une baisse sans précédent des dépenses en matière de R-D en dollars constants, il devenait judicieux de mettre au point une matrice détaillée repérant les flux technologiques des industries investissant dans les activités de R-D et ceux des industries en bénéficiant.

Le lien entre les dépenses investies dans des activités de R-D par des entreprises individuelles étroitement définies (par trois ou quatre chiffres dans les codes de classification industrielle) a été établi grâce à l'analyse de quelque 15 112 brevets d'invention obtenus par 443 grandes sociétés américaines soumettant les LBD auprès de la FTC. Une équipe de quatre étudiants de la Northwestern University – un ingénieur électrique, un biologiste, un ingénieur chimiste et un jeune fils d'agriculteur doué en mécanique – s'est appliquée, pendant environ trois mois, à extraire de chaque brevet une série d'informations, dont la branche d'activité dans laquelle les activités de R-D sous-jacentes étaient menées et le secteur industriel, repérées dans les spécifications des brevets afin de justifier « l'utilité » des inventions dont la protection était demandée de même que l'utilisation probable des inventions. Chaque codage a été révisé par l'auteur et, dans les cas douteux, revérifié, parfois directement auprès des sociétés. Les brevets codés ont ensuite été liés à des secteurs d'activité particuliers pour lesquels les entreprises avaient remis des rapports confidentiels à la FTC. Pour chacun des 4 274 secteurs d'activité, un coût moyen des activités de R-D par brevet attribué a été calculé et ajusté à la hausse par un rapport d'échantillonnage industriel. Le coût en R-D de chaque brevet a ensuite été alloué à une ou plusieurs des 286 industries utilisatrices, dont celui de la consommation finale, afin d'estimer la matrice des flux technologiques. Pour 66 % des brevets, entre un à trois domaines d'utilisation spécifique ont pu être repérés[1]. Les dépenses moyennes investies dans des activités de R-D sous-jacentes ont été réparties entre une multitude de secteurs industriels selon la taille relative des industries qui y avaient recouru, comme la matrice des transactions entrées-sorties de 1972 a pu le déterminer. Le dernier tiers a été regroupé dans la catégorie des inventions à usage industriel général. Les coûts des activités de R-D destinées à ces inventions ont été répartis entre les industries qui y ont eu recours, et ce, proportionnellement aux flux des transactions entrées-sorties de 1972 ou (pour les

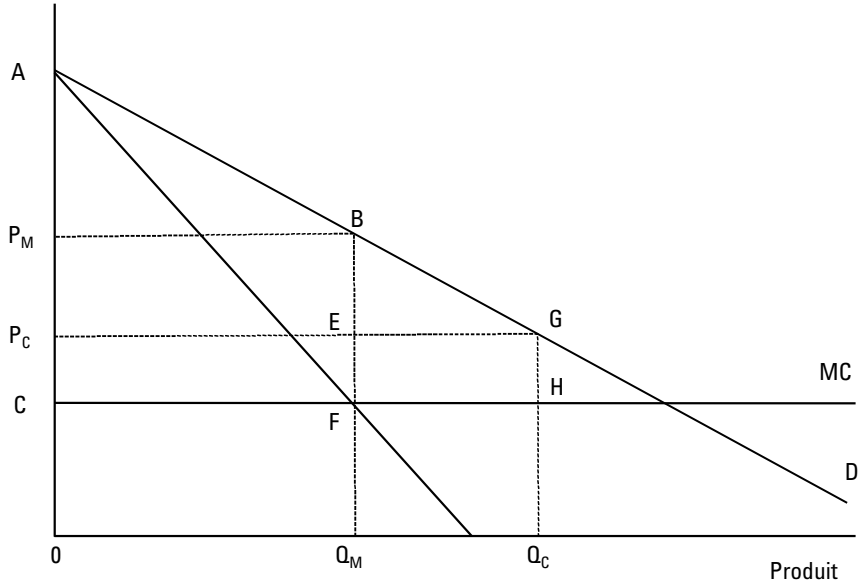
1. Dans 64 % des cas, une seule entreprise avait utilisé le brevet déposé.

inventions d'usage universel) aux parts de valeur ajoutée globales, quelques modifications s'étant ensuite imposées. La méthodologie adoptée est décrite en détail par Scherer (1984).

Les données sur les activités de R-D ont essentiellement servi à analyser l'évolution de la croissance de la productivité. Pour ce faire, en règle générale, on a régressé les estimations de la croissance de la productivité industrielle en fonction de divers indices de développement technologique industriel, et ce, généralement par une variable de substitution de certaines estimations de R-D effectuées. La principale difficulté que posait cette approche était connue depuis la publication d'un court ouvrage de Gustafson (1962). Il en est ressorti que la grande majorité de la R-D (qui, selon mes propres travaux de recherche [Scherer, 1982a], étaient de l'ordre de 75 %) visaient la mise au point de nouveaux *produits* ou l'amélioration d'anciens produits vendus à d'autres entreprises ou aux consommateurs finaux. Les progrès technologiques issus des activités de R-D destinées au développement de ces produits étaient normalement *incorporés* dans les produits et services vendus par ceux qui réalisaient les activités de R-D et dont les acheteurs tiraient des bénéfices, notamment en améliorant leur productivité. Environ un quart seulement des activités de R-D visaient la poursuite des procédés, à savoir qu'elles étaient destinées à améliorer les procédés de production interne des entreprises qui les menaient et, en ce sens, à accroître la productivité totale de leurs facteurs ou de leur main-d'œuvre. Généralement, ceux qui acquièrent les produits et services dans lesquels le fruit des activités de R-D a été intégré en tirent d'importants bénéfices. Il y a lieu de souligner que, pour ces activités de R-D investies dans ces produits, le fait de lier la croissance de la productivité de l'industrie *i* aux activités de R-D réalisées dans l'industrie *i*, comme de trop nombreux économistes ont tendance à le faire, risque de produire des résultats gravement erronés.

Pour aller au-delà de cette généralisation, il faut procéder à une analyse à deux niveaux. Le premier niveau se limite à étudier ce qui arrive dans une analyse économique exacte des changements provoqués par la R-D de produits. Dans la figure 7.2, on pose qu'une entreprise investit dans des activités de R-D qui aboutissent à la fabrication d'un nouveau produit, dont la courbe de demande (tout en tenant compte de l'existence et des prix des produits de substitution de qualité inférieure) est représentée par AD. Si l'entreprise détient un monopole dans un produit nouveau et de qualité supérieure, elle établira un rapport d'égalité entre le revenu d'exploitation marginal et le coût marginal (affectés par les le processus de R-D, et que l'on assume constant à OC par unité) et fixera le prix à OP_M, réalisant des profits de P_{MBFC}. Si, au préalable, l'entreprise maintenait un équilibre concurrentiel et affichait des recettes d'exploitation couvrant à peine les coûts des intrants, son profit représenterait une augmentation des recettes d'exploitation par rapport aux coûts des intrants, assurément imputable aux bénéfices initiaux de l'entreprise. Toutefois, les clients de l'entreprise tirent également un profit, mesuré par la figure quasi triangulaire ABP_M. Ainsi, selon des calculs appropriés, le surplus social de bien-être tiré des activités de R-D est réparti entre

FIGURE 7.2
Distribution théorique des bénéfices de l'innovation d'un produit



l'entreprise et ses clients[2]. En revanche, si plusieurs entreprises proposent un nouveau produit similaire, elles risquent alors de se livrer à une concurrence des prix et de forcer l'entreprise visée à réduire ses prix à OP_C. En ce cas, les consommateurs se réservent la part du lion des bénéfices tirés des activités de R-D et l'entreprise qui a investi dans les activités de R-D n'en tire que la plus petite quantité de P_CGHC. Plus les acteurs se livrent à une concurrence des prix, moins la part du surplus social revenant à l'entreprise à l'origine de l'innovation sera importante[3]. Une analyse théoriquement exacte des bénéfices tirés des activités de R-D industriels pourrait révéler cette division si elle ignorait les effets secondaires de l'équilibre général sur les courbes de demandes d'autres entreprises venant concurrencer un monopole, qui peuvent parfois se révéler importants.

2. Si des innovations économiques sont apportées au processus, il est possible, mais pas obligatoire, que tous les bénéfices reviennent à l'innovateur (Arrow, 1962). Si ces innovations se traduisent par une baisse des prix, les bénéfices sont partagés. L'accent mis ici sur les bénéfices recueillis soit par l'innovateur, soit par les acheteurs des produits novateurs ne nie pas que la technologie se propage dans toute l'économie de différentes façons. Griliches (1979) fait une distinction entre les « retombées de rentes », qui comprennent les flux de technologies analysés ici, et les « retombées de connaissances », qui ne sont pas intégrées aux marchandises qui font l'objet des transactions sur le marché.
3. Mansfield *et al.* (1977) estiment que, en moyenne, dans un échantillon de 17 innovations, les innovateurs ont tiré approximativement 44 % des bénéfices économiques actualisés de leurs innovations.

Cependant, les mesures sur lesquelles les économistes doivent fonder leurs travaux de recherche dans le monde réel de l'analyse de la productivité ne répondent pas aux attentes des idéaux théoriques. Pour mesurer la croissance de la productivité, on essaie de mesurer l'évolution des extrants en chiffres absolus, c'est-à-dire en termes de pouvoir d'achat constant. La plupart des analyses parviennent à la conclusion que les indices des prix recueillis par les organismes du gouvernement, tels que le BLS, ont tendance à sous-estimer les effets d'augmentation de la valeur attribuables à l'amélioration de la qualité des produits, et, par là même, lorsqu'ils servent de déflateurs, à sous-estimer le gain tiré de la valeur réelle des extrants entre une période initiale et une période d'innovation (Griliches, 1979). Plus ils sous-estiment les gains en valeur réelle, moins la croissance de la productivité est attribuée à la vente, par l'industrie, de produits améliorés et moins le coût des intrants est imputé aux industries qui utilisent ces produits et dont les gains en productivité sont susceptibles, par conséquent, d'être surestimés.

Si l'on veut comprendre à quel stade et comment la croissance de la productivité survient, le recours aux indices des prix hédoniques tend à octroyer les bénéfices à l'entreprise qui a amélioré ses produits et donc à surestimer ses gains par rapport aux effets économiques réels. Ainsi, pour les industries qui acquièrent des ordinateurs améliorés, et qui, comme le montre la figure 7.1, sont susceptibles d'en tirer de substantiels bénéfices nets, le recours aux indices hédoniques des prix tend à accroître la valeur des biens d'équipement acquis et ainsi à réduire, voire à éliminer, la valeur de la croissance de la productivité totale des facteurs mesurée (mais peut-être pas celle de la main-d'œuvre, à moins d'ajuster l'intensité des capitaux). En règle générale, plus les déflateurs sous-estiment la valeur des améliorations apportées aux produits, moins la croissance de la productivité est accordée aux industries à l'origine de ces améliorations. Plus la valeur des améliorations est surestimée (conséquence des méthodes hédoniques), plus la croissance de la productivité est attribuée aux industries à l'origine de ces améliorations. L'adoption de déflateurs hédoniques pour les ordinateurs a eu tendance à montrer que les gains de la productivité totale des facteurs tirés des progrès technologiques rapides se concentraient dans le secteur de la fabrication des ordinateurs même si, la concurrence des prix aidant, presque tous les secteurs de l'économie ont bénéficié de ces progrès[4].

Ces réflexions ont eu des conséquences importantes sur les tentatives d'estimation économétrique des répercussions de la R-D sur la croissance de la productivité. Si, comme c'est souvent le cas, les déflateurs de prix ne sont

4. Étant donné que pour évaluer le produit national brut (PNB), la production industrielle « réelle » est pondérée par les indices des prix de l'industrie, les changements apportés à l'indice des prix de l'année de base peuvent se traduire par des réductions étonnamment importantes du PNB estimé. Il s'agit d'un problème particulier relevé dans les années 1990, jusqu'à ce que les données pondérées du PNB soient raccordées sur une base annuelle et non plus quinquennale.

pas totalement pris en compte dans le calcul des gains tirés de l'amélioration des produits, il faut retracer le flux de la R-D des produits dans les industries qui les utilisent afin d'en mesurer les impacts totaux. Par ailleurs, lorsque les déflateurs des prix hédoniques sont utilisés, dans la plupart des cas si ce n'est la totalité, les répercussions seront retracées dans l'industrie qui aura investi dans la R-D des produits. Mes expériences avec des déflateurs alternatifs pour les ordinateurs selon un échantillon d'industries beaucoup plus vaste sont venues confirmer cette généralisation (Scherer, 1993).

4. Réestimation à l'aide de méthodes à moindre intensité de main-d'œuvre

Le Bureau des analyses économiques (BEA : Bureau of Economic Analysis) m'a incité à me pencher à nouveau sur cette question en me demandant si l'on pouvait évaluer les matrices de flux technologiques à l'aide des tableaux entrées-sorties pour augmenter son programme des comptes satellites. Avec la collaboration du personnel du Bureau, les données indispensables sur les transactions, lisibles par ordinateur, qui remontent à 1972, ont été récupérées et des travaux de réestimation ont pu être entrepris. Le reste de ce chapitre en présente les résultats, les compare aux estimations obtenues à l'aide de mon approche originale, plus intensive en main-d'œuvre, et décrit les possibilités de recherche futures. Avant tout, il a toutefois fallu résoudre trois problématiques conceptuelles.

4.1. Quelle matrice entrées-sorties utiliser ?

La problématique la plus importante était peut-être de savoir s'il convenait d'utiliser des matrices de transactions entrées-sorties de premier ordre pour retracer les activités de R-D des industries les ayant réalisées jusqu'aux industries les ayant utilisées ou s'il valait mieux utiliser les matrices des besoins (approche de la matrice inverse de Leontief), qui permettent de calculer les extrants utilisés à la fois directement et indirectement pour élaborer un vecteur donné des extrants. Dans ses travaux originaux, Nestor Terleckyj avait employé des matrices de transactions de premier ordre. Plus récemment, dans le cadre d'un ambitieux effort, l'OCDE (1996) a opté pour l'approche des matrices des besoins totaux. L'approche que j'avais adoptée au début des années 1980 était éclectique. Pour les deux tiers des brevets, il n'y avait pas lieu de recourir aux données entrées-sorties, puisqu'ils étaient directement liés aux industries qui les utilisaient. Pour le dernier tiers, chaque approche reposait sur des arguments défendables. La matrice « fabrication et utilisation » de premier ordre a servi de point de départ, mais pour 22 secteurs manufacturiers d'où la technologie provenait, les transactions de premier ordre ont été reportées plus loin, de l'industrie initiale à l'entreprise ayant utilisé l'extrant de l'utilisateur du premier ordre ou, dans un cas particulier (fibres synthétiques),

à l'usager du troisième ordre[5]. Ce choix peut être qualifié d'arbitraire (et l'a été). Sa principale justification réside dans le fait qu'il était amplement détaillé, puisque 15 112 brevets avaient été étudiés afin de comprendre en quoi la technologie créée par une industrie était susceptible d'affecter les activités des industries y ayant recours.

Ces ambiguïtés sont courantes dès lors que l'on essaie de situer l'endroit où les gains de productivité sont réalisés. Ainsi, le cas visant à privilégier les transactions de premier ordre aux dépens des matrices des besoins est fondamentalement équivoque. Une manière de résoudre ce problème serait de procéder à des choix judicieux selon le trait manifestement dominant des exemples d'utilisation, ce que j'ai essayé de faire lorsque j'ai élaboré mes matrices originales. Il reste que, dans le cadre de mes récents travaux, j'aspirais avant tout à trouver des solutions plus simples, ce qui m'obligeait à choisir entre la matrice des transactions de premier ordre ou des besoins totaux. J'ai décidé tout d'abord de recourir à la matrice des transactions de premier ordre, d'une part, parce qu'elle correspondait davantage à mon approche, et, d'autre part, parce que, en utilisant mes matrices originales de flux technologiques pour expliquer la croissance de la productivité, je m'étais rendu compte que les matrices sans flux de second ordre avaient une plus grande capacité d'explication que celles de second ordre où des ajustements *ad hoc* étaient apportés[6]. Une meilleure solution consiste à poursuivre les deux options globales et à vérifier laquelle donne des résultats qui soient plus conformes à ma matrice originale (dans laquelle, de nouveau, les deux tiers des contributions étaient directes et ne reposaient pas sur des données entrées-sorties) et laquelle explique mieux la croissance de la productivité. Et c'est ce que j'ai fait ici.

4.2 Le problème de la diagonale

Dès que les matrices entrées-sorties publiées servent de « porteuses » pour repérer les activités de R-D entre l'industrie où elles ont été menées et celle qui y a recouru, un problème de discordance survient inévitablement entre ce que les valeurs de la diagonale mesurent et ce que l'on voudrait qu'elles

5. Les secteurs pour lesquels les flux de second ordre ont été calculés sont ceux des usines de tissage, des ateliers de tricotage, des fibres organiques, des pneumatiques et chambres à air, des boyaux et des courroies de caoutchouc, du verre plat, du verre pressé et du verre soufflé, des moteurs à combustion interne, des pompes, des paliers à roulement, des appareils de compression, des variateurs de vitesse et des transmissions industrielles, des équipements mécaniques de transmission de puissance, des carburateurs automobiles, etc., des équipements d'éclairage des véhicules automobiles, des tubes électroniques, des tubes à rayon cathodique, des semi-conducteurs, des autres composants électroniques, des dispositifs de démarrage et des batteries de traction, des moteurs d'avions, des boutons, des fermetures à glissière, etc. Ce ne sont pas toutes les transactions qui ont été ainsi traitées, mais uniquement celles qui visaient essentiellement les « éléments vendus aux usines d'assemblage ».

6. Voir Scherer (1982b, p. 631), où toutefois les matrices avec des flux de second ordre ont été privilégiées en fonction de raisons a priori même si les corrélations légèrement plus élevées de Pearson avec une croissance de la productivité ont été obtenues alors que seuls les flux de premier ordre ont été mesurés.

mesurent. Ce que l'on devrait retrouver sur la diagonale d'une matrice porteuse appropriée, c'est la fraction de la R-D réalisée par l'industrie *i* et utilisée par l'industrie *i*, essentiellement constituée de R-D visant les procédés. Les entreprises ont adopté des mesures diamétralement opposées pour leurs activités de R-D selon qu'elles visent des procédés ou des produits – avec, selon mes données originales sur les flux technologiques, de 0 % à 100 % pour les procédés, et une valeur moyenne dans l'ensemble des industries de 29,9 % et une médiane de 19 %. Ainsi, les industries fortement axées sur les procédés internes, les diagonales des transactions entrées-sorties sont toujours beaucoup trop faibles. Quant aux industries (généralement les industries plus intensives en recherche) se distinguant par de faibles mesures axées sur les procédés, les diagonales sont souvent trop « épaisses », surtout lorsqu'elles recourent largement aux expéditions interétablissements au sein d'une industrie donnée.

Dans mon application originale des données entrées-sorties visant à allouer les inventions à usage général (de nouveau, environ un tiers de toutes les inventions) aux industries y ayant recours, j'ai essayé d'atténuer le problème des expéditions interétablissements en réduisant les éléments de la diagonale à des valeurs n'excédant pas la fraction de la part de l'industrie dans la ligne des extrants proportionnels à l'industrie. Néanmoins, si les matrices entrées-sorties étaient utilisées comme le seul allocateur des activités de R-D dans l'élaboration des matrices de flux technologiques, les résultats pourraient être améliorés si l'on incorporait les estimations des taux de R-D au processus industriel individuel. De telles estimations ont été recueillies dans les premiers registres américains sur les activités de R-D et pourraient être ajoutées à de futurs questionnaires, sans pour autant rendre la tâche des répondants plus laborieuse. En tenant compte de cette possibilité, j'ai élaboré différentes matrices porteuses où les éléments de la diagonale, exprimés en fractions des envois totaux de l'industrie (à l'exception de la consommation finale, de la formation de capitaux et des variables d'ajustement), ont été remplacés par des fractions individuelles de R-D visant les procédés issus des données sur les 15 112 brevets, dotées d'autres éléments renormalisés afin de faire la somme par unité. Les matrices de flux technologiques ainsi obtenues seront appelées des matrices « ajustées en fonction des procédés » ; les matrices sans les ajustements de la diagonale seront appelées des matrices « naïves ».

4.3. La place des biens d'équipement

En vertu des conventions standards d'entrée-sortie, la production des biens d'équipement d'une industrie se classe dans la matrice des transactions, sous la catégorie des investissements intérieurs bruts fixes, analogue à la catégorie de la consommation finale, et non celle des industries individuelles utilisatrices. Si cette convention était acceptée pour sa valeur intrinsèque, les flux technologiques incorporés dans les biens d'équipement aux industries individuelles utilisatrices seraient perdus ou mal calculés. Cela serait vraiment déplorable, surtout qu'il ressort de notre analyse des brevets individuels que 44,8 % de tous les brevets étaient associés à des biens d'équipement vendus à d'autres industries, et ce, sans compter les 26,2 % des brevets couvrant les

inventions de procédé, dont beaucoup auraient une influence sur les biens d'équipement utilisés à l'échelle de l'industrie[7]. Inversement, seuls 21,6 % des brevets visaient des matériaux industriels. Voilà pourquoi un peu plus des deux tiers de la technologie passant de l'industrie qui l'a inventée à d'autres industries qui l'utilisent et pouvant agir sur la productivité des industries qui y recourent risquent d'être intégrés dans les biens d'équipement. Or, exclure les flux des transactions de biens d'équipement de la matrice porteuse était susceptible de déboucher sur de graves erreurs. Les flux de pièces de rechange et d'autres éléments ne constituant pas une dépense mais étant traités comme des transactions interindustrielles provenant d'industries productrices de biens d'équipement risqueraient ainsi de constituer de piètres remplacements pour le flux des biens en équipement aux yeux des usagers.

Dans mon estimation originale de la matrice des flux technologiques, j'ai ventilé les transactions des flux de capitaux proportionnellement aux nouveaux investissements en capitaux des industries utilisatrices plus étroitement définies (ou pour certaines industries non manufacturières, la valeur ajoutée), comme une fraction des flux de capitaux pour la catégorie de l'industrie plus agrégée. Les estimations des flux de capitaux qui en ont résulté ont été ajoutées aux estimations des transactions, ce qui a donné la matrice porteuse de base qui répartit les activités de R-D entre les industries qui les ont effectuées et les industries qui y recourent.

Une procédure analogue a été adoptée pour réévaluer les matrices porteuses en vue de déterminer uniquement les flux technologiques des données entrées-sorties, sans recourir aux codages détaillés de l'utilisation des brevets. Les ventilations provenaient de 77 entreprises utilisant la technologie contre 211 industries définies plus étroitement. Pour 70 des 192 entreprises ayant créé une technologie, les flux de capitaux représentaient au moins 5 % de la somme des transactions et des flux de capitaux ; la valeur moyenne des flux de capitaux était constituée de 19,4 % de transactions et de flux de capitaux.

Tout comme avec la matrice des transactions n'ayant pas de valeur de flux de capitaux, l'ensemble des transactions et de la matrice porteuse des flux des capitaux a été calculé de deux façons – une sans la correction des éléments de la matrice diagonale et une avec les diagonales proportionnelles à la R-D des procédés internes comme une fraction des activités de R-D de l'industrie qui les a réalisées (et avec d'autres éléments de la ligne renormalisés afin de garantir une somme des lignes d'unités). Les industries productrices de biens d'équipement étaient en moyenne beaucoup moins intensives en inventions de procédés que les industries qui ne disposaient pas d'importants flux en capitaux. Pour les premières, les activités de R-D consacrées aux inventions de procédés représentaient 8,6 % de toutes leurs activités de R-D ; pour les deuxièmes (à savoir les industries ne disposant pas d'importants flux de capitaux), les activités de R-D visant les procédés représentaient 42,1 % de toutes les activités de R-D menées.

7. À ce sujet, voir Carter (1970, p. 21), qui fait justement remarquer que « de nouveaux types de marchandises sont au cœur des changements technologiques ».

5. Résultats

Deux critères sont appliqués pour juger de la supériorité des différentes méthodes d'estimation des matrices de flux technologiques. Les nouvelles matrices correspondent-elles étroitement à mes matrices originales laborieusement élaborées à l'aide de données sur les brevets ? Dans quelle mesure peuvent-elles prédire la croissance de la productivité entre 1973 et 1978 à l'aide de l'analyse de régression ? Ces deux approches sont décrites ci-dessous.

Les deux variables les plus appropriées pour prévoir la croissance de la productivité des industries utilisant la technologie sont les sommes des colonnes des matrices de flux technologiques – à savoir la somme des différentes quantités de technologie qu'une industrie importe d'autres industries et de l'élément de la diagonale mesurant les processus technologiques issus de l'industrie en question.

5.1. Analyse de la prévision

Le tableau 7.1 reproduit la synthèse des tests menés. Pour estimer la prévision, on a utilisé le coefficient de corrélation de Pearson *r* ainsi que quatre mesures de synthèse – la moyenne arithmétique, la médiane et les valeurs calculées aux première et quatrième limites de distribution des quartiles – des déviations en pourcentage entre les usages de la technologie de la somme des colonnes estimées et originales, et ce, en millions de dollars de 1974.

Les calculs ayant utilisé les transactions de premier ordre permettent de déterminer que la matrice des transactions naïves fonctionne moins bien comme porteuse des activités de R-D, et ce, de presque tous les points de vue.

TABLEAU 7.1
Mesures prévisionnelles : estimations de 1982 comme référence

			Pourcentage d'erreur*			
	N	Corr.	Moyenne	Médiane	1er quart	3e quart
Transactions naïves						
Toutes les industries	205	0,701	78,60	18,41	–37,31	116,82
Manufacturier	181	0,528	90,04	22,01	–30,20	126,25
Ajustées pour le processus						
Toutes les industries	205	0,716	33,85	8,78	–15,23	63,50
Manufacturier	181	0,878	37,53	12,24	11,23	63,50
Transactions et flux de capital combinés						
Toutes les industries	205	0,859	62,73	25,30	–20,37	111,22
Manufacturier	181	0,715	68,14	36,22	–14,48	122,18
Combinés et ajustées pour le processus						
Toutes les industries	205	0,899	41,52	19,64	–3,91	68,78
Manufacturier	181	0,921	43,62	24,12	–2,30	68,86
Matrice agrégée appendice						
Toutes les industries	49	0,843	25,25	10,77	–1,49	37,98

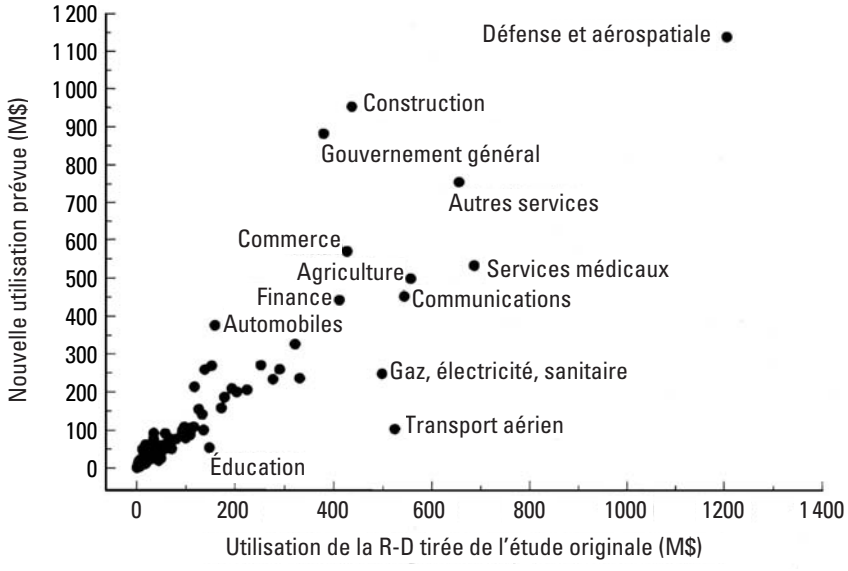
* 100 (nouvelle estimation – estimation originale) / estimation originale.

Que les flux technologiques reposent sur la matrice des transactions ou sur la somme des transactions et des flux de capitaux, les résultats sont supérieurs lorsque les éléments de la diagonale sont corrigés pour observer l'incidence de l'usage des procédés.

Le plus surprenant a été de constater que, malgré les attentes, l'estimation reposant sur la matrice des transactions a donné, au moins sur le plan des erreurs de pourcentage, des résultats supérieurs à ceux de l'estimation fondée sur les matrices des transactions et des flux de capitaux, théoriquement préférée. La combinaison préférée obtient toutefois de meilleurs résultats en termes de coefficients de corrélation simples. Manifestement, cette dernière affichait des erreurs de prévision plus légères pour des valeurs relativement extrêmes, qui tendent à influer sur les coefficients de corrélation de manière disproportionnée, alors que, dans l'étude originale, les industries montrant une technologie avec des valeurs de R-D intermédiaires utilisées affichaient des erreurs de prévision sensiblement meilleures dès que l'on ajoutait les flux de capitaux aux valeurs des transactions pour calculer les matrices porteuses appropriées.

Cela ne signifie pas pour autant qu'il ne faille pas prendre en compte les flux de second et énième ordre. La figure 7.3 est un diagramme de dispersion représentant les observations pour les 205 industries utilisant la technologie selon leur recours à la R-D (en millions de dollars) prévu à l'aide de

FIGURE 7.3
Diagramme de dispersion des matrices d'utilisation combinées et corrigées



toutes les données des 15 112 brevets (axe horizontal) et du recours à la R-D prévu avec la matrice des procédés à la diagonale corrigée regroupant les transactions et les flux de capitaux. Dans une parfaite corrélation, les points des données devraient se trouver sur une ligne droite commençant à l'origine. Les erreurs positives les plus extrêmes sont les flux gouvernementaux en général, qui étaient également une erreur aberrante dans l'analyse seule des transactions des procédés corrigée, et la construction, mais qui n'en était pas une dans l'analyse reposant sur les transactions. La raison pour laquelle la construction est l'observation aberrante d'une erreur dès que les flux de capitaux sont compris dans les prévisions est simple. La matrice des flux de capitaux attribue à la construction d'importants volumes d'appareils électroménagers de cuisines et de salles de bain, d'appareils de chauffage et de climatisation, de cloisons de bureau, et autres, qui ne servent pas vraiment à améliorer la productivité sur le site de construction des bâtiments, mais qui profitent largement à ceux qui achètent et utilisent les structures construites. Autrement dit, il importe de tenir compte des flux technologiques de second ordre, ce qui a été fait lors de la formulation des matrices de flux originales, mais qui ne l'a pas été dans les nouvelles estimations présentées ici. La plus petite valeur extrême de l'axe vertical, ici, est celle du transport aérien, dont les estimations de la nouvelle matrice sous-estiment indubitablement la contribution de la technologie à double usage des fabricants de moteurs et de systèmes de communications et de radionavigation, qui sont répartis entre les secteurs de la défense et du transport aérien. Dans le sous-ensemble des entreprises manufacturières relativement ventilées, les erreurs positives les plus importantes sont celles qui visent les voitures de tourisme, les fibres organiques et l'assemblage d'avions, qui ont tous été largement affectées par des flux de second ordre dans l'estimation de la matrice originale, mais pas dans les nouvelles estimations décrites ici. Il ressort de ces problèmes que si les données entrées-sorties servent de base aux estimations des flux technologiques à l'avenir, le recours sélectif aux ajustements des flux de second ordre pourrait en accroître le degré d'exactitude.

5.2. Prévision de la productivité

Une autre façon d'évaluer le taux de réussite des nouvelles estimations des flux technologiques consistait à faire la somme des colonnes afin d'obtenir une variable explicative dans les analyses de régression « expliquant » la croissance de la productivité, et à tenir compte d'autres variables pertinentes. Il s'agissait de l'un des principaux objectifs des travaux d'estimation originaux menés il y a 20 ans. À l'époque, les données sur la croissance de la productivité ventilées par industrie étaient plus rares qu'elles ne le sont aujourd'hui. Les principaux résultats, décrits par Scherer (1982b), accordaient une place importante à ce que l'on considérait, à cette époque-là, comme les nouvelles définitions industrielles des séries entrées-sorties utilisées du BLS ; elles regroupaient alors 87 secteurs industriels – dont 81 visant le secteur manufacturier, l'agriculture, la production de pétrole brut et de gaz, les chemins de fer, le transport aérien, les communications et le secteur des services publics combinés de gaz et d'électricité. J'ai repris ces données dans ma nouvelle analyse, bien que,

par égard aux écarts essentiellement imputables à la confidentialité de certaines données de la FTC sur les secteurs d'activité, seuls 80 secteurs industriels (ou 79 conformément aux données de l'approche de la matrice inverse de Leontief) peuvent être étudiés ici. La variable dépendante est la croissance, en pourcentage, de la productivité de la main-d'œuvre ΔLP, à savoir la production réelle (estimée) par unité de facteur travail entre 1973 et 1978, deux années de pointe cycliques. Une autre variable tirée des données originales sur la croissance de la productivité était la progression, en pourcentage, de l'intensité en capital Δ(K/L), observée au cours de la même période. Le rapport original avait privilégié deux variables qui ont de nouveau été employées ici pour mesurer la contribution de la technologie : *UsedRD*, c'est-à-dire la somme des colonnes agrégées appropriées servant à estimer l'utilisation de R-D par l'industrie *i*, soit à titre de R-D des procédés, soit à titre d'importation d'activités de R-D menées par d'autres industries, et *ProdRD*, ou la quantité d'activités de R-D menées par l'industrie *i* à des fins autres que la transformation, ces activités de R-D ayant toutes été, virtuellement, menées en vue d'être exportées sous forme intégrée vers d'autres industries recourant à la technologie. Ces deux variables sont calculées comme un pourcentage des valeurs des extrants de l'industrie appropriée. Ignorant les difficultés de mesure, *ProdRD* devrait représenter les bénéfices tirés à l'échelle interne par l'entreprise novatrice, à savoir la zone PmBEP dans la figure 7.2, et *UsedRD*, les bénéfices inscrits, ou économies extérieures, à savoir ABP_M dans la figure 7.2. On cherchait principalement à évaluer la contribution de *UsedRD* de différentes façons. À la suite d'une preuve attribuée à Terleckyj (1974), les coefficients de régression sur les variables de R-D peuvent être interprétés, sous réserve de certaines qualifications, comme des taux de rendement des investissements en R-D.

Plusieurs résultats ont donné lieu à quelques surprises (voir le tableau 7.2). Premièrement, les régressions (3) et (5), avec et sans ajout des flux de biens en équipement, mais sans ajustements de la diagonale des procédés, dépassent les autres régressions. Deuxièmement, le coefficient de détermination le plus élevé (R^2) utilisant les matrices porteuses de premier ordre s'obtient à l'aide de la régression (5), qui repose sur la somme des transactions et des biens en équipement, sans ajustements à la diagonale des procédés. Cette régression révèle néanmoins un ensemble surprenant, et pour le moins invraisemblable, de coefficients d'impact technologique. Le coefficient sur *UsedRD* affiche des taux de rendement de 225 % sur les activités de R-D effectuées sur les procédés et les activités de R-D importées – des chiffres beaucoup plus élevés que toute estimation reposant sur l'ensemble des données originales. Simultanément, cet important effet des activités de R-D utilisées annule l'impact des activités internes de R-D sur les produits, ce qui est tout aussi invraisemblable. Ce deuxième résultat s'explique par le fait que l'équation de régression souffre d'une forte multicolinéarité. La simple corrélation entre les variables de R-D déformées par les extrants s'établit à 0,760, et la variable de R-D utilisée (sans ajustement de la diagonale des procédés) dépasse la même variable de R-D de ses propres produits corrélés. Compte tenu de ces anomalies, l'une est inclinée pour rejeter la régression (5) et favoriser la régression (6), avec l'appui, a priori, le plus fort et la deuxième capacité d'explication des nouveaux concurrents en lice. De fait, le coefficient

TABLEAU 7.2
Régressions expliquant la croissance de la productivité, 1973-1978*

	UsedRD		ProductRD	(K/L)	R^2	N
(1) Données originales	0,742 (1,89)		0,289 (2,01)	0,347 (3,30)	0,193	87
(2) Données originales, échantillon relié	0,698 (1,74)		0,357 (2,27)	0,332 (3,03)	0,192	80
(3) Nouvelles transactions naïves	0,565 (1,19)		0,194 (0,81)	0,314 (2,85)	0,175	80
(4) Nouvelles transactions ajustées pour processus	0,352 (0,66)		0,359 (2,07)	0,312 (2,81)	0,164	80
(5) Nouvelles transactions plus flux de capitaux	2,25 (2,68)		–0,073 (0,31)	0,268 (2,48)	0,232	80
(6) Nouvelles transactions plus flux de capitaux, ajustées pour processus	0,751 (1,73)		0,320 (1,96)	0,299 (2,72)	0,192	80
(7) Nouvelle matrice inverse de Leontief	0,302 (2,68)		0,198 (0,92)	0,322 (2,91)	0,183	79
(8) Nouvelle matrice inverse de Leontief ajustée pour processus	0,232 (0,88)		0,321 (1,72)	0,316 (2,84)	0,169	79
	1er ordre	**Inverse**				
(9) UsedRD de (6) et (7)	0,815 (1,88)	0,336 (1,60)	0,79 (0,36)	0,302 (2,76)	0,220	79
(10) UsedRD de (2) et (7)	0,817 (2,02)	0,374 (1,77)	0,088 (0,40)	0,339 (3,12)	0,225	79

* Les indices entre parenthèses indiquent les statistiques *t* de Student.

de détermination R^2 de la régression (6) est identique à celui de la régression (2) qui intègre les données sur la R-D utilisée, tirées de la matrice originale des flux technologiques, issue de l'étude des 15 112 brevets. D'ailleurs, les coefficients de régression ne diffèrent que de manière triviale.

Cette étude réservait encore quelques surprises, notamment lorsque les sommes des colonnes des matrices porteuses des besoins totaux de Leontief ont été substituées, en vue d'obtenir la principale variable des activités de R-D utilisées. Avec les estimations de la matrice inverse de Leontief à la fois inajustée aux valeurs de la diagonale des procédés (régression (7)) et ajustée aux procédés (régression (8)), le R^2 est inférieur à la meilleure des deux régressions reposant sur les nouveaux vecteurs des flux technologiques de premier ordre. Aucune variable des activités de R-D utilisées fondée sur les besoins totaux n'a d'importance statistique selon les normes traditionnelles, dépassant la valeur du ratio de Student ($t = 1,67$) délimitant 95 % de la confiance dans un

test unilatéral. À l'instar des estimations de premier ordre, la capacité d'explication est plus grande sans les ajustements à la diagonale des procédés, aux dépens, toutefois, de la dégradation du rôle de la variable de R-D sur le produit. Les retombées de la R-D du produit pourraient s'expliquer en partie par le fait que les estimations de la matrice de Leontief sans les ajustements à la diagonale des procédés sont fortement corrélées à la variable de la R-D sur le produit, une colinéarité qui tend à déformer les coefficients de R-D sur le produit[8]. Voir le tableau 7.3, qui représente une matrice des coefficients de corrélation pour d'autres mesures des flux de R-D définies à titre de pourcentage de la valeur de la production industrielle.

Des régressions (7) et (8) illustrées dans le tableau 7.2, des corrélations de Pearson entre la croissance de la productivité entre 1973 et 1978, généralement similaires, et des différentes méthodes d'évaluation du flux de la R-D, illustrées au tableau 7.3, et des corrélations généralement faibles entre les variables de la matrice de Leontief et les variables sur l'utilisation des activités de R-D de premier ordre, il devrait ressortir que les variables sur

TABLEAU 7.3
Matrice des corrélations pour les variables utilisées dans l'analyse de régression

	Δ(Q/L)	ProductRD	$UsedRD_{orig}$	$UsedRD_{k,p}$	$UsedRD_{L}$	$UsedRD_{L,P}$
Δ(Q/L)	1,000	0,264	0,204	0,279	0,259	0,227
ProductRD		1,000	0,186	0,308	0,689	0,532
UsedRDorig			1,000	0,805	0,009	0,236
$UsedRD_{k,p}$				1,000	0,151	0,419
$UsedRD_{L}$					1,000	0,844
$UsedRD_{L,P}$						1,000

Notation :

Δ(Q/L) Croissance annuelle en pourcentage de la productivité de la main-d'œuvre, 1973-1978.

ProductRD Produit de la R-D (pourcentage de la valeur des sorties de l'industrie).

$UsedRD_{orig}$ Utilisation de la R-D (mesures originales ; pourcentage de la valeur des sorties de l'industrie).

$UsedRD_{k,p}$ Utilisation de la R-D, nouvelles estimations, avec flux de capital et diagonales ajustées pour le processus (pourcentage).

$UsedRD_{L}$ Utilisation de la R-D, matrice inverse de Leontief (pourcentage).

$UsedRD_{L,P}$ Utilisation de la R-D, matrice inverse de Leontief et diagonales ajustées pour le processus (pourcentage).

8. Que les mesures de l'approche de la matrice inverse de Leontief sans ajustement à la diagonale des procédés soient associées à la technologie des produits avancée est également suggéré par un examen des trois valeurs les plus extrêmes, toutes prises à titre de pourcentage de la valeur de la production industrielle : ordinateurs, 10,04 % ; instruments d'optique et d'ophtalmologie, 9,36 % ; machines de bureau, 6,15 %. La valeur médiane de toutes les industries s'est élevée à 1,36 %. Dans le cadre de mes indices originaux sur les activités de R-D utilisées, les trois plus importantes valeurs avaient été celles des composantes électroniques (3,39 %), du transport aérien (3,02 %), et des fibres synthétiques (2,56 %). Sur les trois, deux faisaient un usage intensif de la technologie des procédés ; le troisième (transport aérien) étant un important importateur de la technologie intégrée dans les produits.

l'utilisation des activités de R-D tirées des matrices des besoins totaux caractérisent une dimension différente des flux technologiques, qui pourra néanmoins servir à expliquer la croissance de la productivité.

Pour pousser cette analyse plus loin, les régressions (9) et (10) du tableau 7.2 présentent deux variables sur les différents usages des technologies, l'une calculée en privilégiant les transactions de premier ordre, et l'autre fondée sur la matrice des besoins totaux sans ajustement à la diagonale des procédés. Les valeurs R^2 obtenues sont plus élevées dans toute autre régression sauf la régression (5), qui avait été rejetée pour des raisons d'invraisemblance. Les coefficients de l'usage de la technologie de premier ordre et les besoins totaux (ou dans trois cas sur quatre) dépassaient 95 % du seuil critique en statistique, bien que, comme dans la régression (7), la puissance de la variable sur les activités de R-D sur les produits se soit dégradée. On peut voir également que les rendements implicites sur l'investissement dans la R-D oscillent entre 70 et 80 %, avec des mesures des flux de premier ordre, mais seulement entre 23 et 37 %, avec mesures de énième ordre. Il semblerait que plus l'usage relevé est diffus à l'aide de la matrice inverse de Leontief, plus les rendements de l'utilisation directe de la technologie intégrée de premier ordre sont faibles. D'une manière plus générale, on peut en conclure que l'approche de premier rang et celle des besoins totaux permettent d'expliquer les liens entre la R-D et la croissance de la productivité, les mesures de premier ordre affichant un léger avantage sur celles fondées sur l'approche de la matrice inverse de Leontief.

6. Une autre approche visant à évaluer les flux technologiques

Une autre approche prometteuse pour calculer les flux de technologies intersectorielles, élaborée par Robert Evenson et ses collègues de l'université Yale, repose sur des données uniques élaborées par le Bureau canadien des brevets (Evenson et Johnson, 1997a, 1997b ; Kortum et Putnam, 1997). À la fin des années 1970, le Bureau canadien des brevets a invité son personnel à classer la plupart des brevets qu'il délivrait (dont la moitié visaient des inventions américaines) par secteur manufacturier, ce qui correspond à mon concept des industries d'origine, et par secteur d'utilisation, ce qui correspond à mon concept des entreprises utilisatrices (voir Ellis, 1981). Les classifications étaient établies, en règle générale, selon le code à quatre chiffres du Système de classification des activités économiques du Canada alors en vigueur[9]. Evenson et ses collègues ont représenté les données canadiennes dans des matrices de flux technologiques similaires à la mienne. Cette comparaison est celle d'Evenson et Johnson (1997b), dont le tableau 2 présente les sommes des colonnes des matrices des flux pour la quantité de brevets délivrés, analogues à celles analysées dans la section antérieure. Ma matrice des flux de technologies originale

9. Ces méthodes ont été abandonnées dans les années 1990.

reposait sur les brevets américains délivrés à des sociétés américaines entre 1976 et 1977, qui a d'ailleurs été confirmée par la somme des brevets utilisés indiquée par Evenson et Johnson pour les années 1978 à 1981.

Quelles qu'en soient les raisons, il semble clair que les classificateurs de brevets canadiens et mes travaux de recherche de la fin des années 1970 tendaient à mesurer des phénomènes quelque peu différents. Une recherche plus approfondie sur les raisons des écarts entre les sommes des colonnes d'utilisation plus ventilées et les informations sur les flux technologiques de énième ordre semble donc s'imposer.

7. Conclusions

À partir des résultats obtenus en essayant d'égaler ceux de ma matrice originale des flux technologiques intensifs en main-d'œuvre reposant essentiellement sur les données entrées-sorties comme matrice porteuse, il semble clair que de futures itérations soient possibles. Si de nouveaux travaux sont entrepris un jour, il faudra alors associer les matrices des transactions aux matrices des flux de capitaux ; en effet, la technologie qui circule entre les industries est en grande partie intégrée aux biens en équipement. Idéalement, les flux de capitaux devraient être immobilisés sur de nombreuses années et dépréciés. Un argument persuasif tend aussi à vouloir remplacer les diagonales des matrices standards entrées-sorties par des informations sur la part des travaux de R-D que chaque entreprise consacre à l'amélioration de ses procédés internes. Mais j'y reviendrai plus loin. Il ressort des résultats présentés ici qu'il faut aussi tenir compte des flux technologiques de second et de énième ordre. Si l'on procède de manière sélective, comme je l'ai fait il y a 20 ans, on obtient des explications sur la productivité différentes (et un peu plus fiables) de celles qui reposent sur les matrices de Leontief des besoins totaux de énième ordre, comme la matrice porteuse des flux technologiques. Si ces deux méthodes donnent de meilleures prévisions lorsqu'elles sont utilisées ensemble, cela signifie qu'elles pourront servir de point de référence pour des travaux de recherche futurs.

J'estime que la meilleure contribution que puissent apporter les analystes économiques serait de saisir la façon dont les flux technologiques circulent dans l'économie et stimulent la croissance économique, ce qui permettrait en outre d'élargir les ressources pour la collecte des informations. Je propose donc que le Bureau américain des brevets (U.S. Patent Office) imite l'initiative des Canadiens et aille plus loin. Il pourrait ainsi inviter chaque demandeur de brevet à spécifier la catégorie industrielle du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) dont relèverait l'invention (avec une disposition très générale pour les inventions des laboratoires de recherche à fonctions très larges et une option « indépendant » pour les inventeurs indépendants), ainsi que les principales industries susceptibles d'utiliser l'invention, les « industries auxquelles la société propriétaire de l'invention vend ses produits » et « tous les niveaux de l'économie » comme alternative aux inventions d'usage général. Une fois que les membres du

conseil en propriété industrielle seront habitués à demander aux inventeurs de fournir ces renseignements, cette tâche supplémentaire ne prendra plus qu'une minute, et permettra de recueillir de précieux renseignements sur la structure de l'économie.

Étayer ces renseignements dans le cadre des dépôts de demandes de brevets permettrait peut-être d'apporter une solution à ce qui constituait un problème mineur lors de mes travaux de recherche, il y a une vingtaine d'années, mais a pris des proportions majeures depuis : la mesure des flux technologiques importés. Ces travaux portaient sur les brevets délivrés entre 1976 et 1977, époque où la plupart des domaines technologiques industriels étaient dominés par les États-Unis et où 34,4 % de tous les brevets américains étaient délivrés pour des inventions attribuées à des résidents étrangers. À l'époque, la proportion des inventeurs étrangers augmentait rapidement. Entre 1966 et 1970, la part moyenne des inventeurs étrangers détenteurs de brevets américains n'était que de 22 % ; elle a grimpé à 47 % à la fin des années 1980 avant de revenir à 44 % au milieu des années 1990. Lorsque je menais mes premiers travaux de recherche, les États-Unis importaient de plus en plus de haute technologie (Scherer, 1992). À cette époque-là, il était encore possible d'ignorer l'importance des sources de technologie étrangères, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui. Admettre que les importations disséminent la technologie ou le fruit des activités de R-D selon les mêmes modèles d'utilisation que les sources de technologie nationales, comme des restrictions de données ont obligé le personnel de l'OCDE (1996, p. 26-27, p. 143) à le supposer, donne, au mieux, une approximation grossière de la contribution de la technologie importée. Pour obtenir une meilleure estimation, il y aurait lieu de demander aux inventeurs étrangers de préciser, comme le feraient les inventeurs américains, le secteur industriel d'où sont issues leurs inventions (des renseignements qui pourrait être ajoutés aux statistiques nationales sur la R-D) et les industries susceptibles d'utiliser leurs inventions[10].

J'ai gardé pour la fin le problème le plus difficile à résoudre dans le cadre des travaux de recherche futurs visant à élaborer une matrice des flux technologiques : obtenir des données exactes et fiables sur les activités de R-D de l'industrie d'origine. J'ai commencé mon projet à la fin des années 1970 parce que, pour la première fois, on pouvait disposer de données fiables sur les activités de R-D d'industries fortement ventilées, rendues accessibles dans le cadre du programme des LBD de la FTC. On a ainsi pu obtenir les rapports complets de quatre années – de 1974 à 1977 –, avant que des pressions politiques exercées par l'industrie américaine ne viennent mettre un terme à ce programme.

La solution la plus simple à ce problème serait de restaurer un programme de rapport des secteurs d'activité dans le cadre des études du Bureau du recensement (Census Bureau) de la NSF, qui permettrait de ventiler les

10. Pour des travaux novateurs reposant sur les données sur les brevets canadiens, voir Hanel (2000). Il ressort de différentes études que les inventions pour lesquelles des demandes de brevets sont déposées à l'étranger ont tendance à avoir, en moyenne, une plus grande valeur économique que les inventions brevetées uniquement sur le territoire national.

activités d'affaires plus finement qu'elles ne l'ont été par le passé, et de redoubler d'efforts pour convaincre les entreprises participantes que leurs données éclaireraient les dynamiques de l'économie américaine. Sinon, pour évaluer les flux technologiques intersectoriels, une autre façon de procéder consisterait à exiger des demandeurs de brevets de spécifier le secteur industriel d'origine et l'utilisation visée de leur invention. Auquel cas, les rapports annuels sur les dépenses en R-D des sociétés, accessibles au public, permettraient d'évaluer le coût moyen des activités de R-D par demande de brevet. Par ailleurs, les données des sociétés qui ne divulguent pas le montant de leurs activités de R-D pourraient être obtenues à titre confidentiel à partir des dossiers déposés au Bureau du recensement de la Fondation nationale des sciences.

Je conclurais en affirmant qu'il est tout à fait possible d'élaborer des matrices de flux technologiques dignes d'intérêt en se fondant sur des approches moins intensives en main-d'œuvre que celles que j'avais adoptées, il y a une vingtaine d'années. Mais avant que des progrès substantiels ne soient observés, il faudra améliorer les données obtenues auprès des industries dans le cadre des études annuelles sur la R-D ou des demandes de brevets.

Références bibliographiques

ARROW, K.J. 1962. Economic welfare and the allocation of resources for invention. Dans *The Rate and Direction of Inventive Activity, National Bureau of Economic Research Conference Report*. Princeton, NJ : Princeton University Press.

CARTER, A.P. 1970. *Structural Change in the American Economy*. Cambridge, MA : Harvard University Press.

ELLIS, E.D. 1981. The philosophy, construction, and uses of the Canadian Patent Data Base PATDAT. *World Patent Information* 3 : 13-18.

EVENSON, R.E., et JOHNSON, D. 1997a. Introduction : Invention input-output analysis. *Economic Systems Research* 9 : 149-160.

EVENSON, R.E., et JOHNSON, D. 1997b. Innovation and invention in Canada. *Economic Systems Research* 9 : 177-192.

KORTUM, S., et PUTNAM, J. 1997. Assigning patents to industries : Tests of the Yale technology concordance. *Economic Systems Research* 9 : 161-175.

GRILICHES, Z. 1979. Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth. *Bell Journal of Economics* 10 : 91-116.

GRILICHES, Z. 1995. R&D and productivity. Dans *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change*, Stoneman, P. (dir.). Oxford, UK : Basil Blackwell.

GUSTAFSON, W.E. 1962. Research and development, new products, and productivity change. *American Economic Review* 52 : 177-185.

HANEL, P. 2000. R&D, interindustry and international technology spillovers and the total factor productivity growth of manufacturing industries in Canada. *Economic Systems Research* 12 : 345-361.

MANSFIELD, E., RAPOPORT, J., ROMEO, A., WAGNER, S., et BEARDSLEY, G. 1977. Social and private rates of return from industrial innovations. *Quarterly Journal of Economics* 91 : 221-240.

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES. 1996. *Technology and Industrial Performance.* Paris, France : OCDE.

SCHERER, F.M. 1982a. Industrial technology flows in the United States. *Research Policy* 20 : 227-245.

SCHERER, F.M. 1982b. Inter-industry technology flows and productivity growth. *Review of Economics and Statistics* 64 : 627-634.

SCHERER, F.M. 1984. Using linked patent and R&D data to measure inter-industry technology flows. Dans *R&D, Patents and Productivity*, Griliches, Z. (dir.). Chicago, IL : University of Chicago Press, 417-461.

SCHERER, F.M. 1992. *International High-Technology Competition.* Cambridge, MA : Harvard University Press.

SCHERER, F.M. 1993. Lagging productivity growth : Measurement, technology, and shock effects. *Empirica* 20 : 5-24.

SCHERER, F.M. 2003. Technology flows matrix estimation revisited. *Economic Systems Research* 15 : 327-358.

SCHMOOKLER, J. 1966. *Invention and Economic Growth.* Cambridge, MA : Harvard University Press.

TERLECKYJ, N.E. 1974. *Effects of R&D on the Productivity Growth of Industries : An Exploratory Study.* Washington, DC : National Planning Association.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS. 1979. *The Detailed Input-Output Structure of the U.S. Economy* : 1972 (2 volumes). Washington, DC : USGPO.

U.S. FEDERAL TRADE COMMISSION. 1981. *Statistical Report : Annual Line of Business Report : 1974.* Washington, DC : USFTC.

CHAPITRE 8

LIENS POTENTIELS ENTRE L'ANALYSE D'ENTRÉE-SORTIE ET LES FLUX FINANCIERS†

LAWRENCE R. KLEIN
University of Pennsylvania

† Une version revue après la communication en session plénière du dimanche 13 octobre 2002 à la XIVe Conférence internationale de techniques d'analyses d'entrée-sortie est disponible en anglais dans Klein (2003).

Résumé

Ce chapitre pose que la comptabilité sociale peut tirer profit de la comptabilité quantitative, notamment en matière de logique et de consistance et souligne l'importance des flux financiers (FF) dans l'analyse macroéconomique. En effet, si la recherche sur les systèmes de comptes de revenus et de produits nationaux (CRPN) et entrées-sorties n'est toujours pas complétée, elle est déjà allée très loin et il importe désormais d'examiner les flux. L'utilisation des tableaux entrées-sorties sur l'hypothèse des coefficients techniques constants ne fait qu'induire en erreur. Il est possible de remédier à ces inconvénients en adoptant des systèmes à grande échelle disposant de bonnes séries chronologiques des données des CRPN et entrées-sorties, mais en renonçant aux procédés traditionnels. Puisque les techniques du système d'information mondial déterminent l'environnement dans lequel se font les FF internationaux, une infrastructure financière adéquate doit être mise en place pour assurer un contrôle rationnel du système.

Devant la négligence régnant dans les normes comptables des entreprises privées – fraude, zones d'ignorance, concepts arbitraires et normes laxistes – les chercheurs se doivent de montrer les profits que la comptabilité sociale peut tirer de la comptabilité quantitative, notamment en matière de logique et de consistance. Les nombreux problèmes qui se posent à l'heure actuelle s'expliquent entre autres par l'absence de normes dans l'établissement des comptes de bilan et des comptes de produits (pertes et profits), et ce, non seulement à l'échelle nationale, mais aussi et surtout à l'échelle internationale.

Il y aurait lieu, à mon avis, d'examiner le fonctionnement de l'économie par rapport à trois états de compte de premier plan :

- les comptes de revenus et de produits nationaux (CRPN) ;
- les comptes entrées-sorties ;
- les comptes de flux financiers (FF).

Les CRPN sont analogues aux comptes de résultats des entreprises. Les entrées-sorties, qui permettent de retracer le flux des opérations dans toute l'économie, prennent la forme de flux de biens et services, qu'ils soient finaux ou intermédiaires. Enfin, les FF sont principalement les différences premières qui ressortent des bilans détaillés et montrent les flux financiers par rapport à la formation de capital réel dans l'ensemble de l'économie. Dans le cadre de ce chapitre, je vais essayer de souligner l'importance des FF dans l'analyse macroéconomique. J'estime en effet que même si la recherche sur les systèmes CRPN et d'entrée-sortie n'est toujours pas complétée, elle est déjà allée très loin ; il importe désormais d'examiner les FF, et plus particulièrement en ce qui concerne l'interprétation de l'économie internationale à l'ère de la mondialisation.

Ce que j'appelle l'analyse classique des CRPN et d'entrée-sortie présente, à mon avis, deux limitations. La première vient du fait que l'analyse des CRPN ne tient que partiellement compte des pertes et profits en capitaux, quand elle n'en fait pas totalement abstraction. La seconde réside dans le rôle de la constance des coefficients dans une analyse dynamique à périodes multiples.

Au niveau macroéconomique le plus élevé, on cherche à « éliminer » les pertes et profits en capitaux, comme dans le cas de la réévaluation de la variation des stocks et de la dépréciation du capital immobilisé dans les bons systèmes de CRPN. Or, il y aurait lieu d'étudier « l'effet de richesse », soit les diverses évaluations d'actif en plus des données normales des CRPN dans l'analyse du comportement des ménages et des entreprises dans le temps.

À une époque caractérisée par d'importants changements technologiques, comme ceux que l'on a vécus depuis les années 1980, l'utilisation des tableaux entrées-sorties sur l'hypothèse des coefficients techniques constants ne fait qu'induire en erreur. Il est possible de remédier à ces inconvénients en adoptant des systèmes à grande échelle disposant de bonnes séries chronologiques des données des CRPN et entrées-sorties, mais à condition de renoncer aux procédés traditionnels.

Il convient de signaler à ce sujet l'excellent travail effectué par Frisch, Stone, Preston, pour ne citer qu'eux, sur les associations de modèles macroéconomiques fondées sur l'évaluation actuelle de la richesse, le flux des

intrants intermédiaires dans le processus de production, le remplacement des mesures de la production à **valeur ajoutée** par les mesures de la production **brute** et l'élargissement des fonctions de production de KLEM (acronyme de *Capital, Labour, Energy and Materials*, c'est-à-dire capital, main-d'œuvre, énergie et matériels). Ces travaux ont permis aux économètres d'aller très loin dans leurs études sur l'évolution des modèles sur les changements de comportement et de technologie. Or, ils en auraient été incapables s'ils n'avaient pas largement recouru aux systèmes CRPN et entrées-sorties. La plupart des économies publient des données détaillées sur les CRPN, souvent plusieurs fois par an (et très rarement mensuellement). Peu d'économies se sont dotées d'entrepôts dynamiques de données chronologiques entrées-sorties, quoiqu'un certain nombre possède ces informations essentielles à l'interprétation de l'évolution technique. Telle est la situation de ces développements.

Je vais maintenant aborder l'objet principal de ces remarques, à savoir la nécessité de constituer des entrepôts de données pour les FF, et de les mettre à jour annuellement, puis trimestriellement, voire mensuellement. J'irais même jusqu'à affirmer que pour vraiment comprendre les crises monétaires et financières qui ont frappé l'Amérique latine et l'Asie orientale (même la crise américaine des « *Savings & Loans* »), il faudrait utiliser des analyses sérieuses de FF.

Les crises monétaires nous ont permis de tirer plusieurs leçons :

- Il importe de retracer les **réserves** d'or et les avoirs en devises étrangères fréquemment et promptement.
- Il importe de rapporter la **qualité** des obligations du système bancaire tout aussi fréquemment et rapidement et de souligner plus particulièrement la performance des portefeuilles de prêts.
- Il convient de rapporter souvent la **composition** des actifs financiers (prêts productifs par rapport à prêts non productifs), et notamment de comparer les obligations souveraines et les obligations privées, la devise de désignation de l'actif et du passif financier, selon le type d'instrument, la séparation des mouvements de portefeuille et des investissements directs, et de faire examiner l'échelonnement des remboursements d'une dette et les cotes de solvabilité des titres par des agences de cotation de renom.
- Il faut veiller à la **transparence** des positions des titres auprès de tous les participants – aucun secret ni comptes confidentiels ; en d'autres termes, il faut assurer l'uniformisation des règles du jeu.
- Il faut utiliser les **normes comptables internationales** d'usage.

Puisque la mondialisation et les prouesses techniques du système d'information mondial déterminent l'environnement des flux financiers internationaux, une infrastructure financière adéquate doit être mise en place pour assurer un contrôle rationnel de ce système. Cette infrastructure devra être constituée d'institutions, telles que des bourses financières, des bourses de marchandises, des banques centrales et finalement un prêteur international de dernier recours travaillant de concert avec un tribunal international de faillite. Avant que les marchés ne soient autorisés à fonctionner ouvertement

et librement, tous les États souverains participants devront s'être dotés des institutions nécessaires et veiller à ce qu'aucune panne à répétition ne vienne en entraver le fonctionnement. Il y aura bien évidemment des crises, mais pourrons-nous vivre en paix si chaque décennie réserve plusieurs crises ?

À l'occasion de cette conférence, on pourrait se demander à quoi pourraient ressembler les FF nécessaires pour que le système puisse bien fonctionner.

Dans le cadre d'une conférence organisée sous l'égide des Nations Unies, en 1998, John Dawson a élaboré (en se basant sur les travaux de Morris Copeland) un modèle fortement agrégé de la Lituanie en 1995 et a simplifié ses flux financiers, qu'il a représentés sous la forme d'un schéma de matrice entièrement équilibré. Son initiative s'inscrivait dans le cadre d'un projet exploratoire mené sous les auspices de la Banque mondiale. Il s'agit essentiellement d'une matrice des sources et des utilisations, dotée de quatre secteurs (gouvernement central, secteur bancaire, secteur privé et reste du monde). Cette matrice, illustrée par le tableau 8.1, est liée à l'épargne et à l'investissement qui proviennent des CRPN de la Lituanie et des instruments suivants : réclamations étrangères, dette du gouvernement central, crédit privé, liquidités et comptes de différences.

Pour les besoins de la présente discussion, cette matrice a une fonction purement descriptive, car pour être utilisable, il faudrait lui ajouter des secteurs. Ainsi, il faudrait diviser le secteur bancaire en secteur privé et banque centrale, puis diviser le secteur privé en secteur financier (non bancaire) privé, secteur commercial non financier et secteur des ménages.

Sous cette forme agrégée, la matrice des FF est explicitement liée à l'investissement (formation de capital brut) et à l'épargne, qui peuvent provenir des CRPN. Le lien avec les comptes entrées-sorties peut ne pas sembler manifeste de prime abord. En revanche, dès que l'on divise les secteurs commercial et financier en différents types d'entreprises, par industrie, et en types d'institutions financières, par secteur industriel (agences d'assurance, de courtage et immobilières et autres secteurs des services), les liens directs avec les entrées-sorties deviennent plus évidents.

Les entrées du tableau 8.1 sont indiquées en prix courants. Les systèmes de CRPN doivent également être indiqués en prix courants, s'ils doivent afficher un plein équilibre entre les revenus et les dépenses, c'est-à-dire si les identités comptables se confirment. Les trois systèmes doivent être reliés par des liens explicites aux marchés, où sont déterminés les prix, les taux d'intérêt et les salaires. Ces derniers sont essentiels pour comprendre et utiliser les systèmes FF dans le cadre des politiques et des applications prévisionnistes. D'ordinaire, les modèles économétriques détaillés utilisant les données des CRPN et entrées-sorties devraient introduire des équations (ou une seule) pour déterminer un instrument d'intérêt, tel un taux à très court terme, ou, comme dans la plupart des cas, un taux de financement à un jour, un taux de bons du Trésor, un taux d'escompte ou bien un taux de l'argent au jour le jour.

TABLEAU 8.1

Matrice des flux financiers de la Lituanie, 1995 (en millions de litas)

	Gouvernement central		Secteur bancaire		Secteur privé		Reste du monde		Total	
	U	S	U	S	U	S	U	S	U	S
1 Formation de capital brut	925				4 464				5 389	
2 Épargne brute		368		120		3 529		1 372		5 389
3 Surplus/déficit de l'activité nette*	–557		120		–815		1 372			
Changements observés :	**Actif financier**	**Passif**	**Actif financier**	**Passif**	**Actif financier**	**Passif**	**Actif financier**	**Passif**	**Actif financier**	**Passif**
4 Réclamations étrangères nettes			424					424	424	424
5 Dette du gouvernement central		980	–75		279		776		980	980
6 Crédit privé	461		651			1 808	696		1 808	1 808
7 Monnaie et quasi-monnaie				1 348	1 348				1 348	1 348
8 Divers et différences		38		–468		754	324		324	324
9 Total	1 386	1 386	1 000	1 000	6 091	6 091	1 796	1 796	10 273	10 273

* Les valeurs positives du troisième rang indiquent un surplus et représentent le montant net des prêts ; les valeurs négatives indiquent un déficit et représentent un besoin net de financement.

En analyse macroéconomique, on parle souvent « du » taux d'intérêt ; or, il s'agit purement et simplement d'une expression simplifiée à des fins pédagogiques. Dans la pratique, de nombreux économètres résolvent le problème de la grande multiplicité des taux en recourant à la courbe de rendement, qui est un spectre de taux pour les instruments déterminés en fonction d'un risque donné et d'échéances variables. Il pourrait ainsi s'agir d'une courbe des taux d'une émission souveraine donnée, calculée en fonction de sa maturité, ou de celle d'une dette assujettie aux mêmes dispositions contractuelles. S'il permet de conserver les modèles les plus simples et donc les plus faciles à gérer, ce dispositif est loin d'être un modèle d'exactitude en matière d'analyse des conditions de crédit. Il y aurait donc lieu d'utiliser un spectre des taux d'intérêt associés à l'équilibre de l'offre et de la demande dans certains domaines, comme :

- la dette publique, par ordre de gouvernement ;
- l'endettement d'entreprise, par cote ;
- les obligations de prêt au taux préférentiel ;
- la dette à la consommation ;
- la dette hypothécaire ;
- les prêts aux courtiers en valeurs mobilières ;
- le crédit commercial ;
- les prêts sur récolte agricole ;
- les crédits à l'exportation et à l'importation ;
- les avances sur police d'assurance-vie ;
- etc.

À l'inverse des courbes de rendement d'une dette souveraine uniforme, ces spectres ne doivent pas présenter de courbes régulières ni de pentes bien définies selon le niveau de maturité. Les titres de créances utilisent différentes caractéristiques pour déterminer les relations entre l'offre et la demande, contrairement à l'analyse des cycles économiques, qui recourent souvent à la forme simplifiée des courbes de rendement. Même dans les cas les plus favorables et les plus simples à résoudre, on sait que les courbes de rendement classiques peuvent être aussi bien normales (pente positive à l'échéance), qu'abruptes, faiblement inclinées ou encore **inversées**. Chacune de ces courbes a une interprétation différente du cycle d'affaires, mais elles ne sont pas reconnues pour leur stabilité.

Après la guerre du Golfe de janvier 1991, la Réserve fédérale américaine n'a cessé de réduire les taux d'intérêt à très court terme ; or, la reprise économique dite « sans emploi » a persisté tout simplement parce que les taux à long terme, élevés, ne se sont pas alignés sur ceux des fonds fédéraux, qui avaient été ciblés avec précision. La difficulté résidait dans le fait que l'analyse de la courbe de rendement était inefficace et particulièrement imprécise au regard des changements structurels survenus dans le secteur économique de l'information.

Une nouvelle approche prônant l'établissement d'un modèle FF s'imposait. Il ne suffisait pas de remarquer que les tableaux de flux financiers étaient déjà abondamment disponibles ; il fallait également signaler que l'on n'y recourait pas systématiquement pour élaborer un type de modèle contenant des FF détaillés.

Il serait judicieux de s'inspirer des célèbres tableaux et techniques d'analyses d'entrée-sortie et de dresser des tableaux FF qui permettraient d'illustrer la progression du financement de l'économie réelle sur une base individuelle, par type d'instrument financier. Par nature, l'analyse des FF ressemble à l'analyse d'entrée-sortie. Voici la définition d'un ensemble élémentaire de relations de FF :

b_i = problème du $i^{\text{ième}}$ passif (dette),

a_j = détention d'instruments d'actif par le $j^{\text{ième}}$ secteur, $j = 1, 2, \ldots, n$,

w_j = avoirs nets du secteur j.

Le montant impayé du $i^{\text{ième}}$ passif est $b_i = b_{i1} + b_{i2} + \ldots + b_{in} \cdot b_{ij}$ est le montant du $j^{\text{ième}}$ passif du secteur j.

Définissons maintenant les coefficients

$$d_{ij} = b_{ij} / w_j$$

ce qui montre que le $i^{\text{ième}}$ passif détenu par j représente une fraction de l'avoir total de j.

Les avoirs financiers totaux du $j^{\text{ième}}$ secteur se définissent comme suit :

$$w_j = a_j + k_j = a_{j1} + a_{j2} + \ldots + a_{jm} + k_j$$

Les éléments a_{ij} de la matrice A représentent les $i^{\text{ième}}$ avoirs en titres du secteur $j^{\text{ième}}$ et k_j est le capital non financier du $j^{\text{ième}}$ secteur. Définissons :

$$c_{ji} = a_{ji}/\mathrm{b_i}$$

pour représenter les $j^{\text{ième}}$ avoirs en titres du $i^{\text{ième}}$ secteur, qui ne sont qu'une fraction de l'émission totale de b_i. Les équations de la matrice correspondantes sont :

$$\mathbf{b} = \mathbf{Dw} \qquad \mathbf{w} = \mathbf{Cb} + \mathbf{k}$$

k, **b**, **w** étant des vecteurs-colonnes, et **C** et **D** des matrices rectangulaires.

$$\mathbf{w} = \mathbf{CDw} + \mathbf{k} \qquad \mathbf{w} = (\mathbf{I} - \mathbf{CD})^{-1}\,\mathbf{k}$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{DCb} + \mathbf{Dk} \qquad \mathbf{b} = (\mathbf{I} - \mathbf{DC})^{-1}\,\mathbf{Dk}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{w} - \mathbf{k} = \mathbf{CDw}$$

Ces équations s'apparentent aux formulations entrée-sortie pour les systèmes rectangulaires des biens (1, 2, …, m) et des industries (1, 2, …, n). Si l'on veut obtenir les estimations stables des coefficients dans **D** et **C**, on peut calculer **A** et **B**. Les coefficients d_{ij} et c_{ij} devraient évoluer au même rythme que les taux d'intérêt et que les technologies de l'information.

Dans le cas de l'analyse d'entrée-sortie, l'inconstance ou l'instabilité des coefficients techniques a_{ij} incorporés dans la formule classique :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\,\mathbf{f}$$

présentent le même problème. Pour y remédier, on a besoin de doter la matrice d'une suite de tableaux entrées-sorties complète, élaborée sur une base de préférence annuelle.

$$\mathbf{A} = \|\mathbf{a}_{ij}\|.$$

On peut estimer les éléments temporalisés de $\mathbf{A}_t$ ou, en l'occurrence, de f_t dans l'analyse d'entrée-sortie, de nombreuses manières (Preston, 1972). Une façon intéressante de traiter les changements techniques et autres ainsi que leur incidence sur les systèmes d'entrée-sortie consiste à évaluer les fonctions de production de KLEM, qui ont été élargies afin d'englober les entrées d'information (KLEMI ; **I** = entrées d'information ; Klein *et al.*, 2003).

Une méthode d'analyse FF analogue consisterait à évaluer c_{ji} et d_{ij}, qui présentent des variations temporelles et sont sujets à de nombreuses fluctuations. Dans le cadre de nombreuses analyses monétaires macroéconomiques, on a tenté de lier la vélocité de la circulation des soldes monétaires

$$\text{PNB} / \text{M}_i = V_i \ (r_j, \ r_k \ p)$$

aux variables des marchés, où

PNB = produit national brut

M_i = soldes monétaires (i = 0, 1, 2, 3…)

V_i = vitesse de circulation

r_j, r_k = taux d'intérêt pertinents

p = niveau des prix (ou taux d'inflation)

Cette relation pourrait très bien cadrer avec l'approche conventionnelle des structures à terme. Pour des chercheurs classiques très stricts, V_i est une constante institutionnelle qui remonte à Kalecki (1941) et à Keynes (1930). Notons qu'avant l'ère de la théorie générale, on définissait l'interprétation de la préférence pour la liquidité comme une relation entre la vitesse de circulation et le taux d'intérêt.

Dans le cadre des FF, nous pouvons calculer le taux de base de certains actifs et passifs par rapport aux totaux (b_i, a_j, et w_j) en tant que fonctions des taux d'intérêt pertinents et des taux d'inflation, que la réalisation de l'équilibre du marché ou les écarts du marché permettent de déterminer.

S'il est évident que la vitesse de la vélocité est un taux de flux par rapport à un stock, il n'y aucune raison pour que ce type de ratio soit plus naturel que les taux entre les stocks d'avoirs et de passifs financiers. Si la vélocité de circulation était un paramètre réel, comme bon nombre de spécialistes de la théorie quantitative de la monnaie aimeraient le croire, nous pourrions la considérer comme une tendance constante ou connue. Malheureusement, cette hypothèse n'est ni utile, ni valide. Elle doit être évaluée par les institutions qui se penchent sur la rémunération des facteurs et l'évolution technologique. Ces dernières ont d'ailleurs fortement abaissé les ratios de la vélocité de circulation, qui, s'ils ont affiché un cours normal dans les dernières décennies, n'en sont pas moins devenus instables en raison des conditions

du marché monétaire actuel. En ce sens, ils ne sauraient être plus pertinents que les taux des éléments illustrés dans les tableaux FF pour orienter les comportements ou l'élaboration de politiques.

La tourmente économique qui a récemment agité les marchés financiers a souligné l'importance qu'il conviendrait d'accorder aux nouveaux taux, tels que les pourcentages des crédits non productifs, la composition structurelle des entrées et des sorties de capitaux internationaux, les échelonnements de la dette, la composition dominante des obligations de paiement, les indicateurs des primes en fonction du risque. Tous ces critères sont implicitement illustrés dans les tableaux des comptes FF. Les objectifs devraient être les suivants :

i) Commencer par élaborer des FF détaillés, exhaustifs et réguliers ;

ii) Combiner les FF avec des variables d'équilibre des marchés associés, tels que des taux d'intérêt, des salaires ou des prix ;

iii) Élaborer des systèmes d'équation simultanée, au-delà des égalités fondamentales afin d'expliquer les entrées dans les FF ;

iv) Surveiller et traiter la contribution de ces systèmes à la compréhension des flux observés dans les économies nationales et globales ;

v) Ne pas éliminer ni supprimer les profits ni les pertes en capitaux du système de flux financiers totaux. Ils sont essentiels à la compréhension des dynamiques sous-jacentes.

Références bibliographiques

KLEIN, L.R. 2003. Some potential linkages for input-output analysis with flow-of-funds. *Economic Systems Research* 15 : 269-277.

KLEIN, L.R., DUGGAL, V., et SALTZMAN, C. 2004. Contributions of input-output analysis to the understanding of technical change : The information sector in the United States. Dans *Wassily Leontief and Input-Output Economics*, Dietzenbacher, E., Lahr, M.L. (dir.). Cambridge, UK : Cambridge University Press.

KALECKI, M. 1941. The short-term rate of interest and the velocity of cash circulation. *The Review of Economic Statistics* 23 : 97-99.

KEYNES, J.M. 1930. *Traité sur la monnaie*. New York : Harcourt Brace.

PRESTON, R.J. 1972. *The Wharton Annual and Industry Forecasting Model*. Philadelphie, PA : Unité de recherche économique.

PARTIE 3

WASSILY LEONTIEF ET LES ESSAIS DU CONCOURS POUR LE PRIX LEONTIEF 2002

Ceux et celles qui veulent en savoir plus long sur ce grand chercheur et penseur du XX^{e} siècle devraient lire *Wassily Leontief and Input-Output Economics* par Erik Dietzenbacher et Michael Lahr (dir.) (2004), Cambridge, UK : Cambridge University Press, dont nous présentons la traduction du chapitre 9.

À chaque conférence de l'International Input-Output Association un concours est organisé pour le meilleur texte de la conférence présenté par un auteur de moins de 40 ans. Les chapitres 10, 11 et 12 qui suivent furent présélectionnés comme les meilleurs et présentés le 14 octobre 2002 à Montréal ; le chapitre 12 renferme le texte du lauréat du prix Wassily-Leontief 2002.

CHAPITRE 9

QUELQUES JALONS DANS LA VIE DE WASSILY LEONTIEF†

Entrevue avec Estelle et Wassily Leontief

CHRISTIAN DEBRESSON‡
Université du Québec à Montréal et
Tsinghua University

† La version originale en anglais de ce chapitre est parue dans : DeBresson, 2004. Some highlights in the Life of Wassily Leontief : An interview with Estelle and Wassily Leontief. Dans *Wassily Leontief and Input-Output Economics*, Dietzenbacher, E., Lahr, M.L. (dir.). Cambridge, UK : Cambridge University Press, 135-147. Les directeurs de cet ouvrage remercient Cambridge University Press pour la permission qui leur fut accordée de publier la traduction en français de ce texte.

‡ La présente entrevue a été retranscrite par Ina Drejer et revue par Ina Drejer et Christian DeBresson. Le texte a été révisé à l'automne 1997 par Wassily et Estelle Leontief. Michael Lahr et Erik Dietzenbacher nous ont ensuite fait plusieurs suggestions, mais ne peuvent être tenus responsables des éventuelles maladresses.

Résumé

Les travaux de Wassily Leontief sont amplement connus, mais l'on en sait bien peu sur sa vie. Dans cette entrevue informelle réalisée vers la fin de la vie de Leontief, Christian DeBresson parle avec Wassily et sa femme Estelle, de sa vie et de ses influences, depuis ses années de jeunesse en Russie et en Allemagne, de ses rencontres avec d'autres grands intellectuels, jusqu'à l'établissement de ses vieux parents aux États-Unis et à ses démêlés avec le maccarthysme.

1. Le contexte

Il n'existe pas encore de biographie de Wassily Leontief. Pour se familiariser avec sa tendre enfance à Saint-Pétersbourg, avec sa famille russe, ses rapports avec sa mère et avec sa propre famille aux États-Unis, on peut néanmoins lire un court ouvrage écrit par son épouse, Estelle Leontief : *Genia & Wassily – A Russian-American Memoir*[1]. Mais la biographie de cet homme et de ce scientifique remarquable – le seul véritable génie que j'ai eu le privilège de rencontrer dans ma vie – reste à écrire. Il va de soi que ce qui suit n'en a pas l'ambition.

Je compilais et lisais les écrits de Leontief dans leur séquence chronologique pour tâcher de mieux appréhender l'œuvre de cet homme qui a été pour moi un modèle pour la recherche. Ses idées n'en demeuraient pas moins toujours voilées (sans doute trouverez-vous certaines de ses déclarations ci-dessous toujours quelque peu elliptiques ou synthétiques, voire énigmatiques). Je connaissais les contextes historiques, les économistes qui l'avaient précédé ainsi que ses contemporains. Mais quelque chose manquait. La plupart des entrevues avec lui traitaient de l'histoire des idées et cherchaient à situer son œuvre par rapport aux autres économistes. Souvent, ces entrevues, menées à différentes époques, donnaient lieu à des interprétations divergentes quant aux relations avec ses pairs. Il m'est alors apparu que quelque chose m'échappait dans ma tentative de comprendre l'homme : le lien avec son entourage, sa vie et ses attitudes, et son œuvre.

Alors que j'allais partir pour la seule année sabbatique de ma carrière – en Chine –, je décidai de demander aux Leontief une entrevue qui porterait sur sa vie. J'avais eu l'honneur de m'entretenir avec lui une demi-douzaine de fois auparavant ; mais c'était toujours lui qui m'interrogeait à propos de mon travail sur l'innovation. Cette fois, j'allais lui poser des questions à propos de lui-même. Les Leontief ont accepté de m'accorder cet entretien et en ont choisi le lieu et la date : le *Knickerbocker Bar & Grill*, l'un de leurs endroits préférés à New York, près de Washington Square, où ils habitaient, le samedi 5 avril 1997. Deux jours plus tôt, il avait glissé chez lui sur un tapis, se brisant une côte. Accompagné d'Estelle, il est venu à pied, avec des béquilles. Je leur ai présenté Ina Drejer, qui allait m'aider à prendre des notes et transcrire l'enregistrement, et nous nous sommes assis à leur table habituelle, au fond à droite. Une conversation décontractée s'ensuivit.

1. Estelle Leontief, *Genia & Wassily – A Russian-American Memoir* (Somerville, MA : Zephyr Press, 1987). Ce mémoire est un récit intemporel, une réflexion sur les rapports ambivalents d'une épouse avec sa belle-famille. Il évoque à la fois une certaine fascination pour ces beaux-parents et un besoin pressant de les tenir, tout charmants qu'ils soient, à distance. Ce petit livre est d'un intérêt littéraire qui va au-delà de la vie des Leontief. Même ceux qui ne connaissent rien de l'économiste ou n'ont pour lui aucune curiosité ne seront pas déçus de leur lecture. Parce qu'il dévoile des relations humaines complexes, rarement examinées sérieusement, cet ouvrage amène le lecteur, en tant qu'ami proche, tout droit dans le salon de la famille Leontief.

2. L'entrevue

Christian DeBresson : Que vous rappelle votre vie d'étudiant à Saint-Pétersbourg pendant la révolution russe ?

Wassily Leontief : Jeune étudiant à l'université, je lisais tout le temps. J'ai lu pratiquement tous les économistes depuis le début du XVII^e siècle. Je les lisais l'un après l'autre.

N'étiez-vous pas étudiant en philosophie en même temps ?

WL : Seulement pendant peu de temps.

N'avez-vous jamais pensé vous consacrer à un autre domaine, faire quelque chose d'autre ?

WL : Non. J'ai toujours su ce que je voulais faire. En ce sens, j'ai eu de la chance.

Quels sont les auteurs dont vous vous souvenez le mieux de cette époque de lecture intensive ?

WL : Difficile à dire, car j'ai une très mauvaise mémoire. Bien sûr, Karl Marx. Je pense qu'il est certainement le plus grand des économistes classiques. Il avait vraiment compris comment fonctionne le système capitaliste. Il n'était pas mathématicien ; sa théorie était une espèce de théorie du travail. Je crois qu'aujourd'hui une personne ignorant tout des affaires apprendrait beaucoup de l'économie de marché capitaliste grâce à Marx ; [sa vision] est tellement vaste. *Das Kapital* est bien meilleur que n'importe lequel des manuels traditionnels. C'est d'une richesse !

Pendant la révolution russe, est-ce qu'un événement en particulier vous a marqué émotionnellement ?

WL : Ma famille était une famille d'intellectuels typiques ; une partie travaillait dans l'industrie textile. Mon père était professeur d'économie, non pas de théorie économique, mais d'économie du travail et de ses aspects sociaux. J'étais contre les communistes et cela m'a valu d'être arrêté à l'âge de 15 ans. Je n'avais fait qu'exprimer ouvertement mes opinions.

Vous rappelez-vous quelle était cette opinion ?

WL : Probablement mon refus de la dictature. Je dois dire cependant que j'avais de nombreux amis étudiants qui étaient communistes, et nous discutions beaucoup.

Estelle Leontief : L'histoire que tu racontes est chaque fois un peu différente. J'y vois quelque chose de nouveau chaque fois que tu la racontes.

WL : À l'époque, mes opinions étaient sans doute socialistes, mais j'avoue que mes idées à propos des systèmes économiques et sociaux ont quelque peu évolué. Je pense cependant que le système capitaliste actuel devra nécessairement changer ; il changera. Il est impossible qu'un système ne change pas.

Quand avez-vous quitté la Russie ?

WL : En 1925.

EL : Il avait un bon prétexte : il s'était fait opérer à la mâchoire en Union soviétique. Les essais pour sa nouvelle mâchoire devaient se faire à Berlin.

WL : Ma sortie en a été grandement facilitée parce qu'ils pensaient que de toute façon j'allais mourir. À l'époque des communistes, les permis de sortie étaient difficiles à obtenir. Je suis allé à Berlin. Mon père avait été élevé en allemand. Moi, je parlais allemand et français ; j'avais lu les plus grands économistes en allemand et en français. Cela m'a beaucoup aidé pour vivre en Allemagne. C'était sous la République de Weimar, une époque si intéressante ! J'ai obtenu mon doctorat à Berlin.

Qui était votre directeur : Bortkiewicz ou Sombart ?

WL : Les deux. C'était une codirection. Le professeur Sombart était un homme très intéressant ; c'était un vrai penseur de sciences sociales. J'ai suivi ses séminaires ; ils étaient riches en idées.

De qui avez-vous le plus appris ?

WL : Bortkiewicz. Quel mathématicien intelligent ! Avec Sombart qui venait des sciences sociales mais ne connaissait pas les mathématiques, ils se complétaient tous les deux parfaitement. Depuis le début, j'étais convaincu que la théorie économique avait besoin des mathématiques ; les mathématiques sont indispensables. C'est pourquoi je travaillais avec les deux. Je l'avais décidé depuis le tout début.

La vie intellectuelle de Berlin à l'époque vous fascinait-elle ?

WL : Ce fut une époque remarquable. La République de Weimar et la société allemande m'apparaissaient très intéressantes. J'y ai participé autant que j'ai pu.

EL : Tu ne m'as pourtant pas donné l'impression de te rendre bien souvent dans les cafés pour aller discuter avec les autres étudiants ; tu n'avais pas du tout une vie de café. (*Se tournant vers moi)* Wassily était pauvre, très très pauvre. Et tu n'avais pas d'argent à dépenser dans les cafés. J'ai plutôt l'impression, par ce qu'il m'a raconté, qu'il menait une vie très solitaire ; il vivait isolé, sauf lorsqu'il travaillait avec ses professeurs.

WL : J'avais quand même de longues discussions avec les étudiants. On bavardait. Après, bien sûr, j'ai commencé à travailler sur ma thèse : l'économie nationale comme processus circulaire. Il s'agissait d'une idée que je qualifierais [rétrospectivement] de néoclassique. La conception de l'économie en tant que système fondé sur l'équilibre de l'offre et de la demande ne me satisfaisait pas. C'est pourquoi j'ai tenté de donner un cadre pour l'étude de l'interdépendance des cellules individuelles dans l'économie.

Beaucoup, comme Joan Robinson, se demandent toujours – et je trouve cela ennuyeux et stérile – si vous êtes walrassien ou classique.

WL : C'est dépourvu d'intérêt. J'ai mon propre système.

Donc l'idée d'entrée-sortie était déjà présente dans votre thèse ?

WL : Oui. À l'époque, bien sûr, je mettais davantage l'accent sur l'aspect théorique. D'un autre côté, même si je m'intéressais beaucoup à différentes approches théoriques, j'ai toujours pensé que les économistes n'accordaient pas assez d'importance aux faits empiriques. Je me disais : « Je veux mettre au point un cadre théorique qui permette l'analyse détaillée des opérations d'une économie nationale. » C'était ce qui m'importait le plus.

Vous intéressiez-vous davantage à l'économie nationale qu'internationale ?

WL : Oui, tout à fait. Quoique c'est difficile à dire… À l'époque, ça ne m'intéressait pas d'améliorer les opérations de l'économie. Je cherchais juste à comprendre comment elle fonctionne. J'avais vu trop d'économistes essayer d'améliorer [ces opérations] sans chercher à les comprendre. Ce n'est qu'après 1936 que j'ai travaillé à l'amélioration du processus économique.

Vos premiers tableaux entrées-sorties vous en ont donné les moyens ?

WL : Oui ! Il faut que coopèrent la formulation théorique et les analyses empiriques. La théorie est la base qui permet l'analyse empirique. Par exemple, je ne suis jamais devenu keynésien. Très tôt, j'ai critiqué Keynes parce qu'il était trop pragmatique. En d'autres termes, il a mis au point sa théorie pour servir son projet politique. Moi, au contraire, je ne me rappelle pas avoir jamais préconisé quelque instrument de politique économique.

Mais Keynes avait des intuitions extraordinaires à propos de la théorie… et de la façon de devenir riche.

EL : Et de faire de King's College de Cambridge un collège riche.

WL : Sans aucun doute, c'était un homme extrêmement intelligent… La théorie est une question d'attitude. Je crois très fort en l'importance fondamentale de la théorie. L'analyse empirique est inutile sans analyse théorique. Au fil des ans, je me suis penché de plus en plus sur l'évolution, le changement, le développement, etc. On peut difficilement comprendre les opérations d'une économie si l'on ignore comment elles se sont développées.

Quel est le rapport avec votre idée de l'équilibre ?

WL : L'équilibre n'est essentiellement qu'une expression mathématique de l'interdépendance. Au concept d'équilibre, je préfère celui d'« interdépendance ». L'économie ne vit pas en équilibre ; elle ne fait que s'en éloigner. C'est là [que réside] la cause principale du développement économique ; et, bien sûr, la technologie y est cruciale. À mon avis, Marx avait compris l'importance de la technologie. Je pense que le progrès technologique est toujours, et plus particulièrement aujourd'hui, l'un des moteurs du changement économique. Et le changement économique est le moteur du changement social.

Pour vous, le changement technologique est en grande mesure un facteur exogène au système économique ?

WL : Il est en étroite relation avec le changement scientifique.

À part Marx, avez-vous fait d'autres « rencontres » qui vous aient convaincu de l'importance de la technologie ? Des visites d'usines ? Des contacts avec des ingénieurs ?

WL : Non. Il est difficile pour un économiste d'entretenir de bons contacts avec un ingénieur. J'ai passé ma jeunesse à un projet de recherche en sciences sociales. L'importance de la technologie a pris de plus en plus de place.

Pourtant, votre fonction de la production, comme celle de Ragnar Frisch, est très proche du monde de la production des ingénieurs.

WL : Je n'ai rencontré Ragnar Frisch que peu de fois. Tous deux nous utilisions les mathématiques. Nous avions certaines divergences, mais, avec le recul, je crois que nos idées se ressemblaient beaucoup ; nos fonctions de la production étaient très proches et complémentaires.

Pour en revenir à votre carrière, si vous l'aviez voulu, vous auriez facilement pu obtenir un poste en Allemagne. Qu'est-ce qui vous a décidé à partir ?

WL : J'étais à Kiel à l'Institut d'économie mondiale. À ce moment-là, la victoire du national-socialisme était évidente. En 1929, j'ai fait un long voyage avant de passer un an en Chine à planifier leur chemin de fer. J'ai pris le mode de transport et la voie les plus lents pour me rendre en Chine : le bateau, en passant par l'Arabie et l'Inde. Cela m'a permis de connaître un peu les pays moins développés. C'était pour moi le premier contact. La Russie, lorsque je l'ai quittée, était déjà industrialisée, avec surtout son industrie textile. Plus tard, je suis retourné à Kiel dans le même emploi qu'avant mon départ pour la Chine. C'est de là que je suis parti pour les États-Unis.

Passons à une question plus personnelle. Jusqu'alors vous n'étiez en fait qu'un solitaire ?

WL : C'est vrai, vous avez raison. J'ai rencontré Estelle un peu après mon arrivée aux États-Unis.

EL : Cela dit, à Kiel, il faisait de l'équitation, de la voile ; il s'amusait vraiment. À New York, l'une des premières choses que nous avons faites ensemble, c'est nous habiller élégamment, lui en habit et moi en robe du soir, pour aller au *Cab Calloway's Cotton Club*. À New York à cette époque, on pouvait se promener sans crainte sur la 7e Avenue.

Qu'est-ce qui vous a convaincu de rompre avec cette vie de solitaire ?

WL : Le fait de lui parler. Je l'ai rencontrée à la Maison internationale (*International House*).

EL : Des étudiants de partout dans le monde venaient vivre à la Maison internationale. Ils n'y restaient que le temps de trouver un logement permanent. Wassily, lui non plus, n'y est pas resté longtemps. J'y étais allé pour y voir des amis. Je l'ai surpris à me regarder sans arrêt… jusqu'à temps que je l'invite à prendre un chocolat avec nous. Et depuis, il n'a cessé de m'accompagner et nous avons voyagé autour du monde ; il m'a emmenée partout où il était allé auparavant. Il travaillait [alors] pour le National Bureau of Economic Research (NBER) à New York.

WL : C'est Simon Kuznets qui est venu me chercher sur le bateau [à mon arrivée] et m'a amené directement au Bureau (NBER). À cette époque, l'approche y était empirique : Mitchell, Burns, Mills – sont ceux dont je me souviens. De mon côté, c'était la théorie qui m'intéressait et j'y dirigeais des séminaires théoriques.

L'importance qu'ils accordaient aux faits économiques vous plaisait, non ?

WL : C'est vrai ; mais je n'appréciais pas leur manque de théorie.

En rapport avec l'utilisation de données économiques, vous ne semblez pas employer la théorie de la probabilité. Pourtant, grâce à vos études avec Bortkiewicz, vous connaissez bien le domaine.

WL : Effectivement. Il est malaisé d'employer la théorie de la probabilité, parce qu'elle est trop générale ; elle s'applique à n'importe quoi. Je ne connais aucun économiste qui se fonde véritablement sur la théorie de la probabilité – elle est bien trop générale.

De nombreux économètres, depuis la « révolution de Haalvemo », plaident pourtant en faveur d'utiliser la théorie des probabilités. Ça ne semble pas vous avoir touché.

WL : Non. Vous savez, je ne suis pas un économètre typique. Je maîtrise les mathématiques et les probabilités. Je suis peut-être l'un des membres fondateurs de la Société d'économétrie. Mais je ne pense pas que les mathématiques résolvent les problèmes. Elles sont très utiles, mais n'apportent pas de solution aux problèmes. J'ai maintenant 91 ans ; plus j'observe l'économie et les sciences sociales, et plus je trouve que les idées de Darwin en sont le moteur intellectuel. Darwin a été l'un des plus grands scientifiques du XIX^e^ siècle. Il débordait d'idées. D'idées très importantes. L'économie, en tant que théorie de la concurrence, est darwiniste. En fin de compte, Darwin a tiré certaines de ses idées des économistes classiques, si je ne me trompe.

De Malthus, qui lui, les a tirées de Smith. Le darwinisme est, en partie, un raisonnement économique. Un économiste d'Ålborg, au Danemark, tente de réconcilier l'analyse de la structure d'un système économique interdépendant avec celle de l'évolution.

WL : Je partage tout à fait cette préoccupation. La structure d'un système est très importante. C'est d'ailleurs pour cela que j'ai proposé une analyse de l'économie en entrées-sorties. Pour obliger les économistes à réellement étudier les faits, non isolés mais selon leur interdépendance économique. Et pas sans théorie. Pour servir l'analyse d'entrée-sortie, j'ai mis au point une théorie formalisée mathématiquement ; et pour donner un élan à l'analyse empirique, j'ai moi-même compilé à partir de faits observés, les premiers tableaux entrées-sorties.

Au cours de l'élaboration des premières matrices, l'idée d'abandonner ne vous a jamais effleuré ?

WL : Non. J'ai eu de la chance. La première grande matrice entrées-sorties pour les États-Unis a été élaborée par l'U.S. Air Force pour planifier la production de guerre. J'ai aussi travaillé sur le premier ordinateur.

Bernard Cohen dit que je suis le premier scientifique à utiliser un ordinateur. Le premier ordinateur utilisable – il y en avait deux, un à Harvard et l'autre au MIT – avait été construit par un professeur ; il n'était pas un grand mathématicien, mais un ingénieur. L'électronique n'avait pas encore été inventée. Cet ordinateur était une énorme machine alliant la mécanique et l'électricité, comme une imprimante. Et j'ai été la première personne, peut-être la seule, à utiliser cet ordinateur-là.

Par conséquent, vous avez dû prêter beaucoup d'attention aux récents développements technologiques. L'un des rares scientifiques qui s'intéressaient, dès cette époque, aussi aux ordinateurs était von Neumann. Ne l'avez-vous jamais rencontré ?

WL : Oui, je l'ai rencontré. Je m'en souviens : nous avons vécu une expérience intéressante ensemble. Nous n'étions pas d'accord. Il avait publié un article dans lequel il proposait une méthode pour résoudre un système d'équations simultanées à plusieurs variables. Cet article n'avait pas de sens ; c'était d'une confusion ! Je ne pouvais pas être d'accord avec son approche. En tant qu'économiste, j'avais déjà travaillé à résoudre un système à plusieurs équations simultanées en choisissant un ensemble de contraintes et de constantes… C'est vrai, comme dit von Neumann, qu'un système d'équations simultanées peut être en soi très difficile à résoudre. Un système économique est cependant un type particulier de système dans lequel un certain type, non pas d'équilibre, mais de balances temporaires, est nécessaire. À une réunion de la Société américaine de philosophie (*American Philosophical Society*) tenue à la société américaine pour l'avancement des sciences (AAAS), dont nous étions tous les deux membres, réunion qui a eu lieu à Philadelphie… ou à Boston, je l'ai contredit. J'ai affirmé qu'il se trompait. Je pouvais le prouver. J'avais un exemple empirique. Il n'a pas réagi et ne m'a pas contredit. Des systèmes comme ceux-ci ne peuvent pas tous être résolus ; par contre, mon système économique, oui. Il ne s'est pas opposé à cette idée.

Changeons de sujet si vous le voulez bien. Estelle, votre vie familiale a-t-elle été affectée par l'ampleur des projets intellectuels de Wassily ?

EL : Non, pas du tout. Ses étudiants ne venaient jamais à la maison et aucun de ses collègues n'était un ami intime. Les deux aspects de sa vie étaient nettement dissociés. C'est peut-être pour cela que notre fille ne s'est jamais intéressée aux mathématiques ni à l'économie. Wassily et sa fille s'entendaient très bien, mais ce n'est qu'à 12 ans, lorsqu'elle a appris les mathématiques qu'ils ont eu quelque chose en commun.

WL : C'était une intellectuelle. Elle est historienne de l'art et très connue.

Les projets de Wassily étaient-ils contraignants pour la famille ?

EL : Pendant près de cinq ans, j'ai lu et étudié dur pour tâcher de comprendre quelque chose en économie. Je crois que je suis arrivée ainsi à comprendre un peu ce qu'il faisait.

WL : Estelle est une écrivaine.

Vous écrivez des romans ?

EL : Non, des mémoires. L'un de ses mémoires concerne sa famille. Nos principaux amis n'étaient ni collègues ni étudiants de Wassily.

WL : J'ai peu d'amis parmi mes collègues. Cela doit être dans mon tempérament.

EL : À propos, connaissez-vous Frank Scott ? Ils avaient une maison à Massawapi, juste au nord de la frontière. Nous avions une maison dans le nord du Vermont (que nous avons vendue quand nous avons déménagé à New York). Il était le doyen d'une école de droit (Faculté de droit, Université McGill) et membre du parti socialiste canadien. Sa femme était artiste peintre. C'étaient de très bons amis à nous.

WL : C'étaient de très bons amis.

EL : Le parrain de ma fille, Pitimin Sorokin, avait aussi une maison au Canada, de l'autre côté de la frontière [avec les États-Unis], sur le lac Memphremagog. Il y avait aussi un poète québécois. Ils n'aimaient pas les Britanniques et ne voulaient pas leur vendre leurs propriétés. Marian, elle, louait un studio non loin à des Québécois ; elle n'en était pas propriétaire.

Cette région du Québec, les Cantons-de-l'Est, était autrefois une enclave britannique habitée très tôt par de nombreux loyalistes qui ont fui les États-Unis après l'indépendance ou juste après la guerre civile aux États-Unis.

EL : Pas seulement là. Baltimore Bay était habitée de gens du Sud qui ne voulaient pas aller en Nouvelle-Angleterre ; ils sont donc allés s'établir au Canada. Il y avait donc beaucoup d'Américains, de style très britannique par leurs habitudes, leurs boissons, leurs fêtes, leurs magasins, etc. Nous, dans le nord du Vermont, nous connaissions beaucoup de francophones, par exemple les Lapierre qui avaient une magnifique maison de l'autre côté du lac Brompton.

Est-ce que votre maison au Vermont a joué un rôle important dans votre vie ?

EL : Oh, très important. La première année, nous avons loué un chalet sur la rive est du lac Willoughby en haut de la colline. On y avait une vue spectaculaire. Cet été-là, nous avions une gardienne pour notre fille. C'est alors que Wassily, comme il l'avait prévu, est allé a une vente publique et a acheté une maison sur la rive ouest du lac.

WL : Un de mes sports préférés est la pêche à la truite, la pêche au lancer. Je l'avais appris lorsque j'étais enfant en Finlande. Ma famille y avait une maison. Je me suis initié à la pêche au lancer avec mon père au début du siècle.

EL : Voilà un autre souci pour moi. Il avait l'habitude de sortir à deux heures de l'après-midi et de rentrer vers neuf heures. Et moi, je restais avec la gardienne et ma fille, essayant de travailler comme je pouvais !

WL : Mais cela t'était égal, non ?

EL : Oui, cela m'était égal que tu partes trois ou quatre fois par semaine pour cinq ou six heures. Mais je m'inquiétais quand, parfois, tu rentrais tard. Comment t'aurais-je retrouvé au beau milieu du nord du Vermont ? Lorsque ses parents sont arrivés, nous les avons installés là, dans le Vermont. Après les événements en Allemagne, nous

essayions de les convaincre de venir aux États-Unis. Ils avaient suivi Wassily à Berlin. Son père travaillait à l'ambassade russe. Lorsqu'on lui a demandé de rentrer à Moscou pour le juger lors des procès d'une chose qu'il n'avait pas faite, ils sont alors restés seuls en Allemagne. La mère de Wassily était juive, tous deux étaient anticommunistes, et ils se retrouvaient seuls en Allemagne sous Hitler. Ils ont finalement accepté de quitter [l'Allemagne], mais avant de nous rejoindre, ils ont d'abord voyagé en Yougoslavie et en Italie. Après cela, ils sont venus à Cambridge et, ensuite, dans le Vermont où ils sont restés. Seuls des Russes feraient cela ; seuls des aristocrates russes en sont capables. Pas de voiture. La ville la plus proche, Brompton, était à des kilomètres. La maison n'avait pas d'eau courante ; ils devaient aller à pied en chercher avec des seaux à près d'un kilomètre. Ils y sont restés et se sont débrouillés. Ils avaient un poêle à bois et le père coupait le bois. Ils se sont liés d'amitié avec un voisin qui avait une voiture et qui les aidait. Éventuellement, nous avons dû leur louer une petite maison à Crystal Lake près de la ville de Barton, juste à côté.

Croyez-vous que l'installation de vos beaux-parents aux États-Unis ait constitué un tournant dans vos vies à tous les deux ? N'a-t-elle pas signifié la réunion de tous les éléments de vos vies en un seul lieu géographique ?

EL : Non. Ils étaient terribles. J'en ai écrit un mémoire. Elle était une mère de type freudien, très possessive. Un simple exemple : mon [beau-] père, lorsqu'on annonçait le repas, se rappelait toujours qu'il avait quelque chose à faire. Il se levait pour le faire en disant « Je reviens tout de suite ». Wassily faisait la même chose. À cette époque, je ne connaissais pas bien mon beau-père et je n'avais rien remarqué. Alors un jour j'ai demandé à ma belle-mère : « Est-ce que votre Wassily fait les mêmes choses que mon Wassily ? » « Ton Wassily est *mon* Wassily », m'a-t-elle rétorqué. Ça vous donne une idée du personnage. Leur arrivée fut un coup de tonnerre ! C'était le jour d'Action de grâces de 1939, l'année où Roosevelt avait décrété qu'il y aurait cette année-là deux congés de l'Action de grâces, le 23 et le 30 novembre. Ils sont allés rendre visite à des amis à Washington et ils y ont eu droit à un second repas d'Action de grâces. Je me rappelle belle-maman m'avoir dit : « Ils sont végétariens, et nous avons mangé une dinde végétarienne. »

D'autres événements familiaux qui ont changé votre vie ?

EL : La nomination de Wassily à Washington pendant la [Seconde] guerre [mondiale] a été difficile.

WL : Nous n'avons pas déménagé. Je n'y ai jamais habité. Je faisais la navette, je n'y passais que quelques nuits par semaine.

Pour quel service de Washington travailliez-vous pendant la guerre ?

WL : L'OSS : *Office of Strategic Services*. Les services secrets. Le Bureau russe.

Aviez-vous postulé ou vous ont-ils appelé ?

WL : Ils m'ont demandé.

EL : Wassily a d'ailleurs été très surpris, plus tard, lorsque tout d'un coup la Central Intelligence Agency (CIA) et le Federal Bureau of Investigation (FBI) l'ont accusé. Wassily voulait savoir pourquoi. La CIA et le FBI ont passé la majeure partie des deux années suivantes à établir et interroger toutes nos relations.

WL : Je n'ai pas plaidé coupable ; d'autres l'ont fait. Je suis allé voir le président de Harvard. Il m'a aidé et m'a recommandé un avocat.

EL : Son nom était Proctor. Je m'en souviens bien. C'était un homme très intéressant. J'avais moi-même fait partie, bien avant, d'un groupe de « Femmes consommatrices ». Quand je me suis rendu compte que c'était une organisation contrôlée par les communistes, je m'en suis séparée. Tous les deux, nous étions membres de la Russia War Research. Tous les Russes des États-Unis en faisaient partie, du moins quand la Russie était encore alliée. Mais lorsque les Russes sont devenus des ennemis, c'est devenu gênant. Nous avons effectué de nombreuses recherches pour découvrir les raisons de notre accusation et c'est peut-être en partie à cause de cela que nous n'avons pas été condamnés.

WL : Mais nous l'avons gagnée cette partie !

EL : Oui, ce jour-là, ce fut une belle victoire. Le jour où nous nous sommes rendus à New York pour le grand jugement. Ils étaient neuf [juges]. Nous avions été placés dans des pièces séparées. C'était en 1956, 1957 ou même plus tard en 1959, je ne me souviens plus exactement. Peu importe. Ils avaient tous des témoins merveilleux. C'était une énorme perte de temps. La moitié de nos témoins n'avaient pas pu venir. Ils nous ont interrogés séparément. Je peux vous raconter une histoire intéressante à propos de cet interrogatoire : Elizabeth Schumpeter avait été appelée à témoigner. Elle était un peu fasciste et pro-japonaise, et son mari pro-allemand. C'était des amis proches. Le FBI l'a interrogée sur moi. Elle leur a dit ceci : « Estelle m'a dit qu'elle préférait vivre avec les communistes qu'avec des fascistes. Elle a d'ailleurs donné à sa fille le prénom de la fille de Staline. » C'est ridicule ! Si j'ai choisi ce prénom pour ma fille, c'est parce que j'aimais ce prénom. Alors que je venais d'apprendre que j'étais enceinte, dans un bus qui nous amenait en Californie (nous avions vendu notre voiture), j'ai lu que Staline allait avoir une fille, et j'ai dit à Wassily : « Oh, si nous avons une fille, j'aimerais qu'on l'appelle Svetlana. C'est un joli prénom, pas comme Nadia ou Vera ou les autres prénoms très courants ». Elizabeth leur a dit que c'était à cause de Staline. Ils ont alors interrogé Wassily séparément. Raconte ce qui c'est passé.

WL : Les services secrets sont parfois très inefficaces…

Vous devez en savoir quelque chose, vous qui avez travaillé pour eux pendant la guerre…

WL : Pendant l'interrogatoire, ils m'ont demandé : « Comment un économiste américain, un célèbre économiste américain, peut-il publier des livres à Moscou ? » – « Sous quel nom ? » – « Sous le nom de A.A. Leontief ? » Bien sûr, moi, je suis W. Ils s'étaient simplement trompés d'initiales.

EL : Voilà toute l'histoire. Ils s'étaient complètement fourvoyés. Tout le procès fut ridicule. Deux années de perdues, beaucoup d'argent et bien des soucis pour nous. Tout cela pour rien !

WL : Une simple méprise.

D'après ce que vous racontez, Joseph et Elizabeth Schumpeter n'étaient pas des gens commodes.

EL : Oh non, pas du tout.

WL : Ils étaient très difficiles ; mais très intéressants.

EL : Elle disait qu'elle était encore socialiste, malgré la nouvelle situation. C'était sa façon de présenter les choses. Lui, était provocateur. Peu importe le sujet, il adoptait toujours le côté non conformiste des choses. Il disait des choses du genre : « Roosevelt est noir et Hitler blanc », rien que pour exaspérer les gens.

WL : Et pour énerver Estelle.

EL : Et pas seulement avec les Américains, mais avec les Européens aussi. Il aimait *épater le bourgeois*. Il nous traitait de « bourgeois ». J'aurais dû lui répondre : « Merci du compliment ! » J'aurai dû, mais je ne l'ai jamais fait. Parce qu'il était anti-britannique il invitait à dîner le maire de Boston – un maire qui avait ses problèmes politiques – un Irlandais. Joseph était en réalité pro-nazi et Elizabeth, pro-japonaise. Il admirait aussi Staline. Il admirait le pouvoir. Typiquement autrichien d'admirer le pouvoir.

Je ne généraliserais pas !

EL : Moi si.

J'imagine alors que vous n'étiez pas très amis avec Joseph Schumpeter…

EL : Mais si, nous étions de très bons amis, amis intimes même.

WL : C'était un peu paradoxal. Intéressant.

EL : C'était un homme fascinant. Il se promenait avec Homère, en grec [classique], dans sa poche. Il lisait le grec. Il avait voyagé partout. Il connaissait toutes les cathédrales romanes de France. Wassily n'écrit pas souvent de lettres. Mais il avait des amis à l'université qui écrivaient de nombreuses lettres. J'ai quelques lettres de Schumpeter. Il avait aussi un côté très tendre.

WL : Oui, tout à fait.

EL : D'autres très bons amis étaient les Solow ; et ils le sont encore. Tous deux étaient des étudiants de Wassily. Ils sont devenus des amis intimes, un peu comme un neveu et une nièce. En 1948, nous sommes allés ensemble à Salzbourg. Nous étions très proches, de très bons amis.

WL : Mais nous appartenions à des générations différentes. Anne Carter, bien sûr, était aussi une excellente amie. J'estime qu'elle comprend mieux que quiconque mes approches à l'égard de l'économie.

De tous ces collègues et amis, lequel a exercé le plus d'influence sur vous ?

WL : Je sépare très nettement mes collègues de mes amis.

EL : Quand Wassily travaille, il dresse un mur autour de lui.

3. Épilogue

Le repas était terminé. Estelle m'invita dans leur appartement, de l'autre côté du Square Washington, pour me remettre un exemplaire de son livre *Genia & Wassily – A Russian-American Memoir.*

J'ai pu y voir le tapis que Joseph Schumpeter leur avait offert pour leur mariage, celui sur lequel Wassily avait glissé et s'était fêlé une côte deux jours avant notre rencontre.

« Il va falloir s'en débarrasser, Wassily », lui dit Estelle.

— S'il te plaît, non ! implora-t-il, un peu comme un enfant qui refuse de se séparer d'un de ses objets préférés. « J'espère qu'elle changera d'avis », m'a-t-il dit en aparté.

Sur la table du salon devant le canapé, il y avait quelques-uns des derniers numéros de *Nature* ; dans la même salle, le piano bien-aimé d'Estelle. L'appartement était simple, confortable et, sans aucun doute, rempli d'autres souvenirs.

Je ne suis retourné ensuite à New York que le 8 avril 1999, cette fois, pour une cérémonie en l'honneur de Wassily Leontief à l'Université de New York. J'y avais perdu un second père.

CHAPITRE 10

INTRODUCTION DU CHANGEMENT TECHNIQUE INCORPORÉ DANS UN MODÈLE D'ENTRÉE-SORTIE MACROÉCONOMIQUE STRUCTUREL†

DANIEL J. WILSON
Federal Reserve Bank of San Francisco

† Une version plus élaborée de ce chapitre est publiée en anglais dans Wilson (2003).

Résumé

Dans ce chapitre, un système de régression basé sur les équations de la productivité de la main-d'œuvre, incluant le progrès technique, est incorporé dans un modèle macroéconomique structurel d'entrée-sortie de l'économie des États-Unis. Les études économétriques ont depuis longtemps été limitées par des difficultés reliées à l'estimation de régressions qui incluent le changement technique incorporé au capital de type Solow. L'investissement en capital devrait s'accompagner d'une augmentation de la productivité de la main-d'œuvre. Les difficultés dans la mesure du capital ont limité les chercheurs qui ont voulu établir ce lien entre la productivité et l'investissement. Des recherches récentes menées par Wilson (2001) ont permis d'aplanir cette difficulté pour l'estimation du changement technique incorporé au capital. Ces estimations sont utilisées ici afin de construire un stock de capital, ajusté pour le changement technique. Ensuite, nous utilisons ces stocks ajustés pour estimer les équations de productivité de Solow. Les résultats montrent que le remplacement des équations d'un ancien modèle (IDLIFT), basées sur des tendances temporelles, par les nouveaux résultats de ces équations permet de faire ressortir une convergence avec les prévisions du modèle théorique traditionnel de production de Solow.

1. Introduction

La productivité de la main-d'œuvre dépend essentiellement des flux des capitaux. Plus spécifiquement, la théorie de la production élaborée par Solow dans les années 1950 et 1960 suppose une certaine complémentarité entre la main-d'œuvre et le capital, de telle sorte que l'accroissement de capital augmente la productivité de la main-d'œuvre[1]. La modélisation de la croissance de la productivité de la main-d'œuvre à long terme repose sur l'exactitude de l'évaluation du capital productif (et des taux d'utilisation). Or, cette modélisation sur le long terme constitue manifestement l'un des éléments clés de tout modèle prévisionnel.

Néanmoins, les concepteurs des modèles prévisionnels se sont longtemps heurtés à des difficultés pour trouver des équations de productivité de la main-d'œuvre leur permettant de démontrer la caractéristique « solowienne » selon laquelle les mouvements de productivité des investissements devraient provoquer des mouvements similaires de la productivité de la main-d'œuvre. Cette difficulté s'explique largement par l'absence d'estimations précises sur l'introduction du changement technique incorporé dans le capital. De récentes études menées par Wilson (2001) ont permis d'aplanir cette difficulté en estimant l'introduction du changement technique à l'échelle de chaque industrie. La présente étude se fonde sur ces estimations pour concevoir un stock de capital ajusté au progrès technique. Un système basé sur la régression d'équations de productivité de la main-d'œuvre et introduisant le changement technique dans le capital est élaboré, auquel est ajouté le modèle IDLIFT (voir section 2.1) d'entrée-sortie macroéconomique structurel de l'économie américaine.

Wilson (2001) définit une approche en matière de production afin d'évaluer l'intégration du changement technique à l'équipement[2]. Cette méthode permet d'évaluer l'intégration du changement technique dans les industries manufacturières américaines à partir de l'observation des décisions prises en matière de produits extrants, intrants et d'investissements, au niveau des usines, et ce, sur la base de données longitudinales publiées par le Bureau du recensement des États-Unis (Longitudinal Research Database of the U.S. Census Bureau). Cette méthode calcule ainsi une fonction de production des sorties brutes en vertu de laquelle l'apport de capitaux dans les équipements constitue un flux paramétré de tous les investissements antérieurs excluant la dépréciation physique. L'origine de ce flux, ou inventaire perpétuel, permet d'évaluer le taux du changement technique incorporé.

---

1. Cette théorie sera évoquée ci-après sous le nom de théorie de la production *solowienne* ; les équations de la productivité de la main-d'œuvre, où l'accroissement du capital entraîne l'augmentation de la productivité de la main-d'œuvre, seront appelées équations « de type Solow ».
2. Il y a lieu de souligner que l'approche générale en matière de production et l'estimation de l'intégration du changement technique dans les industries manufacturières américaines agrégées est le fruit d'une collaboration avec Plutarchos Sakellaris (Sakellaris et Wilson, 2000). Wilson (2001) a étendu ces résultats empiriques à l'échelle de l'industrie, ce qui m'a permis de présenter séparément une méthode visant à déduire le ratio du progrès technique intégré dans les industries non manufacturières.

Ce faisant, Wilson (2002) visait avant tout à évaluer la vraisemblance des taux estimés du changement technique incorporé et à dériver des taux analogues pour les industries non manufacturières, pour lesquelles on ne dispose pas encore de données longitudinales au niveau des entreprises. Ici, un indice sera estimé afin de bien illustrer l'étendue de la R-D orientée vers les différents biens en capital. En d'autres termes, les données publiées par la Fondation nationale des sciences (NSF : U.S. National Science Foundation) et le ministère américain du Commerce (DOE : U.S. Department of Commerce) sont compilées (et ajustées) afin d'établir une moyenne pondérée de la R-D faite sur le capital en équipement qu'une industrie acquiert, et ce, pour les 62 industries qui composent l'économie américaine. Cet indice industriel de l'intégration de la R-D dans le capital semble avoir une importante corrélation positive avec les estimations des industries manufacturières du changement technique incorporé. Pour évaluer le taux du changement technique incorporé dans les industries non manufacturières, il convient d'étudier le lien avec l'indice de la R-D incorporé, à l'échelle des industries, ainsi que les valeurs de l'indice pour les industries non manufacturières.

Dans le cadre de la présente étude, les résultats de la recherche ont été utilisés afin d'analyser leur effet sur le modèle IDLIFT du remplacement des anciennes équations de la productivité de la main-d'œuvre, qui ne tiennent pas compte de l'incidence des investissements, par les équations de type Solow, estimées à l'aide d'une évaluation exacte du stock de capital de production.

2. Aperçu du modèle IDLIFT

2.1. La structure du modèle IDLIFT

IDLIFT est un modèle macroéconomique structurel basé sur l'analyse de régression et qui repose sur les relations entrées-sorties entre les industries. Il a été élaboré par le centre de recherche INFORUM (2001) qui en assure la mise à jour. Dans cette section, la structure générale du modèle IDLIFT, tel qu'il est utilisé à l'heure actuelle, est présentée. Pour connaître la différence entre les modèles IDLIFT et LIFT, on peut consulter Meade (1999).

Le modèle IDLIFT prévoit les flux de production, d'emploi, de prix, d'exportation, d'importation ainsi que les flux interindustriels de 97 secteurs producteurs de biens, les dépenses de consommation personnelles de 92 catégories, les investissements en équipement de 55 secteurs industriels, les dépenses en construction de 19 catégories ainsi que les composantes de la valeur ajoutée de 51 industries. Les variables macroéconomiques, telles que le taux d'épargne personnel ou le taux des bons du Trésor à trois mois y reposent sur des estimations économétriques. Les autres variables sont déterminées en fonction de l'égalité fondamentale de la comptabilité nationale ou proviennent de données exogènes.

La structure générale du modèle repose sur le système de comptabilité nationale des comptes de revenu et de produits des États-Unis. Le modèle a un volet physique et un volet de prix. En ce qui concerne le volet physique, les équations de productivité de la main-d'œuvre servent à déterminer les prévisions du modèle en matière d'emploi, ainsi que les valeurs prévues d'une production donnée. Ce modèle permet également de prédire le taux de chômage, qui se répercute sur le taux d'épargne. Pour ce qui est du volet revenu/prix du modèle, les salaires sont en partie déterminés par l'accroissement de la productivité de la main-d'œuvre. La productivité de la main-d'œuvre a donc également une influence considérable sur la composante du revenu dans le modèle.

2.2. Problème et point de départ

À en juger par l'influence considérable qu'elle a sur les salaires, d'une part, et sur l'emploi et l'épargne, d'autre part, la productivité de la main-d'œuvre constitue assurément l'une des principales variables du modèle IDLIFT. Actuellement, les équations de productivité de la main-d'œuvre du modèle IDLIFT sont essentiellement déterminées par des tendances temporelles ainsi que par la différence entre la production industrielle actuelle et son ancien sommet. En revanche, elles ne contiennent aucun apport d'entrée à titre de variables explicatives (la spécification actuelle de IDLIFT est illustrée dans le tableau 10.1, section 4.1).

INFORUM a longtemps éprouvé des difficultés à établir une relation raisonnable entre les investissements et la productivité de la main-d'œuvre dans ses modèles. Étant donné que la productivité de la main-d'œuvre est le principal catalyseur du comportement de la croissance de la production sur le long terme dans le modèle, il est surprenant que l'on ne se soit pas encore penché sur l'influence des investissements ou du stock de capital. Dans tout modèle de croissance de type Solow, la croissance du capital est imputable en grande partie à la croissance de la production. Au fil des ans, de nombreuses tentatives ont été faites en vue de développer et d'estimer des équations de productivité en fonction du comportement d'optimisation des firmes, qui tiennent compte de l'effet du changement technique sur le stock de capital.

Toutefois, ces tentatives ont généralement buté sur l'un des deux problèmes suivants. Premièrement, dans les régressions des séries temporelles observées au niveau industriel (qui servent habituellement à calculer les équations IDLIFT), le coefficient du capital est souvent négatif, voire presque nul (particulièrement dans les secteurs des services). Deuxièmement, les équations d'investissements du modèle IDLIFT étant toujours de type *accélération flexible* (c'est-à-dire qu'elles sont largement déterminées par les changements actuels et retardés dans la production), l'introduction d'investissements (au moyen du stock de capital) dans les équations de productivité a stimulé l'essor de la production dans les prévisions du modèle. Cela signifie que tout choc exogène positif se traduit dans le modèle par une « explosion » : croissance de la production, augmentation des investissements, accroissement de la productivité de la main-d'œuvre, hausse de la production, qui s'explique par le fait

que l'accroissement de la productivité entraîne une hausse du taux de rémunération, diminue le taux d'épargne et tend à stimuler la consommation, l'élément le plus important de la demande finale.

L'un des principaux obstacles à l'estimation d'une équation de type Solow résidait dans l'évaluation erronée du capital, imputable à l'omission du changement technique. Cette erreur de calcul relevée dans le capital en équipement, attribuable à l'omission de l'introduction du changement technique incorporé, n'est pas aléatoire. En effet, elle est systématiquement liée à la distribution intertemporelle des investissements. En fait, plus le stock de capital sera récent, plus l'erreur sera importante. Les investissements les plus récents seront corrélés positivement avec d'autres apports factoriels, tels que la main-d'œuvre. Cette situation entraînera une erreur systématique due à la surestimation de l'élasticité de la main-d'œuvre. En outre, si les rendements d'échelle constants sont imposés, cette tension positive dans l'élasticité de la main-d'œuvre se traduira par une élasticité réduite du capital.

3. Élaboration d'un stock de capital ajusté en fonction de la qualité

Pour corriger ce problème de calcul, un stock de capital ajusté en fonction de la qualité est employé. Cet ajustement de stock est réalisé à l'aide de l'estimation des taux du changement technique incorporé, donnée par Wilson (2001). Le stock de capital établi est défini conformément à la formule de l'inventaire perpétuel, qui agrège les capitaux investissements issus de différentes périodes passées et actuelles en un stock de capital réel actuel selon un système de pondération, à savoir un retard échelonné :

$$K_t = \sum_{s=1}^{T} I_{t-s} \cdot \underbrace{\left[\left[\frac{1}{P_{t-s}}\right] D_{t,t-s}(1+\gamma)^{t-s-t_0}\right]}_{Poid(t-s)} \qquad (1)$$

où K désigne le stock de capital (en équipement ou en structures), I étant l'investissement nominal, p le déflateur, γ le taux du progrès technique incorporé et $D_{t,t-s}$ la dépréciation physique (l'usure et la détérioration). $D_{t,t-s}$ donne la fraction du capital d'investissement $t - s$ encore en production durant l'année t. En règle générale, la plupart des compilations de données sur les stocks de capitaux inscrivent le changement (technique) de qualité sous la rubrique de l'évaluation de la dépréciation (qu'elles qualifient de détérioration *économique* par opposition à détérioration *physique*) ou encore sous celle du déflateur[3]. Malheureusement, la plupart des sources de données concernant les déflateurs et la dépréciation économique des investissements ne sont pas corrigées pour tenir compte du changement de la qualité en matière d'équipement. Il importe

3. Hulten et Wykoff (1981) ou Gort et Wall (1998) ont étudié la différence entre la détérioration économique et la détérioration physique.

donc de décomposer les pondérations du capital d'investissement de l'équation (1) selon les trois composantes séparées de la détérioration physique, de la modification de la qualité et de la fluctuation des prix.

À partir de la définition du capital de l'équation (1), des stocks de capital séparés à l'échelle industrielle pour les structures (S) et l'équipement (J) sont établis. En ce qui concerne les structures, il est supposé que le changement technique est négligeable et donc que $\gamma = 0$. Pour ce qui est de l'équipement, les taux du changement technique incorporé proviennent de Wilson (2001). Quant au déflateur, Hornstein et Krusell (1996) montrent que l'évaluation indépendante du progrès technique incorporé devrait permettre d'ajuster les investissements à l'aide d'un déflateur de la consommation. La dépréciation physique des structures est évaluée inversement à la moyenne pondérée de la durée de vie utile de la structure des éléments d'actifs détenus par l'industrie. Les facteurs de pondération visent les parts de capital que l'industrie possède dans chaque type d'élément d'actif et qui ont été établies à partir des tableaux de mouvements des capitaux fournis par le Bureau américain d'analyse économique (BEA : U.S. Bureau of Economic Analysis).

Le Conseil des gouverneurs de la Réserve fédérale américaine (FRB : Federal Reserve Board of Governors) et le U.S. Bureau of Labor Statistics (BLS) élaborent des stocks de capital à l'aide d'une méthodologie qui vise à exprimer la dépréciation physique en fonction de la durée de vie des stocks et d'une fonction de désintégration bêta non géométrique. Sakellaris et Wilson (2000) délaissent les modèles de dépréciation physique tacites à l'échelle industrielle, $D_{t,t-s}$, pour les remplacer par l'équipement en se basant sur les stocks de capital du FRB. Ce mouvement prend la forme d'une courbe logistique inversée (voir Sakellaris et Wilson, 2000).

4. Équations alternatives pour la productivité de la main-d'œuvre

Dans cette section, un exercice de modélisation du général au spécifique est exécuté suggérant plusieurs spécifications alternatives pour les équations de la productivité de la main-d'œuvre. Un ensemble de spécifications générales est proposé et leur performance, en termes d'ajustement moyen (dans tous les secteurs), ainsi que l'envergure des estimations des coefficients, sont évalués. À partir de cette évaluation, toutes les spécifications sont simplifiées de manière à former un ensemble plus restreint de spécifications candidates. Chaque spécification subit ensuite une série de modifications avant d'être à nouveau estimée. Ces modifications visent à exclure les matières comme l'apport factoriel, à utiliser une autre méthode d'ajustement de la capacité de production et à inclure le changement technique non incorporé. Finalement, on retient une spécification simple pour chaque industrie en fonction de l'ajustement et de la sensibilité des coefficients obtenue à partir de chaque modification.

Cette approche est destinée à estimer un nombre d'équations spécifiques, qui sont des cas spécifiques d'un modèle plus général, et à sélectionner une simple équation pour élaborer des prévisions à l'aide de critères économiques et statistiques. Elle ressemble ainsi à l'approche de modélisation économétrique progressive de la London School of Economics (LSE Method) préconisée par Hendry (2000).

4.1. Équations logarithmiques incluant les matériaux

Le processus débute par l'évaluation de 11 spécifications alternatives pour obtenir une équation de la productivité de la main-d'œuvre. Chaque spécification est estimée pour les 55 industries du projet de sectorialisation des investissements de IDLIFT. Le tableau 10.1 rapporte les formes fonctionnelles de ces 11 spécifications et montre en quoi elles diffèrent les unes des autres. Exception faite de l'ancienne spécification IDLIFT, toutes les spécifications sont dérivées d'une fonction normale de production de type Cobb-Douglas Solow :

$$Q_{it} = M_{it}^{\theta} L_{it}^{\beta} J_{it}^{\alpha} S_{it}^{\eta} \qquad (2)$$

où Q désigne la production physique, M les entrées en matériels, L les heures-travail, J les services de l'équipement et du capital, et S les services liés au capital structurel. Ces fonctions diffèrent selon qu'elles assument des rendements d'échelle constants, qu'elles s'ajustent à une variation passée inaperçue dans l'utilisation du capital industriel ou qu'elles utilisent le stock de capital en équipement incorporant le changement technique.

Une analyse de la moyenne du R^2 ajusté, des estimations moyennes des coefficients pour chaque coefficient et du pourcentage de chaque coefficient positif donne déjà plusieurs résultats intéressants. Tout d'abord, dans la plupart des capitaux en équipement ajustés en fonction de la qualité, l'utilisation du γ de Wilson (2001) permet d'améliorer considérablement l'ajustement et la sensibilité (en termes de valeur et du signe positif devant les élasticités des facteurs estimés) des équations de la productivité de la main-d'œuvre par rapport à l'utilisation d'un stock de capital en équipement non ajusté. Ensuite, même si l'on observe une certaine perte d'ajustement, l'imposition du rendement d'échelle constant semble améliorer considérablement la sensibilité des estimations. Les effets bénéfiques, que l'on tire en imposant un rendement d'échelle constant à α et η, semblent l'emporter facilement sur le coût d'un ajustement légèrement abaissé. Finalement, le contrôle de l'utilisation du ratio énergie/capital permet d'améliorer le coefficient de détermination et d'accroître les élasticités structurelles estimées. Il réduit toutefois les élasticités de l'équipement.

Ces résultats tendent à indiquer qu'il serait raisonnable de ne retenir que les spécifications C et D dans notre étude ; c'est-à-dire qu'il n'y a pas lieu d'hésiter à imposer le rendement d'échelle constant et à ajuster le capital en équipement en spécifiant le stock à partir du γ de Wilson (2001). En outre, un ajustement pour l'utilisation semble améliorer légèrement le coefficient de détermination, et donc, pour le moment, cette spécification est aussi retenue pour D (et ce, malgré sa tendance à produire des élasticités de capital irréalistes).

TABLEAU 10.1

Guide des spécifications alternatives pour les équations de productivité de la main-d'œuvre

Description	Équation
A. Fonction de production Cobb-Douglas standard en forme logarithmique.	$q - \ell = b_0 + (\beta - 1)\ell + \theta m + \alpha j + \eta s$
B. Même chose qu'en A, mais ajustement visant à contrôler l'exploitation de la capacité de production en recourant au ratio énergie/capital.	$q - \ell = b_0 + \left(\frac{\beta - 1}{\beta}\right)q + \left(\frac{\theta}{\beta}\right)m + \left(\frac{\alpha(\tau - 1)}{\beta\tau}\right)j + \left(\frac{\eta(\tau - 1)}{\beta\tau}\right)s + \left(\frac{\alpha + \eta}{\tau}\right)e$
C. Même chose qu'en A, mais avec imposition de rendements d'échelle constants. Cette équation découle de la formule $\beta + \theta + \alpha + \eta = 1$.	$q - \ell = b_0 + \theta(m - \ell) + \alpha(j - \ell) + \eta(s - \ell)$
D. Même chose qu'en A, mais avec rendements d'échelle constants et ajustement de l'exploitation de la capacité de production en recourant à l'énergie.	$q - \ell = b_0 + \theta(m - \ell) + \left(\frac{\alpha(\tau - 1)}{\tau}\right)(j - \ell) + \left(\frac{\eta(\tau - 1)}{\tau}\right)(s - \ell) + \left(\frac{\alpha + \eta}{\tau}\right)(e - \ell)$
E. Équation IDLIFT actuelle.	$q - \ell = b_0 + a_1 * t_1 + a_2 * t_2 + a_3 * qup + a_4\ qdown$ où : t_1 = une tendance de temps linéaire durant la première année ; t_2 = une deuxième tendance temporelle, commençant en 1972 ; $qup_t = dq_t > 0$, ou 0 autrement ; $qdown_t = -dq_t$, lorsque $dqt < 0$, ou 0 autrement ; $dq_t = 1n(q_t) - \ln(qpeak_t\text{-}1)$; $qpeak_t$-1 (1-*spill*), ou autrement dit = $qpeak_t$-1(1-*spill*) ; *spill* = taux de dépréciation de la capacité.
F. Même chose qu'en A, sauf que J n'est pas ajusté pour tenir compte du changement technique incorporé (c.-à-d. que J est élaboré avec $\gamma = 0$ pour tous les secteurs).	
G. Même chose qu'en B, sauf que J n'est pas ajusté pour tenir compte du changement technique incorporé (c.-à-d. que J est élaboré avec $\gamma = 0$ pour tous les secteurs).	
H. Même chose qu'en C, sauf que J n'est pas ajusté pour tenir compte du changement technique incorporé (c.-à-d. que J est élaboré avec $\gamma = 0$ pour tous les secteurs).	
I. Même chose qu'en D, sauf que J n'est pas ajusté pour tenir compte du changement technique incorporé (c.-à-d. que J est élaboré avec $\gamma = 0$ pour tous les secteurs).	

4.2. Équations omettant les intrants intermédiaires

Comment les résultats de l'analyse de régression réagissent-ils au retrait des intrants intermédiaires ? On observe souvent dans le cas de la fonction de production ou des régressions de la productivité que les intrants intermédiaires dominent la capacité d'explication des variables indépendantes et éclipsent les effets des autres intrants. Cette domination des intrants intermédiaires semble également se confirmer dans nos régressions, à en juger par l'estimation fort élevée des coefficients moyens et par les importantes statistiques de la capacité d'explication marginale, non indiquée, pour l'élasticité des matériels (θ). En outre, à l'exception de E (l'équation IDLIFT ancienne, qui ne tient pas compte des intrants intermédiaires), toutes les spécifications ont un R^2 ajusté très élevé.

Dès que l'on ajoute les intrants intermédiaires aux régressions de production industrielle ou agrégée, on se trouve confronté à un autre problème : les données sur les intrants intermédiaires sont souvent mal mesurées. Les mesures des intrants intermédiaires physiques, utilisés dans les régressions précédemment définies, reposent sur la somme de la colonne d'une matrice des flux entrants et sortants en dollars constants. Ainsi, les matériels réels pour l'industrie *j* sont calculés à l'aide de la formule

$$m_{jt} = \sum_i a_{ijt} q_{jt}$$

où a_{ijt} désigne l'élément (*i*, *j*) de la matrice des coefficients intermédiaires. Ici, le problème réside dans le fait que nous ne pouvons pas observer les coefficients entrés-sorties réels, a_{ijt}, sur une base annuelle (du moins pas dans les données américaines). En effet, les données concernant a_{ijt} dont nous disposons sont quinquennales, le BEA ne dressant de tableaux entrées-sorties que tous les cinq ans. Les coefficients des années intermédiaires sont tout simplement interpolés entre les coefficients des années de référence et sont donc principalement déterminés par q_t. Ainsi, les chocs en q_t, qui affectent la variable dépendante dans une régression de la productivité et qui font partie du terme d'écart de la régression, se transmettent à la variable explicative ($m_t - l_t$). Cela entraîne un biais systématique qui surestime l'estimateur de son coefficient.

Aussi, les régressions correspondant à C et à D en omettant l'expression $\theta(m - l)$ ont également été réestimées. Ces nouvelles spécifications sans les intrants intermédiaires sont dénotées C′ et D′. Comme on peut s'y attendre, dès que l'on ne tient plus compte des intrants intermédiaires, le R^2 ajusté baisse, à un rythme modéré, toutefois. On remarque à nouveau que les ajustements sont plus élevés dès que l'on ajuste l'exploitation de la capacité de production (D′). Il reste que lorsque la capacité de production n'est pas ajustée (C′), les α positifs affichent un rendement nettement supérieur, mais les η positifs enregistrent un pourcentage légèrement moins important.

Pour ce qui est des estimations des coefficients moyens, les estimations des élasticités moyennes des spécifications C′ sont presque analogues à celles prévues par la théorie. Les attentes généralement reconnues pour les élasticités de la production en matière de main-d'œuvre et de capital sont de l'ordre de deux tiers et un tiers, respectivement, lorsque la production est

dotée d'une valeur ajoutée, et de l'ordre de un tiers et de un sixième lorsque la production est brute (les intrants intermédiaires étant responsables de la moitié restante). Ces chiffres reposent sur les parts du revenu national qui sont allouées au travail et au capital. En règle générale, la part du capital est à nouveau divisée, pour représenter les deux tiers de l'équipement (qui comprend la R-D incorporée) et le tiers des structures. Aussi, on pourrait s'attendre à ce que l'estimation des élasticités de la production relative à chaque entrée se rapproche de ces valeurs. En d'autres termes, si l'on inclut les intrants intermédiaires, on devrait s'attendre à ce que $\alpha \approx (1/6) \times (2/3) = 2/18 = 0{,}111$, $\eta \approx (1/6) \times (1/3) = 1/18 = 0{,}056$, $\beta = 0{,}33$ et $\theta \approx 0{,}5$. Par ailleurs, si l'on exclut les intrants intermédiaires, on devrait alors s'attendre à ce que $\alpha \approx 2/9 = 0{,}222$, $\eta \approx 1/9 = 0{,}111$, et $\beta = 0{,}66$. Si l'on se base sur les estimations moyennes obtenues jusqu'à présent, ces prévisions sont a priori davantage respectées par les régressions qui **ne** tiennent **pas** compte des matériels et qui **ne** s'ajustent **pas** pour l'exploitation du capital de production en recourant au ratio capital/énergie.

Toutefois, avant d'abandonner tout à fait la notion théoriquement séduisante visant à comptabiliser les variations dans l'exploitation de la capacité de production, nous devons vérifier une autre approche.

4.3. Option d'ajustement pour la variation latente de l'utilisation de la capacité de production

Outre le recours au ratio énergie/capital, on suggère une autre méthode pour contrôler la variation dans l'utilisation des facteurs : une approche adoptée par l'équation du modèle IDLIFT. La variation industrielle est illustrée à l'aide des termes *qup* et *qdown*. Cette méthode évalue tout d'abord la capacité d'utilisation à l'aide de l'ancien niveau record atteint par la production industrielle, duquel elle retranche une certaine « dépréciation ». La logique de cette méthode est la suivante : lorsque la production actuelle dépasse le niveau record atteint antérieurement, l'économie exerce à nouveau des pressions sur les limites de la capacité ; en revanche, dès que la production est largement inférieure au niveau record antérieur, un excédent de capacité non utilisée se forme.

Pour évaluer l'efficacité de cette méthode, une équation identique à C′ à laquelle on ajoute les variables indépendantes *qup* et *qdown* est estimée. Appelons cette spécification D″. Par rapport à l'utilisation du ratio énergie/capital qui sert d'approximation à l'utilisation, la spécification D″ donne des ajustements légèrement inférieurs, mais des élasticités de capital sont alors beaucoup plus raisonnables. Comparativement aux résultats de la spécification C′, qui ne tient pas compte de la variation de l'utilisation, ceux de la spécification D″ sont à peu près similaires en matière d'élasticités.

La spécification D″ pose toutefois un problème, puisqu'elle peut subir une causalité inverse. En effet, la production industrielle fait partie des variables dépendantes et des variables indépendantes *qup* et *qdown*. Si une erreur de mesure se glisse dans la production, elle peut entraîner un biais systématique des coefficients par excès *qup* ou par défaut *qdown* et gonfler artificiellement le coefficient de détermination. Pour évaluer l'importance de ce problème,

une méthode d'estimation de Monte-Carlo empirique mixte a été employée. Cette procédure a permis de préciser le processus de génération de données pour la variable véritablement dépendante en choisissant arbitrairement les coefficients. Ensuite une distribution pour une erreur aléatoire a été spécifiée et la « véritable » variable dépendante a été établie. Finalement, la variable dépendante a été régressée à t, $(j - l)$, $(s - l)$, aux variables indépendantes $qup^{mesurée}$ et $qdown^{mesurée}$, mesurées à l'aide de séries chronologiques réelles. Cette procédure a été répétée à 2000 reprises, ce qui a permis de calculer la moyenne et l'écart type de chaque coefficient.

Les estimations moyennes des coefficients sont toutes très proches de leurs valeurs « véritables » (soit celles retenues dans le PIB). Ainsi, même si l'on suppose que la variation de l'erreur de mesure dans q est très importante, l'erreur systématique relevée dans les coefficients imputable à la présence des variables indépendantes *qup* et de *qdown* ne semble pas présenter de problème.

Il semble donc logique de ne pas tenir compte des variations passées inaperçues dans l'exploitation de la capacité de production (spécifications D′), notamment en raison de sa propension à donner des élasticités du capital absurdes, mais aussi parce que le fait d'inclure les variables explicatives *qup* et *qdown* constitue une excellente alternative pour ajuster l'utilisation de la capacité de la production. Finalement, les spécifications C′ et D″ sont des options alternatives pour l'équation IDLIFT ancienne (spécification E). Il reste que, avant de les juger supérieures à l'équation actuelle, nous devons encore procéder à une autre modification.

4.4. Permettre le changement technique non incorporé

Il est fort possible qu'il y ait plusieurs fausses corrélations positives entre la productivité de la main-d'œuvre et les apports factoriels, parce que ces variables suivent toutes des tendances à la hausse. En d'autres termes, les équations illustrées ci-dessus devraient probablement contenir aussi une période de productivité neutre au sens de Hicks (ou de progrès technique non incorporé).

Voici les résultats de l'estimation des équations C′ et D″ auxquels on a ajouté une simple tendance chronologique linéaire. Les coefficients de détermination R^2 ajustés pour ces deux spécifications sont maintenant légèrement meilleurs comparativement à ceux de l'ancienne équation IDLIFT (voir le tableau 10.1, spécification E). Les élasticités moyennes du capital estimé diminuent quelque peu à la suite de l'introduction d'une tendance temporelle, mais elles sont encore raisonnables. De même, le pourcentage des α (qui sont positifs), diminue et le pourcentage des η (qui sont positifs) augmente. En ce qui concerne la spécification D″, l'ajout de la tendance temporelle réduit la moyenne des α alors que celle des η reste inchangée. La positivité de α tombe, mais celle de η ne change presque pas.

Cette ronde de régressions permet de démontrer que D″ semble être la spécification la plus prometteuse. C′ nous apparaît également rationnelle, bien que l'élasticité moyenne de l'équipement soit probablement trop mince,

probablement moins positive sous C′ que sous D″. Comparativement à l'ancienne équation IDLIFT, ces spécifications sont dotées d'un bon coefficient de détermination et sont donc plus intéressantes. Le plus important, c'est qu'elles illustrent bien les gains de productivité issus de l'intensification du capital. Dans ces conditions, on peut désormais appliquer l'une de ces deux spécifications, ainsi que les coefficients qui ont servi à les évaluer, à chacun des 55 secteurs et les ajouter au modèle IDLIFT. Pour une industrie particulière, la spécification retenue est choisie sur une base individuelle, comme nous allons le voir ci-après, en fonction de plusieurs critères, tels que l'ajustement et les coefficients les plus réalistes.

5. Résultats des simulations

Les équations présentées dans le tableau 10.1 sont ajoutées au modèle IDLIFT au moyen d'une série de nouvelles routines informatisées qui prennent les valeurs prévues des investissements en équipement, des investissements structurels et de la production, puis génèrent des valeurs pour la productivité, les heures et l'emploi. Ces nouvelles routines incorporées au modèle permettent d'établir des prévisions initiales stables. En outre, ces nouvelles routines ont été programmées dans le modèle de façon à permettre le calcul de la productivité, des heures et de l'emploi à l'aide de la nouvelle série d'équations et de l'ancienne. Quiconque se sert du modèle peut spécifier la série d'équations qu'il désire ajouter au modèle. Ainsi, il peut par exemple demander au modèle de calculer la productivité et les heures à l'aide des nouvelles équations, mais faire en sorte que ces valeurs calculées n'affectent en rien le reste du modèle. Même chose pour les anciennes équations. Cela permet notamment de créer une prévision de référence initiale pour l'ancien modèle tout comme pour le nouveau modèle[4].

Puisque nous voulons comprendre en quoi le comportement de ces deux modèles diffère face aux différents changements affectant l'activité économique, tels que l'évolution des investissements en équipement, la comparaison des deux prévisions initiales présente peu d'intérêt. Ce qui nous intéresse ici, en revanche, c'est de comparer les réactions de chaque modèle face à toute perturbation exogène susceptible de toucher le système. Dans de telles situations, seul le comportement de chaque modèle permet d'illustrer les répercussions de l'évolution des équations de la productivité du modèle IDLIFT. Puisque la principale différence entre les deux modèles est l'influence directe du stock de capital sur la productivité dans le nouveau modèle, on s'intéressera plus particulièrement ici aux chocs qui auront des conséquences sur les investissements.

4. Dans cette section, le nouveau modèle désignera le modèle utilisant les nouvelles équations de productivité, tandis que l'« ancien » modèle désignera les modèles IDLIFT ancien, actuel et préexistant.

Pour élaborer des prévisions de référence initiales, les deux modèles ont été programmés jusqu'en 2015. Dans ce modèle, 1997 est la dernière année de données historiques sur la plupart des variables industrielles. Toutefois, une bonne partie des données agrégées sont disponibles jusqu'en 2000 (ou au moins 1998, voire 1999) alors que ces données sont imposées au modèle[5].

5.1. Réaction à un choc permanent d'investissements

La réaction de chaque modèle face à un choc permanent affectant les investissements en équipement est évaluée. Ainsi, à l'aide d'un ensemble d'ajustements apportés aux investissements en équipement, les vecteurs de prévision pour les modèles des investissements en équipement sont remplacés par le vecteur des investissements établi à partir des prévisions initiales auxquelles on ajoute 2 %. En d'autres termes, pour chaque industrie, les valeurs des investissements en équipement sont établies à partir des prévisions initiales multipliées par 1,02 et le modèle est forcé d'utiliser ces nouvelles valeurs dans toutes les fonctions utilisant les investissements en équipement. Puisque l'on connaît le total des investissements en équipement jusqu'en 2000, ces modifications sont imposées aux années postérieures à 2000.

Dans les deux modèles, le PIB réel augmente d'environ un quart de pour cent par rapport au montant de base dès la première année, date à laquelle on a imposé une augmentation de 2 % des investissements en équipement. À partir de là, les modèles divergent considérablement. Ainsi, l'ancien modèle se rapproche du niveau de référence initial dès la deuxième année, oscille entre 0,05 % et 0,2 % au-dessus de la base jusqu'en 2008, avant de se stabiliser à environ 0,08 % au-dessus du niveau initial. Le nouveau modèle se rapproche également de la référence initiale dès 2002, mais il remonte ensuite de façon monotone jusqu'à la fin des prévisions et finit par atteindre 0,31 % au-dessus du niveau de référence. Cette réaction, de type solowienne du PIB réel, est supérieure et moins variable face à des investissements en équipement toujours croissants, et n'est pas surprenante, correspondant à ce que l'on attendait du nouveau modèle.

L'augmentation de la productivité de la main-d'œuvre s'est traduite par un accroissement des investissements, qui ont réduit les coûts unitaires de la main-d'œuvre, et qui ont diminué l'indice implicite du PIB. Cet indice implicite du PIB augmente dans l'ancien modèle en réaction à la stimulation de la demande d'investissements plus élevés. Cela explique pourquoi l'écart observé à partir de la base dans le PIB *nominal* est en réalité supérieure à celle de l'ancien modèle. Les différentes réactions du niveau des prix ont également des répercussions sur le taux d'intérêt des bons du Trésor. En effet, dans le nouveau modèle, l'écart par rapport à la base est généralement moins important et moins volatile. Dans le nouveau modèle, les taux d'intérêt moins élevés entraînent, en partie, un plus faible écart du taux d'épargne.

5. Par exemple, les comptes de revenu national et des produits compilent les données sur les investissements agrégés en équipement et sur les structures résidentielles et non résidentielles jusqu'en 2000.

Dans les deux modèles, le taux de chômage diminue par rapport à la référence initiale en raison de la stimulation de la demande attribuable à l'augmentation des investissements. Il reste qu'en moyenne l'écart est plus faible dans le nouveau modèle, et ce, notamment, parce que l'augmentation de la productivité de la main-d'œuvre a un effet négatif immédiat sur le taux d'emploi. Cet effet ricardien (ou luddite) de la productivité de la main-d'œuvre, c'est-à-dire une relation négative à court terme avec l'emploi, aurait également été relevé dans l'ancien modèle si la productivité de la main-d'œuvre avait augmenté considérablement, ce qui n'a pas été le cas. La productivité de la main-d'œuvre dans le nouveau modèle augmente régulièrement pour atteindre presque 0,4 % au-dessus du niveau de référence initial à la fin de ses prévisions. À titre de comparaison, dans l'ancien modèle, la productivité fluctue jusqu'à ce qu'elle se stabilise autour de 0,04 % par rapport au niveau initial. En somme, dans le nouveau modèle, les répercussions à long terme des investissements sur la productivité sont décuplées par rapport à celles de l'ancien modèle.

À l'examen des prévisions en matière de productivité de la main-d'œuvre de chaque secteur industriel, il ressort, comme on pouvait s'y attendre, que les plus grands écarts s'observent dans les industries affichant les plus importantes élasticités de stock d'équipement. La corrélation entre cette élasticité et l'écart dans la productivité de la main-d'œuvre oscille autour de zéro en 2001, mais s'élève à 0,96 vers 2015.

6. Conclusion

Les simulations précédentes ont montré que l'introduction de nouvelles équations de productivité de la main-d'œuvre dans le modèle IDLIFT a des répercussions considérables sur le comportement de l'équilibre général du modèle. Avec la mise en place des nouvelles équations, les variables macroéconomiques montrent comment le modèle réagit aux changements opérés sur les investissements, un comportement qui correspond davantage à celui préconisé par le modèle de croissance de Solow. Malgré l'absence de limites pour l'offre sur les équations des investissements, l'introduction des nouvelles équations n'a pas provoqué d'ascension en spirale des courbes de la production et des prix. En règle générale, l'augmentation des investissements en équipement améliore considérablement et *en permanence* la conjoncture macroéconomique de l'économie, même si elle est le fruit d'un choc temporaire unique. L'une des principales contributions du présent travail de recherche est d'avoir illustré la réaction permanente et raisonnable du nouveau modèle face aux augmentations en investissements.

Cette réaction de type Solow dans le nouveau modèle a pu s'accomplir grâce à l'utilisation des nouvelles équations de la productivité de la main-d'œuvre qui tiennent compte à la fois de l'accumulation du capital traditionnel (unités de capital par travailleur plus élevées) et du progrès technique incorporé (unités de qualité par travailleur plus élevées). Il importe de souligner, cependant, que ces nouvelles équations n'ont pas été simplement

choisies de façon *ad hoc* ; Elles ont au contraire été ajustées de manière à correspondre davantage aux données historiques que les équations du modèle IDLIFT antérieur.

Références bibliographiques

GORT, M., et WALL, R. 1998. Obsolescence, input augmentation, and growth accounting. *European Economic Review* 42 : 1653-1665.

HENDRY, D.F. 2000. *Econometrics : Alchemy or Science ?* Oxford, UK : Oxford University Press.

HORNSTEIN, A., et KRUSELL, P. 1996. Can technology improvements cause productivity slowdowns. Dans *NBER Macroeconomics Annual*, Rotemberg, J.J., Bernanke, B.S. (dir.). Cambridge, MA : The MIT Press.

HULTEN, C.R., et WYKOFF, F.C. 1981. *The Measurement of Economic Depreciation, Depreciation, Inflation, and the Taxation of Income from Capital*. Washington, DC : Charles Hulten Urban Institute, 81-125.

INFORUM. 2001. *Inforum Forecast Spring 2001*. College Park, MD : IERF, Inc.

MEADE, D.S. 1999. *IDLIFT – Recasting the Inforum Model of the U.S. Economy*. Présenté dans le cadre de la conférence mondiale INFORUM.

SAKELLARIS, P., et WILSON, D.J. 2000. *The Production-Side Approach to Estimating Embodied Technological Change*, Document de travail de l'Université du Maryland, No. 00-05.

WILSON, D.J. 2001. *Capital-Embodied Technological Change : Measurement and Productivity Effect*s. Thèse de doctorat, Université du Maryland.

WILSON, D.J. 2002. Is embodied technology the result of upstream R&D ? Industry-level evidence. *Review of Economic Dynamics* 5 : 342-362.

WILSON, D.J. 2003. Embodying embodiment in a structural, macro-economic input-output model. *Economic Systems Research* 15 : 371-398.

CHAPITRE 11

INTRODUCTION DE L'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE DANS UN MODÈLE D'ENTRÉE-SORTIE

Une application aux calculs des émissions de carbone intrinsèques†

JAN MUTL
Université du Maryland et
Centre de l'économie durable

† Cette étude est le fruit de travaux menés à titre de chercheur universitaire au Centre pour le développement durable. J'aimerais remercier à ce sujet le Centre et les personnes qui ont œuvré à sa fondation de m'avoir permis de mener à bien cette recherche. J'ai également largement profité des discussions menées avec Andrew Hoerner, Jim Barrett et Clopper Almon, pour ne citer qu'eux. Je tiens aussi à remercier Mark Planting de m'avoir fourni les tableaux entrées-sorties du BEA et Carl Chentrens d'avoir répondu à mes questions sur les tableaux entrées-sorties du BLS. Toute erreur et omission susceptibles de s'être glissées relèvent de mon entière responsabilité.

Résumé

Dans cette étude, nous nous penchons sur l'incorporation de l'évolution technologique à la fonction de production de Leontief. La méthode proposée permet de tenir à jour les tableaux entrées-sorties des facteurs de performance d'amélioration exogènes qui, en règle générale, sont hétérogènes entre les secteurs. Des prévisions relatives de l'effet des taxes sur les combustibles fossiles sur différents secteurs sont comparées dans une application qui tient compte, ou non, de l'évolution technologique en vertu d'un cadre induit et d'un scénario de maintien du statu quo. Les résultats obtenus indiquent que l'évolution technologique (efficacité énergétique) a un impact considérable sur les estimations du fardeau fiscal des industries.

1. Introduction

L'impact des mesures visant à ramener les émissions de gaz carbonique (CO_2) au niveau atteint en 1990, conformément aux dispositions du protocole de Kyoto, a fait l'objet de plusieurs études (voir le chapitre 3 de cet ouvrage). Ainsi, les estimations des effets sur le PIB des réformes de la fiscalité environnementale sur les pays européens oscillent entre +2,5 % et –5 %. Sur les 104 simulations qui ont été examinées dans Hoerner et Bosquet (2001), environ les trois quarts prévoient un effet modeste s'échelonnant entre +0,5 % et –0,5 %. Compte tenu de l'impact global relativement modeste, il est naturel de se pencher plus particulièrement sur la répartition entre industries des impacts d'une réforme de la fiscalité environnementale.

Ce chapitre propose une étude sur la distribution interindustrielle d'une réforme de la fiscalité environnementale telle qu'elle a été évaluée par le ministère de l'Énergie des États-Unis (DOE : U.S. Department of Energy) dans une étude intitulée *Clean Energy Futures Scenarios* (CEFS ; DOE, 2001). Cette recherche démontre l'importance qui doit être accordée à l'évolution technologique dans ces comparaisons intersectorielles. Les tableaux entrées-sorties modifiés, mettant en évidence les progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique, sont utilisés afin de tenir compte des émissions de carbone intrinsèques de chacun des 498 biens de la classification du BEA (Bureau of Economic Analysis). Si l'on suppose que tous les éléments de la fiscalité environnementale seront adoptés, l'augmentation des coûts de production de biens est alors proportionnelle aux émissions de carbone.

L'analyse d'entrée-sortie, effectuée dans le cadre d'une comptabilité nationale cohérente, permet de retracer les impacts direct et indirect de prix et de quantité de certains changements apportés aux intrants manufacturiers. La fonction de production utilisée dans l'analyse d'entrée-sortie suppose une substitution limitée des facteurs. Il est donc nécessaire de suppléer l'analyse d'entrée-sortie par des estimations complémentaires au moyen d'autres approches. Cependant, une fois que les impacts d'une substitution ont été évalués à l'aide d'autres techniques, les analyses d'entrée-sortie offrent le meilleur cadre qui soit pour évaluer les répercussions des changements sur toute l'économie, particulièrement lorsqu'un grand nombre de secteur est considéré.

L'analyse d'entrée-sortie a été élargie à plusieurs reprises, afin d'illustrer les interactions entre l'économie et l'environnement, et ce, dès la fin des années 1960, puis plus tard par Leontief (1970, 1973, 1976) et Leontief et Ford (1972 ; voir James *et al.*, 1978, pour un survol de la littérature). L'application de l'analyse d'entrée-sortie à l'énergie remonte aux années 1970 et au début des années 1980 (Forsund, 1985). Plus récemment, elle a permis l'étude de problématiques touchant les émissions de gaz à effet de serre, et notamment les émissions de CO_2. Citons, par exemple, l'analyse de la distribution par industrie (Goulder, 1992), les changements d'intensité des émissions de carbone (Rose et Chen 1991 ; Proops *et al.* 1993 ; Wier 1998), la répartition du fardeau fiscal par tranche de revenu (Casler et Rafiqui, 1993) et les exigences directes et indirectes en matière de gaz à effet de serre pour un vecteur de demande finale donné (Lenzen, 1998).

En analyse d'entrée-sortie, on applique généralement la loi du prix unique – à savoir un marché unifié pour un bien uniforme, qui ne peut s'échanger qu'à un seul prix. Cette supposition simplifie considérablement l'analyse. Cela dit, cette approximation ne correspond pas à la réalité du secteur de l'énergie. En effet, d'une industrie à l'autre, les prix du même carburant peuvent varier d'un facteur de deux à quatre[1]. Certains travaux antérieurs ont adopté des approches d'entrée-sortie hybrides, à savoir qu'ils ont examiné des énergies et des unités monétaires mixtes (Bullard et Herendeen, 1975 ; Dossani et Preziosi, 1980). Cependant, les études récentes, pour l'évaluation du contenu en carbone ou du fardeau fiscal de la demande finale (Goulder 1992 ; Bernow *et al.*, 1997), font généralement usage d'un modèle à prix unique. Dans le cadre de cette étude, nous y avons substitué une spécification économétrique du prix du carburant à chaque secteur.

La supposition des coefficients entrées-sorties fixes présente aussi un inconvénient majeur, puisqu'elle empêche tout ajustement des producteurs aux fluctuations des prix de leurs intrants. Qui plus est, elle rend la comptabilité de l'évolution technologique laborieuse. Afin d'y remédier, des informations supplémentaires permettent de modifier les coefficients entrées-sorties.

De nombreux modèles négligent l'importance de l'évolution technologique. Le plus souvent, dans les modèles descendants, le rythme de l'évolution technologique est modélisé à l'aide d'une estimation économétrique des équations de la demande en vertu de tendances temporelles propres à un secteur. Ainsi, on suppose implicitement que le rythme de l'évolution technologique peut être interpolé à partir de données antérieures. Si ce procédé est admissible pour un agrégat, il l'est beaucoup moins dans le cas d'une analyse plus détaillée. Les modèles ascendants n'examinent pas, en règle générale, la substitution des entrées sous l'angle des fluctuations des prix, mais tiennent pour acquis que les prix relatifs sont fixés au niveau actuel. Ces modèles tiennent néanmoins compte des informations relatives à certaines technologies disponibles dans un futur proche et déduisent leur impact de la composition des entrées. Ainsi, le rythme de l'évolution technologique future est évalué à l'aide de données techniques particulières. Pour optimiser l'utilisation de toutes les données disponibles, il y aurait lieu de compléter ces modèles en recourant aux fonctions de demande qui illustrent bien la substitution provoquée par les prix.

2. Modèle théorique

Dans le cadre de cette recherche, les entrées d'un tableau des utilisations en dollars courants sont employées. Les prix sont calculés à partir d'une relation empirique avec l'intensité énergétique (dépenses énergétiques relatives à la valeur ajoutée et à la valeur totale des sorties) afin d'évaluer la consommation

1. Voir les discussions et les estimations sur les liens entre l'intensité énergétique et le prix des carburants dans Hoerner et Mutl (2001).

d'énergie en unités physiques permettant de calculer la consommation directe de carbone pour chaque secteur. Ce vecteur des émissions de carbone « directes » deviendra ensuite un vecteur des émissions de carbone « intrinsèques » totales. Les flux du tableau entrées-sorties doivent avant tout être actualisés en dollars courants afin d'y incorporer l'évolution technologique escomptée ou observée. Le modèle élaboré ci-dessous part du principe que l'on connaît les modifications apportées à la matrice des coefficients en unités réelles de production.

2.1. Évolution technologique

Le processus d'ajustement apporté au modèle est décrit ci-dessus par une représentation matricielle simple. En supposant qu'une évolution technologique donnée est exprimée par une modification du tableau des coefficients entrées-sorties, les nouveaux tableaux de flux peuvent être obtenus de la manière suivante. **A** est défini comme la matrice des coefficients entrées-sorties (faisant abstraction de la distinction entre un bien et une industrie), et on peut supposer que la technologie a évolué de telle manière que la nouvelle matrice des coefficients techniques, $\mathbf{A}^*$, est la suivante :

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A} + \mathbf{T} \tag{1}$$

où la matrice **T** représente les améliorations technologiques. Ensuite sont introduits l'ancien et le nouveau vecteur des sorties, respectivement **X** et $\mathbf{X}^*$, ainsi que le vecteur de la demande finale **Y**. La relation entre la demande finale et les nouvelles sorties exigées est la suivante :

$$\mathbf{X}^* = \mathbf{A}^*\mathbf{X}^* + \mathbf{Y} \tag{2}$$

La nouvelle matrice des flux s'obtient alors en multipliant les colonnes de la nouvelle matrice des coefficients $\mathbf{A}^*$ par les éléments correspondants du nouveau vecteur des sorties $\mathbf{X}^*$, ce qui donne la nouvelle matrice des flux $\mathbf{F}^*_{i,j}$:

$$\mathbf{F}^*_{i,j} = \mathbf{A}^*_{i,j}\mathbf{X}^*_j = \mathbf{A}^*_{i,j}\left\{[\mathbf{I} - \mathbf{A}^*]^{-1}\mathbf{Y}\right\}_j \tag{3}$$

Les itérations décrites ci-dessus représentent une approximation de la matrice $[\mathbf{I} - \mathbf{A}^*]^{-1}$ par expansion à l'aide de la somme d'une série géométrique illimitée.

2.2. Calculs des émissions de carbone intrinsèques et des fluctuations des prix

Le vecteur des *émissions directes* est le résultat tangible du processus de production de chaque industrie. L'objectif est ensuite d'obtenir un vecteur des *émissions totales* intrinsèques pour chaque bien en recourant aux émissions directes (propagées durant le processus de production) et aux émissions indirectes associées aux entrées utilisées durant la production de chaque bien, au moyen du carbone « intrinsèque » des 498 biens de la classification du BEA.

En ignorant la distinction entre un bien et une industrie, nous indiquons le total des émissions intrinsèques produites par le bien *i* avec $\mathbf{T}_i$, les émissions directes avec $\mathbf{D}_i$[2], l'entrée du bien *j* dans la production du bien *i* avec $\mathbf{f}_{j,i}$ (calculé en dollars courants), et le total des sorties en dollars courants pour l'ensemble de l'économie du bien *j* avec $\mathbf{Q}_j$. Si l'on suppose que le total des émissions de carbone intrinsèques à un bien est proportionnel à son utilisation à titre d'entrée intermédiaire et de produit final, il est alors possible d'écrire les émissions totales de carbone dans un bien *j* à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}^*_1(\mathbf{f}_{1,i} / \mathbf{Q}_1) + \mathbf{T}^*_2(\mathbf{f}_{2,i} / \mathbf{Q}_2) + \ldots + \mathbf{T}^*_{498}(\mathbf{f}_{498,i} / \mathbf{Q}_{498}) + \mathbf{D}_i \qquad (4)$$

où 498 est le nombre de biens énumérés dans la classification du BEA. L'équation (5) reprend l'assertion ci-dessus, selon laquelle le total des émissions intrinsèques de chaque bien est égal au total des émissions intrinsèques produites par les entrées qui ont servi à la production du bien et du carbone direct émis au cours de ce processus. On peut également représenter le système de ces équations pour tous les biens en recourant à la notation matricielle suivante :

$$\mathbf{T} = \mathbf{B}'\mathbf{T} + \mathbf{D} \qquad (5)$$

où la matrice **B** est transposée et comporte les éléments $\mathbf{b}_{i,j} = \mathbf{f}_{i,j}/\mathbf{Q}_j$, **T** et **D** sont les vecteurs des émissions, respectivement, totales et directes, et **Q** est le vecteur des sorties nécessaires à la production du bien. La matrice **B** est analogue à la matrice entrées-sorties des coefficients, bien par bien **A**, qui comporte les éléments $\mathbf{a}_{i,j} = \mathbf{f}_{i,j}/\mathbf{Q}_i$. Il demeure qu'au lieu des colonnes, ce sont les rangées de la matrice des flux entrées-sorties **B** qui sont divisées par le total des sorties des biens.

En résolvant le système de (5), on obtient en (6) la formule permettant de calculer le total des émissions :

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}')^{-1}\mathbf{D} \qquad (6)$$

où **I** est une matrice d'identité.

Quel est donc le lien avec le modèle de prix de Leontief ? En multipliant l'équation (1) par la taxe sur les combustibles fossiles, par unité, et en divisant par $\mathbf{Q}_i$ on obtient le total des émissions $\mathbf{T}_i$ en fluctuation du prix pour le bien *i* ($\Delta\mathbf{P}_i$)[3]. Cette méthode permet ensuite de convertir les émissions directes $\mathbf{D}_i$ au prorata de la taxe sur les combustibles fossiles de la valeur du bien *i*, qui représente le changement dans la portion de la valeur ajoutée imputable à la taxe sur les combustibles fossiles ($\Delta\mathbf{K}_i$). Ainsi, l'équation (6) devient :

$$\Delta\mathbf{P} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}')\ \Delta\mathbf{K} \qquad (7)$$

2. Les émissions totales et directes sont calculées en unités CTM ; il s'agit d'émissions multi-industrielles associées aux niveaux de production actuels de chaque bien. Il ne s'agit pas d'émissions par unité d'un bien.
3. En supposant que l'augmentation des coûts imputable à la taxe sur les combustibles fossiles se répercute uniquement sur les consommateurs, c'est-à-dire que toute hausse des coûts se reflète sur une base dans le prix majoré de chaque bien.

ce qui est exactement le modèle des prix de Leontief, comme le montre, par exemple, l'équation 9-93 dans Miller et Blair (1985).

Le modèle des prix de Leontief est calculé en accordant une attention plus particulière au rôle des différentes fractions de la valeur ajoutée. Intuitivement, le modèle des prix de Leontief peut être décrit de la façon suivante. Supposons que la taxe sur les combustibles fossiles vienne modifier une fraction de la valeur ajoutée. Supposons aussi que le fardeau de toutes les augmentations des coûts soit entièrement transmis aux consommateurs. Supposons ensuite que l'augmentation du prix final du bien *i* équivaille à la moyenne pondérée des augmentations du prix final des entrées utilisées dans la production de ce bien, plus le changement direct observé dans la proportion de la valeur ajoutée. Cela implique que les facteurs de pondération deviennent la fraction (monétaire) de chaque entrée dans la valeur (monétaire) totale du bien *i*. En d'autres termes :

$$\Delta \mathbf{P}_i = \Delta \mathbf{P}_1 \, (\mathbf{f}_{1,i}/\mathbf{Q}_i) + \Delta \mathbf{P}_2 \, (\mathbf{f}_{2,i}/\mathbf{Q}_i) + \ldots + \Delta \mathbf{P}_{498} \, (\mathbf{f}_{498,i}/\mathbf{Q}_i) + \Delta \mathbf{K}_i \qquad (8)$$

ou à l'aide d'une notation matricielle :

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{A}' \Delta \mathbf{P} + \Delta \mathbf{K} \qquad (9)$$

ce qui nous donne l'équation des prix de type Leontief comme en (7).

La même analyse peut être employée pour mesurer les changements apportés à la valeur ajoutée et évaluer ses niveaux. Ce faisant, nous obtenons des équations qui nous permettent de calculer le prorata des dépenses en main-d'œuvre et en capital, de la taxe sur les combustibles fossiles ou encore des charges sociales par rapport à la valeur monétaire de chaque bien.

3. Application

La procédure décrite à la section 2 a été utilisée pour tenir à jour les tableaux des flux entrées-sorties permettant de calibrer les tableaux du BEA et de prendre en compte l'évolution technologique envisagée dans le rapport *Clean Energy Futures Scenarios* (DOE, 2001). Les entrées d'achat d'énergie inscrites dans le tableau des utilisations ont servi à estimer la consommation d'énergie de chaque secteur et les émissions directes de carbone qui s'y rattachent. Les émissions directes ont ensuite servi à élaborer le vecteur du total des émissions de carbone intrinsèques.

Les propositions de réformes en matière de fiscalité environnementale utilisées dans cette étude s'inspirent des propositions préparées par le DOE (2001). Les deux principales mesures visaient l'application d'une taxe de 50 $ par tonne métrique sur les combustibles fossiles et l'application du recyclage des revenus au moyen d'une réduction des charges sociales. Ensuite, les revenus tirés de la taxe sur les combustibles fossiles ont été alloués au prorata du nombre d'employés de chaque secteur, selon les données des BLS. Les réductions de taxes étaient également censées avoir été entièrement transmises au consommateur, ce qui a permis l'utilisation de la même méthode d'évaluation pour l'augmentation des taxes.

TABLEAU 11.1
Principales mesures envisagées dans le scénario privilégié*

Édifices	Industrie
– Normes d'efficacité pour l'équipement. – Affichage volontaire et stratégies d'utilisation.	– Programmes volontaires. – Ententes volontaires signées avec des secteurs industriels et des associations commerciales.
Transport	**Producteurs d'électricité**
– Ententes volontaires signées avec les constructeurs automobiles visant à réduire la consommation de carburant. – Assurance automobile « Payez à la pompe ».	– Création de normes pour les portefeuilles d'énergie renouvelable et crédits sur la taxe à la production. – Restructuration de l'industrie de l'électricité.
Politiques intersectorielles	
– Multiplication par deux des fonds alloués par le gouvernement fédéral à la recherche-développement.	– Plafonnement des émissions de gaz carbonique et système d'échange des droits d'émission à l'échelle nationale.

* Ces scénarios sont définis par une cinquantaine de politiques. Le tableau ci-dessus reprend les 10 mesures les plus importantes du scénario privilégié. Chaque mesure politique est détaillée selon sa portée et son bien-fondé. Par exemple, la stratégie relative aux « normes d'efficacité pour l'équipement » contient 16 nouvelles normes d'équipement adoptées au fil des ans et comporte différents niveaux d'efficacité minimale. Ces ententes volontaires, qui sont respectées dans le scénario privilégié, auraient les mêmes effets qu'une norme CAFE (Corporate Average Fuel Economy) introduite au même niveau. Pour obtenir plus de précisions à ce sujet, consulter le rapport CEFS (DOE, 2001).

Le tableau 11.1 présente un condensé des mesures proposées dans le rapport du DOE (2001). Parmi celles-ci, la présente étude examine la double autorisation du gouvernement fédéral à couvrir une partie des dépenses engagées dans la R-D et dans la démonstration, qui sont consacrées aux technologies efficaces et écologiques. Étant donné que les fonds alloués à la R-D de démonstration sont dépensés en collaboration avec des partenariats formés avec des entreprises publiques et privées, ils s'alignent sur des ressources octroyées par le secteur privé, ce qui devrait se traduire par une augmentation estimée à 1,4 G$ par an d'ici 2005 (une moitié provenant de fonds fédéraux et l'autre moitié étant versée par le secteur privé à titre de frais partagés), une initiative qui devrait se poursuivre jusqu'en 2020.

Pour illustrer la portée de la taxe de 50 $ sur les combustibles fossiles, le tableau 11.2 montre le fardeau fiscal direct qu'elle représenterait pour les combustibles les plus répandus. En outre, le tableau 11.3 montre tous les effets de l'ensemble de ces mesures sur les industries productrices de combustibles fossiles. Ce dernier comprend l'incidence des réformes de la fiscalité environnementale, le rabais des charges fiscales, les coûts d'investissement supplémentaires ainsi que les économies réalisées sur les factures d'électricité.

TABLEAU 11.2
Prix et fardeau fiscal sur les principaux carburants – Valeurs de 1997

Carburant	Prix	Fardeau fiscal	Taxe en pourcentage du prix
Pétrole ($ par gallon)			
Essence automobile	1,21	0,13	10,98 %
Carburant diesel	1,07	0,15	14,28 %
Huile de chauffage	0,42	0,18	41,86 %
Kérosène	0,83	0,15	17,72 %
Gaz naturel ($ par 1 000 pieds cubes)	4,75	0,82	17,26 %
Électricité (cents par kWh)	6,88	0,92	13,36 %
Charbon ($ par tonne métrique)			
Utilisation résidentielle	60,76	34,82	57,30 %
Utilisation commerciale	36,94	34,82	94,25 %
Utilisation industrielle	38,35	34,50	89,98 %
Services d'électricité	28,77	32,16	111,77 %

Source : Les prix sont des moyennes nationales tirées du Rapport des données nationales sur les prix et les dépenses de 1997 (State Price and Expenditure Data Report 1997 ; EIA 2000), exception faite des données pour le kérosène, qui correspondent à une moyenne pondérée de l'utilisation résidentielle, commerciale et industrielle, les dépenses normales constituant un facteur de pondération ; le fardeau fiscal a été calculé en fonction du coefficient de contenu en carbone publié par le rapport sur les gaz à effet de serre (EIA, 1998) et le contenu thermique total inscrit dans le Rapport national des données sur l'énergie (State Energy Data Report 1997 ; EIA, 2000) ; l'électricité repose sur la production d'émissions de carbone émanant des producteurs d'électricité, conformément au rapport du CEFS (DOE, 2001).

TABLEAU 11.3
Ensemble des majorations du prix des combustibles fossiles

Carburant	1997	Scénario MSQ 2010	Scénario privilégié 2010	Scénario MSQ 2020	Scénario privilégié 2020
Charbon	131,40 %	130,93 %	132,35 %	130,39 %	129,48 %
Pétrole	24,82 %	24,78 %	25,24 %	24,52 %	24,07 %
Gaz naturel	17,84 %	17,78 %	18,02 %	17,69 %	17,29 %
Électricité	13,78 %	13,72 %	13,84 %	13,65 %	13,40 %

3.1. Données sur l'évolution technologique

Le modèle d'entrée-sortie est calibré au moyen du modèle technique du DOE (2001). Ce rapport, le *Clean Energy Futures Scenarios* (CEFS), chiffre les possibilités offertes par les technologies en matière d'économie d'énergie pour remédier à des problèmes tels que celui du réchauffement de la planète. L'étude examine les effets des principales politiques sur les principaux secteurs

de l'économie et recourt ensuite au Système national de modélisation de l'énergie (NEMS : National Energy Modeling System) dont elle se sert comme cadre d'analyse intégré afin d'étudier les interactions entre les différents secteurs et politiques.

Notre modèle, intitulé *Clean Energy Futures Scenarios*, CEFS-NEMS, simule le comportement des marchés américains de l'énergie. Ce modèle reflète une économie de marché, la structure du secteur ainsi que de nombreuses politiques et réglementations énergétiques qui influent sur le comportement du marché. En règle générale, l'impact des normes et des politiques fiscales est évalué à l'aide du CEFS-NEMS, alors que l'incidence des mesures politiques, telles que les accords volontaires, le renforcement de la R-D et l'assistance technique, est très souvent analysée à l'aide d'autres instruments, puis traduite en entrées pour le CEFS-NEMS. L'étape d'intégration permet de prendre en compte l'impact anticipé des changements de consommation de l'énergie observés dans un secteur sur les modes d'utilisation de l'énergie des autres secteurs. Si, par exemple, un grand nombre de producteurs d'électricité décidait d'opter pour le gaz naturel face à l'augmentation constante de la consommation d'énergie par les immeubles et l'industrie, les prix du gaz naturel augmenteraient et inciteraient les consommateurs à se tourner vers d'autres combustibles.

Les changements anticipés suivants ont été intégrés aux exigences en énergie par unité d'extrant afin de modifier les flux des tableaux entrées-sorties. Dans le secteur manufacturier sont groupés les projections en matière de consommation d'énergie et le taux de croissance de la production réelle du secteur utilisé dans l'obtention des résultats du CEFS. Ensuite, l'évolution de l'intensité énergétique en 2020 (voir les tableaux 11.4 et 11.5) a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\begin{aligned}(E_{2020}/Y_{2020}) \,/\, (E_{1997}/Y_{1997}) &= (E_{2020}/E_{1997}) \,/\, (Y_{1997}/Y_{2020}) \\ &= (E_{2020}/E_{1997}) * (1 + g_y)^{23} \qquad (10)\end{aligned}$$

où E représente la consommation d'énergie d'un carburant particulier en BTU, Y les extrants du secteur en prix constants et g le taux de croissance supposé de Y. Les années sont indiquées en indice.

La même procédure a été employée pour le secteur commercial, selon la disponibilité de données semblables. Les données d'efficacité directes ont été utilisées dans le secteur des transports. En effet, le rapport du CEFS prévoit que le parc des autos, les camions légers et les poids lourds amélioreront leur rendement énergétique. Il est aussi prévu que le transport aérien améliorera sa performance en BTU par siège-mille. Des performances analogues devraient s'observer dans les transports ferroviaire et maritime par tonne-mille.

Les changements en matière d'intensité énergétique des carburants témoignent à la fois de l'évolution de la technologie disponible et de la substitution des ressources énergétiques actuelles par d'autres sources à intensité carbonique plus faible. L'ampleur des ajustements projetés dans l'étude du CEFS varie considérablement d'un secteur à l'autre. Les secteurs grands consommateurs d'énergie affichent des réductions parfois supérieures à 50 %, tandis que le secteur commercial enregistre des réductions beaucoup plus faibles.

TABLEAU 11.4
Scénario privilégié – Changements d'intensité énergétique en 2020 (Btu/$)/(Btu/$ en 1997) ; prix constants

	Pétrole	Gaz naturel	Charbon	Électricité
Industries grandes consommatrices d'énergie				
Sidérurgie	0,11	0,41	0,57	0,46
Papier	0,38	0,42	0,18	0,44
Ciment	0,49	0,97	0,44	0,52
Autres industries manufacturières grandes consommatrices d'énergie	0,60	0,73	0,32	0,46
Industries manufacturières moyennement consommatrices d'énergie	0,78	0,71	0,54	0,66
Secteur commercial	0,38	0,69	0,63	0,62
Transport				
Transport routier	0,70	1	N/D	2
Transport aérien	0,78	N/D	N/D	2
Transport ferroviaire	0,72	N/D	N/D	0,72
Transportation maritime	1,20	N/D	N/D	1,56
Pipelines	N/D	1,14	N/D	N/D
Production d'électricité	0,81	0,56	0,99	1

TABLEAU 11.5
Scénario privilégié – Changements d'intensité énergétique en 2010 (Btu/$)/(Btu/$ en 1997) ; prix constants

	Pétrole	Gaz naturel	Charbon	Électricité
Industries manufacturières grandes consommatrices d'énergie				
Sidérurgie	0,26	0,54	0,68	0,61
Papier	0,52	0,42	0,24	0,61
Ciment	0,77	1,16	0,58	0,70
Autres industries manufacturières grandes consommatrices d'énergie	0,79	0,81	0,39	0,65
Industries manufacturières moyennement consommatrices d'énergie	0,90	0,84	0,64	0,80
Secteur commercial	0,46	0,83	0,76	0,79
Transport				
Transport routier	0,87	1	N/D	2
Transport aérien	0,85	N/D	N/D	2
Transport ferroviaire	0,82	N/D	N/D	0,72
Transport maritime	1,05	N/D	N/D	1,71
Pipelines	N/D	1,04	N/D	N/D
Production d'électricité	0,63	0,61	0,99	1

3.2. Sources des données sur l'énergie

Le calcul des émissions directes de carbone des 498 biens pour l'année de référence provient des émissions de carbone des principaux secteurs publiées par l'Energy Information Administration (EIA, 1997) et des achats d'énergie en dollars par type (charbon, pétrole, gaz naturel et électricité) figurant dans les tableaux entrées-sorties de 1996 dressés par le BEA (Planting, 2000). Plusieurs autres ressources supplémentaires sont également disponibles, telles que la *Manufacturing Energy Consumption Survey*, MECS (EIA, 1997a) pour le secteur industriel, le *Transportation Energy Databook* (ORNL, 1998) et le *Residential Transportation Energy Consumption Survey* (EIA, 1993) pour le secteur des transports, et le *Electric Power Annual* (EIA, 1998) pour la consommation de carburant par les services publics et privés. Les projections d'émissions de carbone reposent sur les prévisions du rapport du CEFS.

Les estimations relatives aux émissions de carbone ont été modifiées pour évaluer la proportion de la consommation d'énergie (autres que les combustibles) dans le secteur industriel (à partir des données parues dans le EIA, 1997). Le contenu moyen en carbone de l'électricité d'origine fossile a été calculé et une « charge d'égalisation » a été ajoutée à l'électricité nucléaire et à l'hydroélectricité. Cela a permis d'estimer que l'énergie nucléaire et l'hydroélectricité émettaient le même contenu en carbone par kWh. Par conséquent, ces émissions de carbone ne sont pas de véritables émissions de carbone, mais plutôt des « émissions de carbone au même montant imposable ». En multipliant le vecteur d'émissions par un taux de taxe sur les combustibles fossiles, on obtient l'estimation du fardeau fiscal réel de chaque industrie. Des projections en matière d'emploi de la BLS (1999) ont servi à déterminer la réduction en revenu d'impôt des salariés.

3.3. Imputation sur les prix

Il est courant en analyse d'entrée-sortie d'utiliser un prix unique pour évaluer les unités physiques d'une unité de production à partir des achats en dollars. Le prix constant de chaque bien est égal au total des achats de chaque bien en dollars divisé par le total des achats en unités physiques (telles que des barils ou des tonnes). Une fois que ce ratio a été calculé pour chaque bien énergétique répertorié dans la classification d'entrée-sortie, on peut supposer que le prix que chaque secteur paye pour un bien énergétique est le même pour les 498 produits répertoriés.

Comme nous l'avons vu plus haut, la supposition du prix unique est fermement rejetée par les données du secteur pour lequel nous avons les meilleures données disponibles, à savoir l'industrie manufacturière. L'examen des prix que différentes industries manufacturières ont payé pour un même type de carburant a en effet permis de relever une grande variation dans le prix de l'énergie. En analysant les données du rapport 1994 Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS) de l'Energy Information Administration (EIA), on observe que le prix payé par unité physique de carburant variait

entre les industries grandes consommatrices d'énergie, qui payaient les tarifs les moins élevés, et les industries moins grandes consommatrices d'énergie qui payaient plus. Cette variation pouvait correspondre à un facteur de deux à quatre, selon le carburant.

En réponse à cet état de fait, une imputation a été élaborée permettant d'évaluer la consommation des carburants et d'électricité à l'aide des classifications entrées-sorties des secteurs commercial et industriel (le transport étant traité séparément). Premièrement, le prix de chaque carburant payé par chaque industrie a été estimé par un modèle économétrique. Deuxièmement, les dépenses inscrites au tableau entrées-sorties pour un carburant ont été divisées par le prix évalué afin d'obtenir l'estimation préliminaire de la consommation de ce type de carburant par les industries en question. Troisièmement, la consommation de chaque type de carburant principal de chaque secteur (commercial, industriel et transport) a été ajoutée. Puis, une égalisation des totaux de contrôle des secteurs a été réalisée, en appliquant un ajustement du pourcentage, uniforme à toutes les catégories des secteurs consommateurs de carburant. Les totaux de contrôle correspondaient aux totaux de l'électricité ou des carburants d'un secteur donné présentés dans les rapports sur les émissions de gaz à effet de serre publiés par l'EIA (1998) et dans les projections tirées du rapport du CEFS (DOE, 2001).

À partir des données du MECS (tableau A1), une vaste gamme de relations fonctionnelles a été testée entre l'intensité et le prix d'énergie à l'aide de la méthode de régression des moindres carrés. Les relations fonctionnelles non linéaires suivantes entre le prix de l'énergie facturé à chaque secteur et leurs ratios de dépenses en énergie par rapport à leurs valeurs ajoutées donnaient de meilleurs résultats :

$$p_i = \alpha + \beta \ln (E_i / VA_i) \tag{11}$$

où p_i représente le prix d'un type de carburant donné payé par un secteur i en dollars par unité physique et VA_i représente le total des valeurs ajoutées du secteur en question. (Veuillez remarquer qu'un système complet de toutes ces équations exigerait que l'on ajoute des indices à p_i, α, β, et E_i pour différencier les types de carburant.) À partir des estimations des relations entre chaque type d'énergie mentionnées ci-dessus, on peut calculer la consommation de chaque type de carburant pour chaque secteur de la façon suivante :

$$F_i = E_i [\alpha + \beta \ln (E_i / VA_i)] \tag{12}$$

où E_i et VA_i sont disponibles pour les 498 biens répertoriés dans le tableau entrées-sorties. Cette procédure d'imputation a été appliquée à chaque type de combustible fossile ainsi qu'à l'électricité[4].

Après avoir évalué la consommation de chaque type de carburant pour chacun des 498 biens classifiés, et ce, à l'aide de la procédure d'imputation décrite à la section 3.3, les totaux de chaque type de carburant et d'électricité

4. On peut se procurer les résultats économétriques des équations de combustibles en communiquant avec l'auteur.

consommés sont contraints de converger avec les totaux de contrôle pour ce carburant et ce secteur. Pour ce faire, la consommation de carburant nécessaire à la production par le secteur en question de chaque bien classifié a été multipliée par le ratio de contrôle total par rapport au total sectoriel. Les totaux de contrôle étaient les totaux de cette catégorie de carburant/secteur des gaz à effet de serre (EIA, 1998), pour lesquels des ajustements spécifiques ont été faits pour les secteurs industriel, commercial, du transport et de l'électricité[5].

3.4. Évolution de la demande finale

La demande finale sur laquelle reposent les estimations de l'étude du CEFS diffère selon les scénarios et les années. Cela nous a contraints de recourir aux matrices de flux ajustés de production et d'utilisation dans l'obtention des matrices de coefficient. Pour ce faire, chaque élément des colonnes de la matrice d'utilisation et des rangées de la matrice de production a été divisé par l'ancien vecteur de la demande finale. Cela donne des matrices de coefficient qui enregistrent les achats interindustriels exigés par unité de sortie.

La supposition d'une technologie linéaire signifie que, lorsque la demande finale change, on peut simplement multiplier (élément par élément) les rangées de la matrice d'utilisation par les colonnes de la matrice de production pour obtenir les matrices de flux exigées et ainsi déterminer le nouveau vecteur de la demande finale.

L'étude du CEFS-NEMS permet de déterminer la quantité de charbon (en BTU ou en tonnes de carbone) que chaque sous-secteur acquerra en 2020, *après* les changements de l'évolution technologique et de la demande finale. Ainsi on peut utiliser le vecteur du charbon pour l'ancienne demande finale et forcer les totaux sous-sectoriels aux résultats du CEFS-NEMS. Cela signifie que l'on accepte les estimations tirées de l'étude du CEFS comme traduisant les changements escomptés en matière d'évolution technologique, et de la composition du niveau de la demande finale.

La procédure décrite ci-dessus fournit les estimations de la consommation de chaque carburant (en BTU) et pour chaque industrie. Celles-ci se traduisent facilement, à l'aide des coefficients de carbone, en un vecteur des émissions directes de carbone par industrie en 2010 et 2020.

4. Résultats et conclusion

Le tableau 11.6 résume les résultats de l'analyse. Si la répartition des fardeaux fiscaux de l'ensemble des mesures était modélisée sur l'impact d'une analyse d'entrée-sortie sans tenir compte d'une phase de transition et de l'évolution technologique, il y aurait quelques secteurs grands consommateurs d'énergie

5. Des informations supplémentaires sur les ajustements de ces secteurs peuvent être obtenues directement de l'auteur.

TABLEAU 11.6
Répartition des fluctuations des prix pondérée par la part en PIB

Fluctuation des prix	Aucune évolution technologique	Évolution technologique en 2010	Évolution technologique en 2020
+4 % et plus	3,29 %	3,30 %	3,20 %
+3 à +4 %	0,03 %	1,05 %	0,04 %
+2 à +3 %	2,18 %	1,98 %	0,08 %
+1 à +2 %	4,00 %	6,63 %	0,10 %
0 à +1 %	29,15 %	43,70 %	11,17 %
–1 à 0 %	51,05 %	42,09 %	76,38 %
–2 à –1 %	9,42 %	0,73 %	7,66 %
–3 à –2 %	0,37 %	0,52 %	1,04 %
–3 % et moins	0,52 %	0,00 %	0,33 %

qui feraient face à une escalade des prix de production de 2 % ou plus. Pour une présentation plus détaillée des résultats et une discussion en profondeur sur les incidences de ces politiques, consulter Hoerner et Mutl (2001).

Les industries potentiellement les plus touchées bénéficieraient des mesures les plus incitatives pour accroître leur rendement énergétique. Il ressort de l'étude du CEFS-NEMS que les secteurs les plus grands consommateurs d'énergie ont assez de latitude pour améliorer leur performance en la matière. Par exemple, les pièces coulées d'aluminium coûteraient environ 4,6 % plus cher à produire sans les éventuelles améliorations de rendement. Toutefois, en 2020, lorsque l'industrie aura eu le temps d'investir dans l'amélioration de l'efficience en réaction aux fluctuations des prix de ses intrants, l'augmentation du coût de production ne devrait pas dépasser 1,70 %.

Les autres industries grandes consommatrices d'énergie affichent une tendance analogue : ainsi, on observe une diminution de la fluctuation des prix qui passe de 11,1 % à 5,2 % dans l'industrie du béton, de 7,6 % à 5,0 % dans le secteur de la chaux, de 7,2 % à 3,9 % dans le minerai métallique, de 5,6 % à 2,3 % dans les bidons métalliques et de 5,6 % à 2,6 % en sidérurgie. Contrairement à cette tendance, on observe une augmentation de l'intensité énergétique dans les secteurs du transport maritime et de l'acheminement par oléoduc. Cette hausse pourrait s'expliquer par une utilisation accrue de ces moyens de transport.

Dans l'ensemble, la proportion des industries inversement touchées change considérablement. Une analyse d'entrée-sortie semble suggérer qu'à défaut d'évolution technologique, 38,7 % des industries américaines (pondérées par leur contribution au PIB) pourraient être affectées par la fiscalité environnementale. Cette proportion est ramenée à quelque 14,6 % en 2020. Ces comparaisons démontrent le rôle important que joue le changement technologique. En effet, il pourrait être le plus important, voire le principal, facteur susceptible de déterminer le résultat des efforts de modélisation dans le secteur de l'énergie.

Références bibliographiques

BERNOW, S., FULMER, M., PETERS, I., RUTH, M., et SMITH, D. 1997. *Carbon Taxes with Tax Reductions in Minnesota*. Boston, MA : Tellus Institute. Disponible à : <www.me3.org/projects/greentax/tellus/tellus.html>.

BUREAU OF LABOR STATISTICS (BLS). 1999. *Employment Outlook : 1998-2008 ; Macroeconomic Data, Demand Time Series and Input-Output (I-O) Tables.* Washington, DC : U.S. Department of Labor.

BULLARD, C., et HERENDEEN. R. 1975. Energy impact of consumption decisions. *Proceedings of the IEEE* 63 : 484-493.

CASLER, S.D., et RAFIQUI, A. 1993. Evaluating fuel tax equity : Direct and indirect distributional effects. *National Tax Journal* : 197-205.

DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). 2001. *Clean Energy Futures Scenarios*. Washington, DC : U.S. Department of Energy.

DOSSANI, N., et PREZIOSI, A. 1980. Employment-energy-economic interactions. *Final Report to the U.S. Department of Energy.* Consad Research Corporation.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). 1996. *Electric Power Annual 1995, Volume II*. Washington, DC : U.S. Department of Energy.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). 1997. *Manufacturing Energy Consumption Survey 1994*. Washington, DC : U.S. Department of Energy.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). 1998. *Emissions of Greenhouse Gases in the United States 1997*. Washington, DC : U.S. Department of Energy.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). 2000. *State Energy Data Report 1997*. Washington, DC : U.S. Department of Energy.

FORSUND, F.R. 1985. Input-output models, national economic models, and the environment. Dans *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, Kneese, V., Sweeney, J.L. (dir.). Amsterdam, The Netherlands : Elsevier, 325-341.

GOULDER, L.H. 1992. Carbon tax design and US industry. Tax policy & the economy. Dans *Cambridge, Stanford University and NBER*, J.M. Poterba (dir.). 6 : 59-103.

HOERNER, A.J., et BOSQUET, B. 2001. *Environmental Tax Reform : The European Experience*. Washington, DC : Center for a Sustainable Economy.

HOERNER, A.J., et MUTL, J. 2001. *Good Business : A Market Analysis of Energy Efficiency Policy*. Washington, DC : Center for a Sustainable Economy.

JAMES, D.E., JANSEN, H., et OPSCHOOR, J.B. 1978. *Economic Approaches to Environmental Problems*. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier.

LABEY, W.C. 1997. *Modeling Mineral and Energy Markets*. Boston, MA : Kluwer Academic Publishers.

LENZEN, M. 1998. Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption : An input-output analysis. *Energy Policy* 26 : 495-506.

LEONTIEF, W. 1970. Environmental repercussions and the economic structure : An input-output approach. *Review of Economics and Statistics* 52 : 262-277.

LEONTIEF, W. 1973. National income, economic structure, and environmental externalities. Dans *The Measurement of Economic and Social Performance, Studies in Income and Wealth*. M. Moss (dir.). *NBER* 38 : 565-576.

LEONTIEF, W. 1976. *The Structure of American Economy*. White Plains : International Arts and Sciences Press.

LEONTIEF, W., et FORD, D. 1972. Air pollution and the economic structure : Empirical results of input-output computations. Dans *Input-Output Techniques*, Brody, A, Carter, A.P. (dir.). Amsterdam, The Netherlands : North-Holland, 9-30.

MILLER, R.E., et BLAIR, P.D. 1985. *Input-Output Analysis : Foundations and Extensions*. Engelwood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY (ORNL). *1998. Transportation Energy Data Book Edition 18*. Davis, S.C. (dir.). Washington, DC : Center for Transportation Analysis Energy Division.

PLANTING, M. 2000. Personal communication, BEA (Bureau of Economic Analysis).

PROOPS, J.L., FABER, M., et WAGENHALS, G. 1993. *Reducing CO_2 Emissions : A Comparative Input-Output Study for Germany and the UK*. Berlin, Germany : Springer-Verlag.

ROSE, A., et CHEN, C.Y. 1991. Sources of change in energy use in the U.S. economy. *Resources and Energy* 13 : 1-21.

WIER, M. 1998. Sources of change in emissions from energy : A structural decomposition analysis. *Economic Systems Research* 10 : 99-112.

CHAPITRE 12

TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES AVEC CONTRAINTE DE CAPITAUX ET PROTECTION ENVIRONNEMENTALE

Modèles et applications aux Philippines†

KAZUHIKO NISHIMURA
Université Nihon Fukushi

† Texte récompensé en 2002 par le prix institué à la mémoire de Wassily Leontief. Pour une version en anglais de ce texte, voir Nishimura (2003).

Résumé

Le présent document étudie l'efficacité de différents transferts technologiques entre les pays développés et les pays en développement à l'aide de modèles élargis d'optimisation dynamique d'entrée-sortie. Il porte notamment sur l'incidence que l'investissement de capitaux dans les transferts technologiques a sur les changements structurels ainsi que sur l'état de bien-être mesuré par la consommation et sur l'état de l'environnement dans les pays en développement. Ce modèle de transfert technologique est ensuite linéarisé, ce qui permet de résoudre des problèmes à plus grande échelle. Puis, ce modèle linéarisé est évalué et appliqué afin de déterminer la période optimale du transfert technologique du Japon aux Philippines.

1. Introduction

Les pays asiatiques en développement sont confrontés à de graves problèmes d'environnement liés à une croissance économique fulgurante. Or, le transfert des technologies de pointe pourrait éventuellement stimuler cet essor économique tout en remédiant aux problèmes environnementaux touchant les pays en développement. Bien que les connaissances en technologies de pointe puissent être transférées dans le cadre d'une coopération internationale, leur application pratique n'en exigerait pas moins des installations de pointe ainsi que d'importants investissements en capitaux. Les capitaux étant quelque peu limités dans les pays en développement, il importe de les allouer judicieusement à chaque technologie de pointe.

La mise en œuvre d'un programme d'investissement dans un pays en développement doit se conformer au système de production économique en place. Les sorties d'un système économique, qui devraient être influencées par les investissements en capitaux, pourraient être soit consommées, soit réinvesties dans de nouvelles technologies de pointe. Au sein du système de reproduction économique du Japon, le débit de la consommation à l'origine du « bien-être économique » sera affecté par les décisions de consommation et d'investissement, et ce, à chaque étape du processus de décision.

L'existence d'interdépendances technologiques dans un système de production multisectoriel constitue un autre sujet de préoccupation. En effet, l'établissement d'une technologie de pointe dans une industrie pourrait affecter la structure technologique de tout un système économique, ce qui finirait par avoir des effets néfastes sur la performance de chaque industrie en matière de sorties et d'environnement. Par conséquent, il y aurait lieu de coordonner les placements de capitaux dans les industries afin de mieux contrôler la transition dynamique des structures technologiques et d'obtenir l'effet recherché relatif à l'état du bien-être mesuré par la consommation et l'environnement.

Nous allons incorporer les deux éléments de planification des investissements mentionnés ci-dessus au fameux cadre dynamique d'entrée-sortie, ce qui pourrait engendrer une croissance économique optimale face à l'existence d'interdépendances multisectorielles. Dans le cadre de modèles d'entrée-sortie dynamiques typiques, nous tenons généralement pour acquis que la structure technologique est constante au fil des ans. Dans le cas présent, nous présumons que l'entité de planification centrale d'une économie en développement est en mesure de décider dans quelles technologies de pointe et dans quelle industrie investir. Cette toile de fond va permettre d'intégrer les changements structurels à un modèle de transferts technologiques.

La fonction économique du modèle de transfert technologique est la somme de la valeur actualisée du bien-être, que l'on mesure en fonction de la valeur pondérée de la consommation et des conditions environnementales au cours de chaque période. Le seul facteur de production primaire est la main-d'œuvre, qui ne peut dépasser les prévisions démographiques exogènes. Les variables de décision sont le débit de la consommation et le débit des

sorties, qui déterminent ensuite la substitution (progrès) de la technologie de chaque secteur industriel. Cette dernière finira par avoir une incidence sur la productivité et le bien-être environnemental, ou fonction économique, du pays en développement.

Dans la prochaine partie, nous allons commencer par appliquer le modèle de transfert technologique, en investissant dans deux technologies, dans le cadre dynamique d'entrée-sortie. Puis, dans la troisième partie, nous présenterons certaines hypothèses simplificatrices et nous réduirons le modèle afin de l'illustrer sous la forme d'un problème de programmation linéaire. Nous élargirons ensuite ce modèle de programmation linéaire afin d'y englober les dégâts causés à l'environnement. Dans la quatrième partie, nous évaluerons un modèle de programmation linéaire de 59 secteurs (tableau 12.1), ce qui nous permettra d'étudier le transfert technologique optimal du Japon aux Philippines au moyen des données entrées-sorties disponibles. Nous effectuerons également quelques simulations empiriques en fonction de différents taux d'escompte et de facteurs de pondération pour la consommation et les conditions environnementales.

2. Transfert technologique dans un système d'entrée-sortie

2.1. Système dynamique d'entrée-sortie

Nous commençons par le modèle d'entrée-sortie dynamique ordinaire d'une industrie n (Takayama, 1994). Posons $\mathbf{x}(t)$ comme vecteur n dont le $i^{\text{ième}}$ élément, $x_i(t)$, représente les sorties (niveau d'exploitation) de la $i^{\text{ième}}$ industrie à la période t. Disons que $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ est la matrice $n \times n$, où a_{ij} représente les entrées actuelles du $i^{\text{ième}}$ bien utilisé par la $j^{\text{ième}}$ unité de bien produit, et notamment la partie utilisée pour maintenir le niveau d'exploitation durant la période t. Admettons que $\mathbf{B} = [b_{ij}]$ est une matrice $n \times n$, où b_{ij} représente la quantité du $i^{\text{ième}}$ bien investie dans la $j^{\text{ième}}$ industrie en vue d'augmenter la production d'une unité. Supposons que $\mathbf{c}(t)$ est un vecteur n dont l'$i^{\text{ième}}$ élément est $c_i(t)$, à savoir la demande nationale (demande de consommation, par exemple) du $i^{\text{ième}}$ bien durant la période t. Nous pouvons maintenant formuler les relations d'équilibre de base entre l'offre et la demande pour le $i^{\text{ième}}$ bien à l'aide de l'expression suivante :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j(t) + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}[x_j(t+1) - x_j(t)] + c_i(t) \qquad (1)$$

ou de la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{x}(t+1) - \mathbf{x}(t)] + \mathbf{c}(t). \qquad (2)$$

Dans le cas présent, nous supposons que les capitaux circulent librement d'une industrie à l'autre, et qu'ils sont employés à bon escient de telle sorte que $\sum_{j=1}^{n} b_{ij}x_j(t)$ dans (1) correspond à l'offre et à la demande de capitaux ($i = 1, 2, \ldots, n$). L'équation (2) représente l'équation des sorties de base

TABLEAU 12.1
Les 59 secteurs industriels considérés

Nº	Secteurs industriels	Nº	Secteurs industriels
1.	Production agricole	33.	Fer et acier
2.	Bétail et volaille	34.	Métaux non ferreux
3.	Pêche	35.	Produits métalliques ouvrés
4.	Foresterie	36.	Équipement à l'exception des machines électriques
5.	Exploitation minière	37.	Matériel électrodomestique
6.	Viande et produits à base de viande	38.	Autres engins et appareils électroniques
7.	Produits laitiers	39.	Véhicules, pièces et accessoires automobiles
8.	Riz blanchi et maïs ; farine ; produits de boulangerie	40.	Motos et vélos
9.	Sucre et confiserie	41.	Construction navale et réparation des navires
10.	Préparation des poissons	42.	Autres engins de transport
11.	Huiles et matières grasses	43.	Marchandises et produits divers
12.	Alimentation animale	44.	Électricité, gaz et vapeur
13.	Autres produits alimentaires	45.	Réseaux d'aqueduc et alimentation en eau
14.	Boissons	46.	Construction générale
15.	Fabricants de tabac	47.	Commerce de gros et de détail
16.	Fabricants de textile	48.	Transport ferroviaire
17.	Vêtements et autres articles de confection	49.	Transport routier
18.	Produits de bois et de liège	50.	Transport maritime
19.	Fournitures et accessoires fixes, en bois	51.	Transport aérien
20.	Papier et produits de papier	52.	Services d'entreposage et des autres services liés au transport
21.	Édition et impression	53.	Services des postes et des télécommunications
22.	Cuir et produits en cuir	54.	Finances et assurances
23.	Produits chimiques de base	55.	Immobilier
24.	Produits de fertilisation et pesticides	56.	Propriétaires de logements
25.	Médicaments	57.	Services d'hôtellerie et de restauration
26.	Autres produits chimiques	58.	Autres services privés
27.	Produits en matière plastique	59.	Services du gouvernement
28.	Produits en caoutchouc		
29.	Produits du pétrole et du charbon		
30.	Articles de poterie, porcelaine et terre cuite		
31.	Verre et produits de l'industrie du verre		
32.	Autres produits minéraux non métalliques		

du système d'entrée-sortie dynamique. Les matrices **A** et **B** sont les matrices actuelles respectivement des coefficients d'entrées et des coefficients de capitaux. La seule contrainte majeure qui pèse sur les ressources est la suivante : la somme de travail ne peut dépasser l'offre exogène de main-d'œuvre durant la période t. Disons que $\mathbf{a}_0 = [a_{0j}]$ est un vecteur ligne de dimension n, où a_{0j} représente la main-d'œuvre utilisée par unité du $j^{\text{ième}}$ bien produit. La formule $a_{0j}\, x_j(t)$ correspond à la main-d'œuvre nécessaire à l'industrie ; les besoins totaux en main-d'œuvre de toute l'économie sont calculés ainsi :

$$\mathbf{a}_0\mathbf{x}(t). \tag{3}$$

Supposons que L(t) représente l'offre exogène de main-d'œuvre durant la période *t*. La contrainte en matière de main-d'œuvre sera formulée en ces termes :

$$\mathbf{a}_0\mathbf{x}(t) \leq \mathrm{L}(t) \tag{4}$$

La principale contrainte du modèle de planification issu du système d'entrée-sortie dynamique est posée en (2) et (4), où x(*t*) sert de variable de contrôle, à l'exception de x(0), qui sera donné afin de respecter la condition initiale. En règle générale, la fonction économique est la valeur actualisée du débit de consommation, évaluée par la fonction de bien-être social U par rapport au taux d'escompte ρ et à l'horizon prévisionnelle T, c'est-à-dire

$$\max_{c(t)} \sum_{t=0}^{\mathrm{T}} [1 + \rho]^{-t}\, \mathrm{U}(\mathbf{c}(t)). \tag{5}$$

2.2. Modèle de transfert technologique

Nous allons maintenant rendre endogène l'établissement d'une technologie de pointe dans le système d'entrée-sortie dynamique d'un pays en développement. Nous utiliserons à cette fin les termes « traditionnel » et « de pointe » afin d'indiquer s'il s'agit, respectivement, des technologies d'un pays en développement ou de celles d'un pays industrialisé. Le planificateur économique a le choix puisqu'il peut investir soit dans les technologies de pointe, soit dans les technologies traditionnelles. Examinons avant ce qui se passera si aucun capital n'est investi dans le cadre dynamique d'entrée-sortie.

La formule $\overline{\mathbf{A}} = \left[\overline{a}ij\right]$ représente la matrice des coefficients d'entrées, qui ne tient pas compte des entrées nécessaires au maintien du niveau des sorties. L'équation d'équilibre (2) sera dès lors réduite ainsi :

$$x(t) = \overline{A}x(t) + c(t). \tag{6}$$

Par ailleurs, le capital disponible (installations de production) va naturellement se déprécier et entraîner la dévaluation de $x_i(t)$, sans l'aide des entrées nécessaires au maintien des sorties. Admettons maintenant que l'on représente la déflation enregistrée à l'aide de la fonction $f_i(\cdot)$ suivante :

$$x_i(t+1) = f_i(x_i(t)) \qquad df_i(\cdot)\,/\,d(\cdot) \leq 0 \tag{7}$$

Nous pouvons approximer ce genre de fonction à l'aide de la combinaison de fonctions linéaires (affines) suivante, en utilisant $\alpha_i > 0$ et $\beta_i > 0$ comme paramètres scalaires pour désigner les caractéristiques de déflation des sorties dans chaque industrie *i*.

$$x_i(t+1) = \begin{cases} -\alpha_i x_i(t) + \beta_i & \text{si} \quad x_i(t) > 0 \\ 0 & \text{autrement.} \end{cases} \tag{8}$$

Nous allons maintenant incorporer l'option « aucun investissement » au système d'entrée-sortie et, ce faisant, rendre endogène la substitution entre les technologies traditionnelles et les technologies avancées. Les exposants « *a* » et « *d* » ci-après représentent respectivement les paramètres et les variables

des technologies avancées et des technologies traditionnelles. Nous allons reformuler l'équation d'équilibre (1) du modèle de transferts technologiques en fonction du système linéaire, en tenant compte de (6), ce qui donne :

$$x_i^a(t) + x_i^d(t) = \sum_{j=1}^{n}\left[g_{ij}^a(t) + g_{ij}^d(t)\right] + \sum_{j=1}^{n}\left[h_{ij}^a(t) + h_{ij}^d(t)\right] + c_i(t)$$

$$g_{ij}^a(t) = \begin{cases} a_{ij}^a x_j^a(t) & \text{si} \quad x_j^a(t+1) \geq x_j^a(t) \\ \bar{a}_{ij}^a x_j^a(t) & \text{autrement} \end{cases}$$

$$g_{ij}^d(t) = \begin{cases} a_{ij}^d x_j^d(t) & \text{si} \quad x_j^d(t+1) \geq x_j^d(t) \\ \bar{a}_{ij}^d x_j^d(t) & \text{autrement} \end{cases}$$

$$h_{ij}^a(t) = \begin{cases} b_{ij}^a[x_j^a(t+1) - x_j^a(t)] & \text{si} \quad x_j^a(t+1) \geq x_j^a(t) \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

$$h_{ij}^d(t) = \begin{cases} b_{ij}^d[x_j^d(t+1) - x_j^d(t)] & \text{si} \quad x_j^d(t+1) \geq x_j^d(t) \\ 0 & \text{autrement.} \end{cases} \tag{9}$$

Un système d'entrée-sortie dynamique associé à des technologies transférables (9) doit aller de pair avec les contraintes déflationnistes suivantes, ce qui permet de maintenir la linéarité, à l'aide de la catégorie de fonctions telle que (8).

$$x_i^a(t+1) = \begin{cases} -\alpha_i^a x_i^a(t) + \beta_i^a & \text{si} \quad x_i^a(t+1) < x_i^a(t) \ et \ x_i^a(t) > 0 \\ 0 & \text{si} \quad x_i^a(t+1) < x_i^a(t) \ et \ x_i^a(t) \leq 0 \end{cases}$$

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} -\alpha_i^d x_i^d(t) + \beta_i^d & \text{si} \quad x_i^d(t+1) < x_i^d(t) \ et \ x_i^d(t) > 0 \\ 0 & \text{si} \quad x_i^d(t+1) < x_i^d(t) \ et \ x_i^d(t) \leq 0. \end{cases} \tag{10}$$

La contrainte de main-d'œuvre (4) sera également réduite comme suit :

$$\sum_{j=1}^{n}\left[g_{0j}^a(t) + g_{0j}^d(t)\right] \leq \mathrm{L}(t),$$

$$g_{0j}^a(t) = \begin{cases} a_{0j}^a x_j^a(t) & \text{si} \quad x_j^a(t+1) \geq x_j^a(t) \\ \bar{a}_{0j}^a x_j^a(t) & \text{autrement} \end{cases}$$

$$g_{0j}^d(t) = \begin{cases} a_{0j}^d x_j^d(t) & \text{si} \quad x_j^d(t+1) \geq x_j^d(t) \\ \bar{a}_{0j}^d x_j^d(t) & \text{autrement.} \end{cases} \tag{11}$$

Ainsi, le modèle de transfert technologique est formé de (9), (10) et (11) et de la linéarisation adéquate de la fonction économique. Remarquez que nous avons également besoin de connaître $x^a(0) = 0$ et de $x^b(0)$ afin de respecter la condition initiale. On interprète généralement ce genre de modèle ainsi que les formules introduites par « si, autrement » comme un modèle d'optimisation en recourant à une combinaison de techniques de programmation linéaire par nombres entiers.

3. Modèle de programmation linéaire avec prise en compte de l'environnement

A priori, nous savons que le transfert de toute technologie avancée profite souvent au pays en développement. En revanche, la matrice $\mathbf{B}^d$ fait bien souvent défaut au pays en développement. Voilà pourquoi nous avons décidé de consacrer cette sous-section à l'étude d'un pays en développement qui n'investirait aucun capital dans les technologies traditionnelles, ni même pour le maintien du niveau de production. Dans ce cas de figure, nous aurions un équivalent de deux pays ayant les mêmes caractéristiques géographiques.

Conformément aux suppositions précédentes, nous savons que $x_j^a(t+1) \geq x_j^a(t)$ et $x_j^d(t+1) < x_j^d(t)$ pour tous les j et t. Les contraintes (9) et (11) seront alors réduites de la façon suivante :

$$x_i^a(t) + x_i^d(t) = \sum_{j=1}^{n} [a_{ij}^a x_j^a(t) + \bar{a}_{ij}^d x_{ij}^a(t)] + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}^a [x_j^a(t+1) - x_j^a(t)] + c_i(t) \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{n} [a_{0j}^a x_j^a(t) + \bar{a}_{0j}^d x_j^d] \leq L(t) \quad (13)$$

Par ailleurs, $x_i^d(t)$ sera entièrement exogène puisqu'il s'agit des seules variables sujettes à déflation sans aucun investissement. Au demeurant, nous n'avons plus à maintenir la linéarité des contraintes en matière de déflation, y compris la déflation endogène, comme dans l'équation (10). Ainsi, $x_i^d(t)$ et la condition initiale $x_i^d(0)$ sont déterminés de l'extérieur afin de respecter la formule (7).

On peut ainsi énoncer ce type de modèle de transfert technologique comme un problème de programmation linéaire. Par souci de commodité, nous reformulons (12) et (13), à l'aide des termes de matrices et de vecteurs.

$$\mathbf{x}^a(t) + \mathbf{x}^d(t) = \mathbf{A}^a \mathbf{x}^a(t) + \bar{\mathbf{A}}^d \mathbf{x}^d(t) + \mathbf{B}^a [\mathbf{x}^a(t+1) - \mathbf{x}^a(t)] + \mathbf{c}(t), \quad (14)$$

$$\mathbf{a}_0^a x^a(t) + \mathbf{a}_0^d x^d(t) \leq L(t). \quad (15)$$

Pour les besoins de cette application, nous linéarisons la fonction objective à optimiser (5). Pour faire en sorte que cette analyse soit aussi simple que possible, nous recourons à la fonction objective linéaire à optimiser suivante :

$$\max_{z(t)} \sum_{t=0}^{T} [1+\rho]^{-t} z(t) \quad (16)$$

où $z(t)$ doit satisfaire la condition,

$$p_i c_i(t) = \omega_i z(t), \qquad \sum_{i=1}^{n} \omega_i = 1, \qquad z(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i c_i(t).$$

À préciser que p_i dénote la valeur sociale du $i^{\text{ième}}$ produit. Nous ne permettons pas de substitution entre les différents biens durant chaque période. En revanche, nous permettons la substitution linéaire entre les sorties à différentes périodes, conformément à Tokoyama (1976). Le modèle de transfert

technologique est donc décrit par l'équation (16) et assujetti aux contraintes (14) et (15). Les variables et les paramètres exogènes sont $\mathbf{x}^d(t)$, $\boldsymbol{\omega}$, L (t), $\mathbf{A}^a$, $\overline{\mathbf{A}}^d$, $\mathbf{a}_0^a$, $\mathbf{a}_0^d$, $\mathbf{B}^a$ et $\mathbf{x}^a$ (0). Ici, $\mathbf{x}^a$ (t) et $\mathbf{c}(t)$, qui représentent respectivement les politiques optimales en matière de transfert technologique et de consommation, seront déterminés de manière endogène.

Supposons qu'il y ait m types de facteurs de fardeaux environnementaux considérés, y compris sur les émissions et les déchets dangereux. Disons que $\mathbf{E} = [e_{ki}]$ est une matrice $m \times n$, où e_{ki} représente le $k^{ième}$ facteur, fardeau environnemental, directement émis par l'unité produisant le $i^{ième}$ bien. Assumons que $\sigma(t) = \left[\sum_i^n \sigma_{ki}(t)\right]$ soit un vecteur m, où σ_{ki}(t) représente le $k^{ième}$ facteur du fardeau environnemental, directement généré par l'$i^{ième}$ industrie, durant la période t. En cernant les caractéristiques des technologies adoptées, nous obtenons la formule suivante :

$$\sigma_{ki}(t) = e_{ki}^a x_i^a(t) + e_{ki}^d x_i^d(t) \tag{17}$$

ou la forme matricielle :

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \mathbf{E}^a \mathbf{x}^a(t) + \mathbf{E}^d \mathbf{x}^d(t).$$

La fonction économique objective du modèle de programmation linéaire du transfert technologique doit être modifiée de façon à tenir compte de l'environnement. Admettons que $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_k]$ soit le vecteur m, où λ_k représente l'importance relative du k^{ième} facteur du fardeau environnemental au niveau de la consommation globale. Dans ces conditions, la fonction économique objective (16) se traduit par :

$$\max_{z(t)} \sum_{t=0}^{T} [1 + \rho]^{-t} [z(t) + \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\sigma}(t)]. \tag{18}$$

Le modèle de programmation linéaire du transfert technologique, qui tient compte de l'environnement, consiste en (18), (14), (15) et (17).

4. Transfert technologique optimal du Japon aux Philippines

Nous avons mis au point le modèle de transfert technologique de programmation linéaire de 59 secteurs mentionné ci-dessus à partir des tableaux entrées-sorties des Philippines et du Japon. Nous supposons que le Japon fournit les technologies de pointe aux Philippines, qui les substituent à leurs technologies traditionnelles.

4.1. La base de données

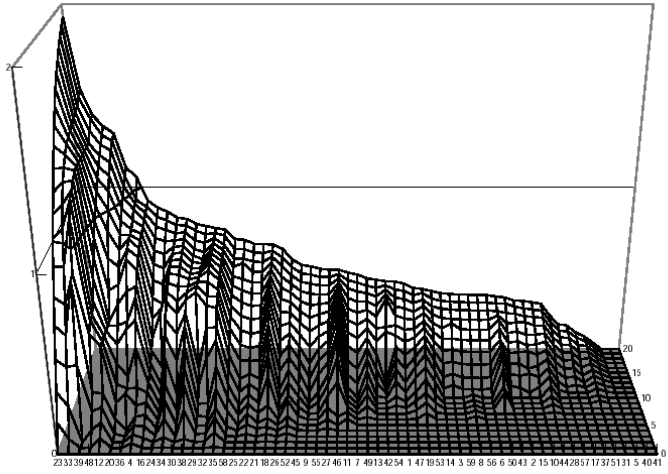
Pour les besoins de notre étude empirique, nous avons recouru au tableau entrées-sorties de 59 secteurs de l'économie philippine (1994) compilé par Secretario (2000). La matrice $\mathbf{A}^d$ en valeurs tangibles a été évaluée à l'aide du

vecteur des prix (comprenant le taux de salaire) de l'année de référence. À noter que les biens non matériels ont été évalués à l'aide de l'intensité d'équivalent-travail incorporé. Nous avons ensuite agrégé le tableau entrées-sorties de 405 secteurs de l'économie japonaise en 1995 de façon à les faire concorder avec les 59 secteurs des Philippines (voir le tableau 12.1 pour la classification des secteurs). Le vecteur des prix disponibles pour le Japon en 1995 a permis d'obtenir les matrices $\mathbf{A}^a$ et $\mathbf{B}^a$ et le vecteur $\boldsymbol{a}_0$ (Management and Coordination Agency, 2000). Pour calculer la matrice des coefficients du fardeau environnemental des Philippines $\mathbf{E}^d$, nous nous sommes servi de la consommation des produits sources d'énergie primaire de chaque secteur. Pour évaluer celle du Japon, nous avons utilisé les bases de données élaborées par Hondo *et al.* (1997). Dans la présente étude, nous ne tenons compte que du fardeau environnemental imputable aux émissions de carbone. En outre, nous supposons une fonction de déflation linéaire des capitaux qui disparaîtraient d'ici 30 ans.

4.2. Résultats

À titre de simulation de référence, nous avons d'abord introduit les résultats d'un taux d'escompte de 0 % en ne tenant compte d'aucune préoccupation écologique ($\rho = 0$, $\lambda = 0$), comme dans la figure 12.1. Dans cette figure, l'axe horizontal correspond aux 59 secteurs industriels répertoriés dans le tableau 12.1 ; l'axe vertical correspond au volume de transferts technologiques durant une période t, représentée par la formule $\log_{10}x(t)/x(0)$; et la profondeur correspond aux différentes périodes. Par ailleurs, les secteurs industriels ont été triés par les valeurs verticales après 20 ans ($t = 20$).

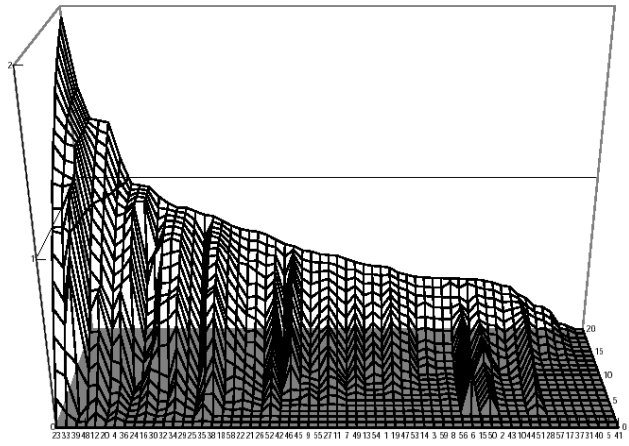
FIGURE 12.1
Politique optimale des transferts technologiques ($\rho = 0$, $\lambda = 0$)



Comme le montre la figure 12.1, les secteurs prioritaires en matière de transfert technologique sont : 23 (produits chimiques industriels de base), 33 (fer et acier), 12 (alimentation animale) et 4 (industrie forestière). Les secteurs moyennement prioritaires sont : 39 (véhicules, pièces et accessoires automobiles), 48 (transport ferroviaire), 20 (papier et produits de papier) et 36 (machinerie, à l'exception des machines électriques). En d'autres termes, la technologie doit d'abord et avant tout être transférée dans les industries des matériaux de base, avant de l'être dans les industries manufacturières.

Ensuite, nous nous sommes demandé si une politique optimale des transferts technologiques changeait quand ρ et λ différaient. La figure 12.2 illustre ce qui se passe lorsque seul le taux d'escompte ρ change et passe à 7 %. La figure 12.3 montre en quoi cette altération de ρ affecte la politique en matière de transfert technologique. L'axe vertical correspond aux priorités (ordre descendant) quand $\rho = 0$ % et l'axe horizontal correspond aux priorités quand $\rho = 7$ %. Comme on peut le voir sur cette figure, la politique en matière de transfert technologique a besoin d'être très légèrement modifiée.

FIGURE 12.2
Politique optimale des transferts technologiques ($\rho = 7$, $\lambda = 0$)



Par ailleurs, la figure 12.4 indique ce qui se passe quand nous ne modifions que le facteur de pondération du bien-être environnemental. Dans ce cas, nous supposons que la désutilité liée à une augmentation des émissions de carbone en tonnes s'élève à 20 000 yens ($\lambda = 20$). Nous examinons ici l'évolution de la politique optimale des transferts selon les différents paramètres ($\lambda = 0$, $\rho = 0$) et ($\lambda = 20$, $\rho = 0$), décrits dans la figure 12.5. Comme on peut le voir sur cette figure, la priorité des transferts augmente dans le secteur 40 (motos et vélos), alors que dans les secteurs 38 (autres engins et appareils

FIGURE 12.3
Sensibilité ($\rho = 0$, $\rho = 7$)

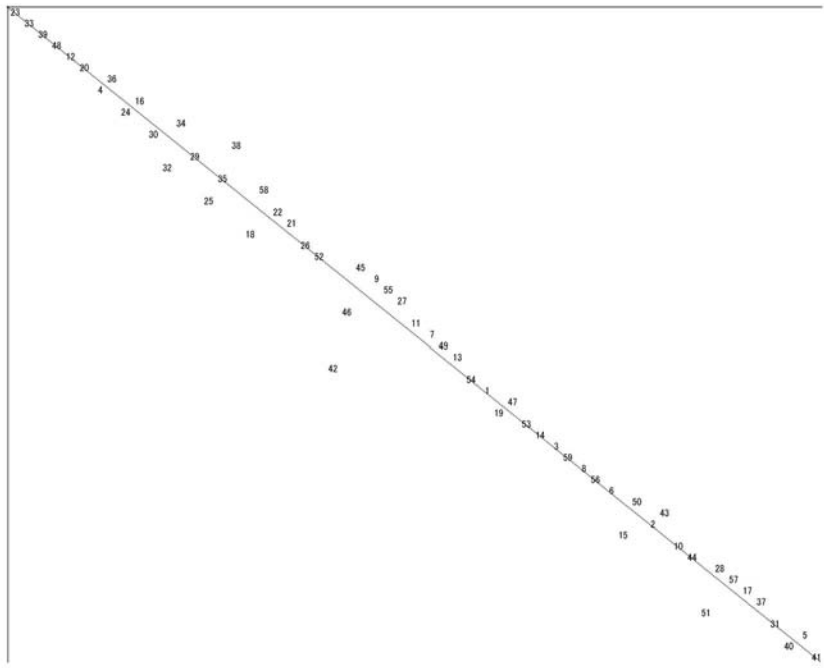


FIGURE 12.4
Politique optimale des transferts technologiques ($\rho = 0$, $\lambda = 20$)

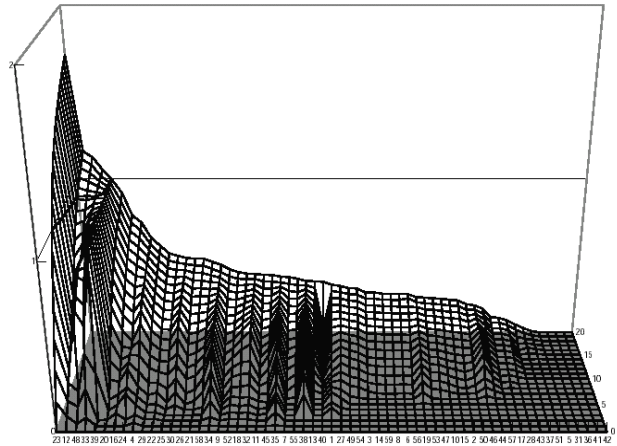
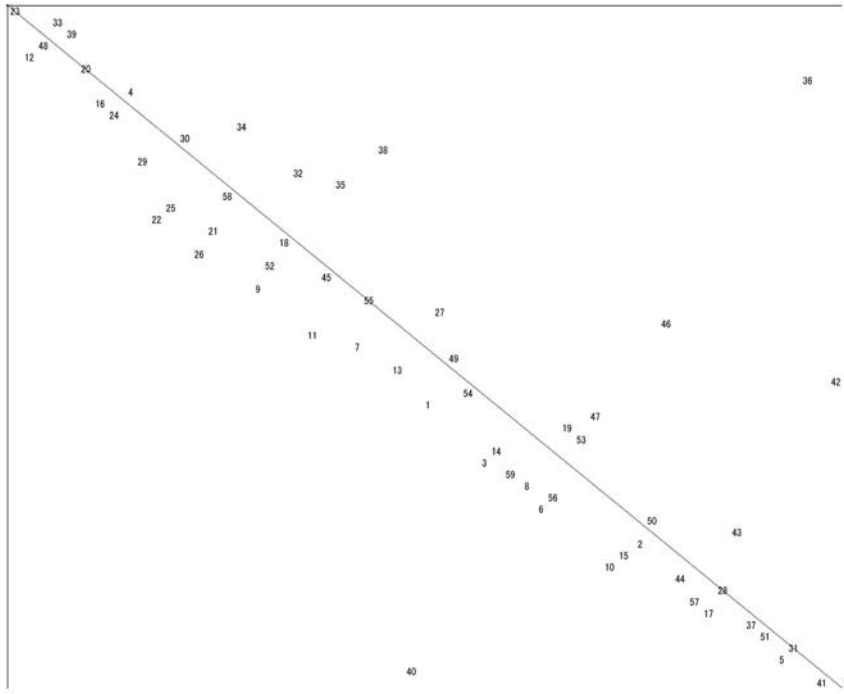


FIGURE 12.5
Sensibilité ($\lambda = 0$, $\lambda = 20$)



électriques), 42 (autres engins de transport) et 46 (construction générale), elle a diminué. Manifestement, l'ampleur des préoccupations écologiques aura une influence considérable sur la politique optimale des transferts.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté les options de transfert technologique offertes à un pays en développement conformément au cadre d'entrée-sortie dynamique. Ce modèle de transfert technologique nous a permis de déterminer le moment le plus indiqué pour procéder au transfert technologique dans chaque secteur industriel. Afin de maximiser le bien-être social actualisé ainsi que le bien-être environnemental du pays en développement, les investissements de capitaux feront l'objet d'un contrôle à l'occasion de chaque phase de démarrage.

Un modèle réduit a été formulé sous forme de problème de programmation linéaire, de façon à résoudre un plus grand modèle. Par ailleurs, nous avons ajouté à ce modèle de programmation linéaire de transfert technologique les problèmes d'environnement et d'interdépendance entre deux pays.

Pour les besoins de cette application, nous avons spécifié les données disponibles afin de constituer un modèle pour les Philippines où les mesures de protection de l'environnement sont requises. Nous avons assigné au Japon le rôle de fournisseur des technologies de pointe transférées. La performance de notre modèle a été démontrée à l'aide d'un exemple numérique.

Références bibliographiques

HONDO, H., TONOOKA,Y., UCHIYAMA, Y. 1997. *Environmental Burdens Associated with Production Activities in Japan using an Input-Output Table,* SERC/ CRIEPI Report Y87017. Tokyo, Japan : Central Research Institute of Electric Power Industry.

MANAGEMENT AND COORDINATION AGENCY. 2000. *Japan 1995 Input-Output Tables*.

NISHIMURA, K. 2003. Technology transfer with capital constraints and environmental protection : Models and applications to the Philippines. *Economic Systems Research* 15 : 359-370.

SECRETARIO, F.T. 2000. *1994 Input-Output Accounts of the Philippines*. Manilla, Philippines : ARCSIGMA SCII.

TAKAYAMA, A. 1994. *Mathematical Economics*. New York : Cambridge University Press.

TOKOYAMA, K. 1976. Optimum growth and input-output structure. Dans *Input-Output Analysis*, Kaneko, Y. (dir.). Tokyo, Japon : Yuhikaku (en japonais).

APPLICATIONS AU QUÉBEC ET AU CANADA

Les parties précédentes ont principalement traité d'applications sur de grands pays : États-Unis, Europe, Japon. Mais l'analyse d'entrée-sortie est aussi applicable aux petites économies ouvertes telles que le Canada ou le Québec. Les quatre chapitres qui suivent, sélectionnés à partir d'une quinzaine de communications sur le Canada à la conférence, en font la démonstration.

CHAPITRE 13

INTÉGRATION CANADIENNE ET OUVERTURE

Commerce provincial interrégional et international†

PIERRE A. GÉNÉREUX ET BRENT LANGEN
Statistique Canada‡

† Texte raccourci par Christian DeBresson avec accord et révision des auteurs. Un texte en anglais plus élaboré portant sur les problématiques traitées dans ce chapitre fut présenté à la XIVe Conférence des techniques d'analyse d'entrée-sortie. Le lecteur intéressé peut consulter Généreux et Langen (2002).

‡ Les points de vue exprimés dans le présent chapitre sont ceux des auteurs et ne reflètent pas nécessairement l'opinion de Statistique Canada.

Résumé

Après avoir établi un cadre comptable et ses équations, nous pouvons élaborer une matrice des échanges interprovinciaux au Canada avec les origines et les destinations des biens et des services. Nous présenterons un exemple de ces matrices pour l'année 1997. Préalable à ce travail de respect des équations comptables, un immense travail de confrontation de différentes sources, enquêtes et données administratives a été nécessaire pour résoudre les problèmes de cohérence des données. Dans ce chapitre, nous donnons un exemple du type de problème de réconciliation posé et effectuons une rapide estimation de l'ampleur des réajustements requis. L'évolution de ce commerce interprovincial de 1992 à 2001 révèle une ouverture accrue du Canada au commerce international – surtout Nord-Sud –, bien que l'intégration interprovinciale ait aussi augmenté, mais pas dans les mêmes proportions.

1. Introduction

Les flux du commerce interprovincial représentent un ajout très récent à l'ensemble des statistiques provinciales dans le contexte du Système de comptabilité nationale (SCN) du Canada. Ils sont importants pour trois raisons principales. Premièrement, la disponibilité des flux annuels du commerce provincial permet d'établir des tableaux provinciaux entrées-sorties équilibrés et de calculer le produit intérieur brut provincial en termes de dépenses, et ce, en dollars courants et en dollars constants. Sans les flux du commerce provincial, on ne pourrait pas correctement établir l'interdépendance économique sur une base provinciale.

Deuxièmement, les flux annuels du commerce provincial permettent de mieux comprendre les enjeux économiques et commerciaux d'actualité. Bon nombre d'administrations provinciales utilisent les flux du commerce provincial pour mesurer les avantages de diverses politiques axées sur l'expansion économique régionale. De même, dans le cadre des négociations permanentes visant à libéraliser davantage le commerce mondial, certaines administrations provinciales utilisent les flux du commerce provincial pour estimer l'incidence de ces négociations commerciales sur leur économie.

Troisièmement, les tableaux provinciaux entrées-sorties et les flux connexes du commerce interprovincial sont utilisés dans les modèles interprovinciaux, ce qui permet, par exemple, de mesurer l'incidence d'un important agrandissement d'une usine de fabrication, de quantifier les avantages de la construction d'un pipeline entre deux régions, ou d'évaluer les répercussions d'une hausse du prix de l'énergie.

Le présent chapitre décrit succinctement l'approche matricielle pour le commerce interprovincial, ses équations « comptables » et, très rapidement, la réconciliation nécessaire des différentes sources de données qui ont permis d'établir ces matrices, d'en évaluer l'exactitude et d'en tirer une première analyse des principales tendances dans la dernière décennie.

2. La matrice du commerce interprovincial et ses équations comptables

Le commerce interprovincial est candidat à une représentation matricielle interrégionale. Selon la matrice du tableau 13.1, chaque province est un fournisseur d'exportations vers une autre province (en lecture horizontale) et une importatrice de biens et services (en lecture verticale). Ainsi, les biens et les services sont comptabilisés selon leur origine et leur destination (voir l'exemple de 1997 présenté ci-après au tableau 13.1)[1].

1. On a retenu ici l'année 1997 parce qu'elle coïncide avec d'importantes améliorations apportées aux données sur les flux du commerce provincial et aux tableaux provinciaux entrées-sorties ; en outre, il s'agit de l'année la plus récente pour laquelle les données sont finalisées (c.-à-d. qu'elles ne sont plus susceptibles d'être modifiées).

TABLEAU 13.1

Flux du commerce interprovincial et international par province et territoire, de biens et services, 1997 (M$)*

	Destination														
Origine	**T.-N.-L.**	**Î.-P.-É.**	**N.-É.**	**N.-B.**	**Qc**	**Ont.**	**Man.**	**Sask.**	**Alb.**	**C.-B.**	**Yn**	**T.N.-O./Nun.**	**Serv. gouv. à l'étranger**	**Monde**	**Offre**
T.-N.-L.	14 618	29	168	107	339	325	15	13	37	32	1	4	0	3 273	18 962
Î.-P.-É.	46	3 665	117	179	132	207	12	8	21	22	1	0	0	603	5 012
N.-É.	484	249	28 839	907	798	1 127	75	64	225	241	3	26	0	4 450	37 489
N.-B.	335	254	996	22 066	1 746	1 656	52	33	94	87	2	3	0	5 770	33 093
Qc	1 085	271	1 615	2 067	252 138	22 795	1 272	1 100	3 541	3 436	41	208	5	61 646	351 220
Ont.	2 099	520	3 678	2 788	27 799	466 158	4 575	4 001	13 078	10 976	170	442	48	163 643	699 975
Man.	49	19	115	102	1 292	3 161	37 998	1 339	1 636	1 086	8	39	0	8 337	55 181
Sask.	23	16	61	38	640	2 476	836	38 003	2 294	658	10	18	0	11 749	56 822
Alb.	183	33	219	174	2 493	9 113	2 142	3 586	148 304	6 506	92	339	2	36 504	209 691
C.-B.	108	24	191	190	1 774	4 069	756	1 050	5 843	161 508	159	182	2	333 183	209 667
Yn	0	0	0	0	4	22	2	3	36	64	1 630	18	0	278	2 060
T.N.-O./Nun.	2	0	9	1	53	313	11	12	104	77	3	4 316	0	492	5 395
Serv. gouv. à l'étranger	0	0	1	1	4	7	1	0	1	4	0	0	630	8	656
Monde	3 028	496	6 261	6 136	62 310	159 262	8 736	8 014	27 522	30 421	183	463	402	18 038	331 271
Demande	22 061	5 574	42 269	34 756	351 523	670 693	56 483	57 226	202 735	215 119	2 303	6 058	1 090	348 604	2 016 493

* Les données en gris pâle représentent les flux du commerce interprovincial, les données en gris foncé représentent les flux du commerce international.

Le tableau 13.1 représente le total des flux du commerce interprovincial et international pour 1997. Il existe un tableau semblable pour chaque année et pour chacun des quelque 725 biens et services répertoriés. Nous les appelons les tableaux des flux du commerce de biens et de services – pour ne pas les confondre avec les matrices entrées-sorties ou tableaux économiques, qu'ils soient nationaux ou provinciaux.

Comment lire ces matrices ? Les chiffres de chaque rangée (sauf ceux de la diagonale) représentent les exportations de la province ou du territoire d'origine indiqué au début de la rangée, vers les autres provinces ou territoires de destination et vers le reste du monde. Le dernier chiffre d'une rangée représente la valeur de l'offre intérieure totale de la province ou du territoire d'exportation. Les chiffres de chaque colonne (sauf ceux de la diagonale) représentent les importations de la province ou du territoire donné dans l'en-tête de la colonne, en provenance des autres provinces ou territoires et du reste du monde. Le dernier chiffre d'une colonne représente la demande intérieure totale de la province ou du territoire d'importation. Les chiffres de la diagonale indiquent la valeur des biens produits et absorbés à l'intérieur d'une province ou d'un territoire donné. Le chiffre de la diagonale à l'intersection « monde » se rapporte aux biens importés de l'extérieur du Canada et réexportés vers le reste du monde.

Comme les exportations d'une province sont importées par une autre province, le total des exportations interprovinciales pour le Canada est égal à celui des importations interprovinciales. En d'autres termes, comme dans toute matrice, le total des totaux des lignes est égal au total des totaux des colonnes[2]. Enfin, le chiffre de la diagonale à l'intersection de la colonne « offre totale » et de la rangée « demande totale » représente l'offre ou la demande totale du Canada en provenance de sources intérieures et étrangères.

D'après le tableau 13.1, par exemple, l'offre intérieure du Québec (surtout la production) se chiffre à 351 G$; de cette offre, 62 G$ sont exportés à l'étranger et 252 G$ sont vendus à des utilisateurs québécois ; enfin, 37 G$ sont vendus à d'autres provinces (dont plus de la moitié à des utilisateurs ontariens). D'autre part, le Québec a besoin de 352 G$ en biens et services, chiffre très proche de celui de sa production intérieure : sa demande intérieure globale est satisfaite par sa propre production (252 G$), par les importations de l'étranger (62 G$) et, enfin, par celles provenant des autres provinces (37 G$, dont 28 milliards en provenance de l'Ontario).

À l'échelle internationale – toujours selon le tableau 13.1 – l'Ontario compte pour environ la moitié du commerce canadien (importations et exportations confondues). L'Ontario domine le commerce extérieur, mais il est aussi le plus important partenaire commercial pour chaque province et chaque territoire du Canada. L'Ontario est à la fois la principale source d'importations nationales pour chaque province du pays et une destination

2. De nombreux écrits en sciences sociales et en gestion utilisent le mot « matrice » pour indiquer n'importe quel tableau. Mais seulement la balance des colonnes et des rangées assure à une « vraie » matrice, au sens mathématique du terme, la cohérence comptable et permet d'utiliser le calcul et l'algèbre matriciels.

importante pour toutes les provinces, sauf pour Terre-Neuve-et-Labrador, le Nouveau-Brunswick et la Colombie-Britannique. Le Québec est la destination la plus importante pour les biens et services de Terre-Neuve-et-Labrador et du Nouveau-Brunswick. L'Alberta est la destination de choix de la Colombie-Britannique. L'Ontario et le Québec entretiennent le lien commercial le plus étroit au Canada ; leurs échanges en représentent près de 30 %[3].

À l'échelle interprovinciale, toutes les provinces sauf l'Ontario et le Québec ont enregistré un déficit commercial, alors que plusieurs provinces ont enregistré un excédent de leur commerce avec des clients étrangers. Bon nombre d'autres observations intéressantes s'imposent, mais nous y reviendrons à la fin de la section 3 du présent chapitre.

Dans le tableau 13.1, les équations comptables suivantes sont toutes présentes et valables :

1) Dans chaque province et pour chaque bien ou service, l'offre intérieure totale doit être identique aux ventes au reste du monde (exportations internationales), aux autres provinces (exportations interprovinciales) et à la province elle-même.
2) Dans chaque province et pour chaque bien ou service, la demande intérieure totale doit être identique aux achats effectués auprès du reste du monde (importations internationales), des autres provinces (importations interprovinciales) et de la province elle-même.
3) Dans chaque province et pour chaque bien et service, l'offre intérieure totale moins la demande intérieure totale est égale aux exportations totales moins les importations totales.
4) Pour chaque bien ou service, la somme des exportations et des importations internationales par province est identique au chiffre des exportations et des importations du pays.
5) Pour chaque bien ou service, la somme des exportations interprovinciales est identique à celle des importations interprovinciales pour l'ensemble des provinces.
6) Pour chaque bien ou service, la somme de l'offre et de la demande intérieures totales et celle de l'offre et de la demande étrangères pour l'ensemble des provinces égalent respectivement le chiffre canadien de l'offre totale et celui de la demande totale pour chaque bien ou service.

Les biens achetés à l'extérieur du Canada et réexportés au reste du monde ne font pas partie des équations provinciales ; ils sont enregistrés à titre d'élément distinct (échanges commerciaux entre le reste du monde et l'extérieur du Canada)[4]. Ces équations forment collectivement un cadre

3. Le commerce de l'Ontario vers le Québec (27 799 M$) plus le commerce du Québec vers l'Ontario (22 795 M$) divisé par le commerce interprovincial total (174 785 M$).
4. Exclues des importations et des exportations internationales dans le cadre du programme des flux du commerce international et interprovincial, les réexportations sont cependant comprises dans les estimations comparables du programme du PIB provincial en termes de dépenses.

comptable servant à rajuster les données de base, à combler les lacunes statistiques et à analyser la qualité et la cohérence des renseignements utilisés dans le calcul des estimations des flux du commerce. Elles valent pour chaque bien ou service et à chaque année, au niveau le plus détaillé possible (environ 725 biens et services).

Le tableau 13.1 présente non seulement le cadre comptable et le respect des équations comptables que nous venons de décrire, mais aussi un résumé du commerce entre les diverses provinces et les territoires ainsi que les flux internationaux par province pour l'année 1997[5].

Le tableau 13.1 est simple de lecture et les équations comptables sont logiques et cohérentes. Mais pour arriver à cette cohérence logique, un immense travail d'ajustement et de correction de lacunes statistiques, et d'estimations a été nécessaire – et c'est là que réside l'essentiel du progrès statistique réalisé, que nous ne pouvons que très brièvement décrire dans la prochaine section en prenant un exemple type du problème posé.

3. Évolution récente des bases de données et leur réajustement cohérent

Depuis 1997, nous possédons des données beaucoup plus fiables grâce à la réalisation des quatre progrès suivants :

1. Les diverses enquêtes servant à recueillir des données sur le commerce provincial sont plus exhaustives et plus robustes.
2. Les renseignements sur le commerce sont analysés, rapprochés et intégrés à un ensemble détaillé de tableaux provinciaux ou territoriaux entrées-sorties officiel.
3. Les renseignements d'enquête qui étayent ces tableaux provinciaux entrées-sorties ont aussi été augmentés ou renforcés considérablement.
4. Enfin, les renseignements sur le flux des échanges sont rapprochés d'autres variables pertinentes du Système de comptabilité nationale, notamment le produit intérieur brut provincial ou territorial, et ce, par industrie, ce qui améliore la cohérence globale des données.

C'est principalement le Projet d'amélioration des statistiques économiques provinciales (PASEP) qui est à l'origine de ces quatre améliorations. Le PASEP est le résultat d'entretiens entre le gouvernement du Canada et trois des administrations provinciales en vue d'une harmonisation des taxes de

5. Un certain nombre de modifications conceptuelles ont été apportées en 2001, lors de la publication des tableaux provinciaux entrées-sorties de 1997 ; la modification la plus importante concernait la capitalisation des logiciels. Contrairement aux tableaux nationaux, les tableaux provinciaux entrées-sorties de 1996 n'ont pas fait l'objet d'une révision historique en raison de contraintes de temps. Toutefois, ces modifications n'ont eu aucune incidence sur les flux du commerce interprovincial et international ; elles en ont une sur la valeur des biens et services achetés et absorbés dans la même province ou le même territoire (voir la diagonale).

vente. À la suite de ces entretiens, il a été convenu de remplacer la taxe fédérale sur les produits et services et les taxes de vente des provinces participantes par une taxe unique, la taxe de vente harmonisée, et de redistribuer les recettes fiscales entre les parties participantes en se fondant, entre autres, sur les statistiques agrégées des tableaux provinciaux entrées-sorties et des comptes économiques provinciaux[6].

Sources de données et lacunes

Il y a de nombreuses sources de données permettant de mesurer les flux du commerce interprovincial et international : certaines sont canadiennes, d'autres sont étrangères ; certaines couvrent l'ensemble de l'économie, d'autres un secteur industriel seulement. Les renseignements sont tirés de diverses enquêtes et statistiques administratives ; ces sources de données sont brièvement présentées dans les paragraphes suivants. Nous examinons également certaines lacunes conceptuelles et celles qui sont liées aux données statistiques, et nous décrivons en détail des méthodes de correction de ces biais inhérents aux données. Enfin, nous évaluons l'étendue des réajustements nécessaires pour établir un tableau cohérent comme celui du tableau 13.1.

Toutes les sources de données ne sont pas alignées avec notre objectif de cohérence. Prenons un exemple. À l'échelle nationale, Statistique Canada produit deux publications très détaillées sur le commerce international : *Le commerce international de marchandises du Canada*[7] et *Balance canadienne des paiements internationaux*[8]. Si la première comporte une dimension provinciale, la deuxième ne présente pas de mesures comparables à l'échelle provinciale ou territoriale. Cette dernière publication est établie à partir de documents administratifs concernant les échanges internationaux, surtout de biens. Lorsque des biens sont importés au Canada ou en sont exportés, on doit remplir des déclarations à remettre aux douaniers et fournir des renseignements sur la description et la valeur des biens, l'origine et le port de dédouanement des marchandises.

Depuis 1990, les administrations canadienne et américaine utilisent les données sur les importations de l'autre pays (au lieu de leurs propres données sur les exportations). Ainsi, les exportations canadiennes vers les États-Unis sont plutôt des importations américaines provenant du Canada, alors que les importations canadiennes continuent d'être fondées sur les documents douaniers produits auprès de l'administration canadienne. Cette méthode repose sur le principe selon lequel les statistiques du commerce fondées sur les données douanières donnent une mesure plus exacte des importations que des exportations, et ce, parce que les autorités douanières sont habituellement plus vigilantes en ce qui concerne les biens qui entrent au pays qu'à l'égard de ceux qui en sortent.

---

6. Statistique Canada, *Comptes économiques provinciaux*, Cat. nº 13-213.
7. Statistique Canada, *Le commerce international de marchandises du Canada*, Cat. nº 65-001.
8. Statistique Canada, *Balance des paiements internationaux du Canada*, Cat. nº 67-001.

Les estimations provinciales des exportations et des importations publiées dans *Le commerce international de marchandises du Canada* sont dites « par province d'origine » dans le cas des exportations et « par province de dédouanement » dans celui des importations. S'agissant des données sur les exportations, la province d'origine est censée représenter la province dans laquelle les biens ont été cultivés, extraits ou fabriqués, ce qui correspond à l'exigence du programme des flux du commerce. Toutefois, la plus grande partie des exportations canadiennes est destinée aux États-Unis et, comme nos estimations des exportations sont fondées sur les importations américaines provenant du Canada, la province d'où provient la plus grande partie de nos exportations (d'après les données sur les importations américaines provenant du Canada) correspond plutôt au dernier point d'expédition directe vers les États-Unis, lequel n'est pas toujours le point de production.

Par ailleurs, un certain nombre d'aspects peuvent fausser les données sur le commerce des marchandises :

- lorsqu'un grossiste ou un détaillant vend un bien, la province d'exportation ne coïncide pas toujours avec la province de production ;
- le transport et l'entreposage peuvent entraîner des distorsions dans l'indication de la province de production ;
- vu l'utilisation de documents d'importation américains pour mesurer les ventes canadiennes à des marchés américains, on a encore plus de mal à préciser la province de production des exportations vers les États-Unis ; ces documents peuvent établir la province d'origine selon l'adresse de l'exportateur canadien, ce qui risque d'entraîner un « biais lié au siège social ».

Les exportations de marchandises par province ne répondent donc pas entièrement à l'exigence du programme des flux du commerce interprovincial et international (indication de la province de production), car elles peuvent refléter le dernier point d'expédition directe vers les États-Unis.

Voici le type de problème de réconciliation auquel Statistique Canada et les bureaux de statistiques provinciaux ont été confrontés. Pour le commerce interprovincial, trois autres sources sont disponibles, soit les enquêtes auprès : i) des producteurs, ii) des acheteurs, ou encore iii) des transporteurs. Chaque source a ses avantages et ses inconvénients ; et leur confrontation permet de tirer certaines conclusions ou de faire certaines estimations[9].

La question qui nous interpelle est la suivante : Dans quelle mesure les estimations du commerce international de marchandises du Canada par province sont-elles exactes ? Comme les estimations par province publiées dans *Le commerce international de marchandises du Canada* sont essentielles au calcul

9. Généreux et Langen (2002) renferme plus de détails sur les sources et problèmes similaires d'incohérences auxquels les auteurs ont été confrontés, les solutions qui ont été choisies, cas par cas, pour faire les estimations.

des flux du commerce provincial, comment se comparent-elles aux estimations équivalentes tirées du programme des flux du commerce provincial ? Dans quelle mesure sont-elles exactes après avoir été confrontées à d'autres ensembles de données et soumises au système de relations logiques et économiques qui caractérise les flux des échanges provinciaux ? En outre, comme ces estimations sont traditionnellement publiées beaucoup plus tôt que les estimations comparables tirées du programme des flux du commerce provincial, les utilisateurs des administrations provinciales, entre autres, s'en inspirent pour évaluer les résultats des exportations et des importations internationales de leurs provinces respectives ; aussi faut-il s'interroger sur leur fiabilité.

Le tableau 13.2 présente une comparaison[10] des estimations par province publiées dans *Le commerce international de marchandises du Canada* ainsi que les exportations et importations internationales d'après le programme des flux du commerce provincial. Il montre également les ratios des deux sources de données ainsi que la demande et l'offre intérieures pour la totalité des biens. Dans *Le commerce international de marchandises du Canada*, les exportations sont publiées par province d'origine et les importations, par province de dédouanement. Dans le programme des flux du commerce provincial, les exportations sont publiées par province d'origine et les importations, par province de consommation.

Selon les provinces, les ratios d'ajustement peuvent être minimes (moins de 3 %) ou considérables. Notez que les ajustements sont plus importants pour les importations que pour les exportations. Mais en ce qui concerne les importations, ils sont considérables pour les Territoires du Nord-Ouest et Nunavut et pour l'Île-du-Prince-Édouard[11].

---

10. Si les importations et les exportations de marchandises publiées dans *Le commerce international de marchandises du Canada* et dans le programme des flux du commerce excluent l'incidence des réexportations, il existe cependant un certain nombre de différences conceptuelles entre les deux banques de données. Les importations et les exportations publiées dans *Le commerce international de marchandises du Canada* sont fondées dans une grande mesure sur les documents douaniers relatifs au transport transfrontalier de biens. Les importations et les exportations de biens d'après le programme des flux du commerce provincial comprennent les ajustements apportés aux biens selon la BDP et les biens qui sont intégrés aux services visés par la BDP, mais les exportations excluent divers éléments de la marge, notamment ceux qui sont liés aux grossistes et au transport, alors que les importations comprennent les coûts de transport entre les pays exportateurs et les frontières canadiennes. Les différences d'évaluation découlent du fait que les exportations et les importations de biens d'après le programme des flux du commerce provincial sont évaluées selon les valeurs à la production (les exportations sont évaluées à l'usine et les importations, à la frontière canadienne). Dans *Le commerce international de marchandises du Canada*, les exportations et les importations sont évaluées à la frontière des pays exportateurs, et les coûts du transport des importations canadiennes entre les frontières étrangères et la frontière canadienne sont consignés dans la composante des services visés par la BDP dans le SCN (ils ne sont pas consignés dans *Le commerce international de marchandises du Canada*).

11. Des tableaux de flux de commerce interprovinciaux et internationaux, similaires à celui présenté pour 1997, peuvent être estimés pour les années courantes, afin de permettre aux décideurs de prendre leurs décisions à temps (Généreux et Langen, 2002).

TABLEAU 13.2

Comparaison du commerce international des marchandises et des flux du commerce de biens par province, 1996, 1997 et 1998

Importations internationales des biens

	Commerce des marchandises			Flux de commerce			Ratios d'ajustement		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
	M$			M$			%		
T.-N.-L.	978	1 427	1 126	2 231	2 780	2 987	2,28	1,95	2,65
Î.-P.-É.	33	27	17	323	427	522	9,78	16,05	31,14
N.-É.	3 268	4 556	4 754	4 592	5 704	5 966	1,41	1,25	1,26
N.-B.	3 797	3 820	3 591	5 269	5 610	5 534	1,39	1,47	1,54
Qc	34 605	37 767	41 278	46 757	53 564	58 738	1,35	1,42	1,42
Ont.	137 848	162 513	177 339	118 327	136 172	147 310	0,86	0,84	0,83
Man.	6 201	8 479	9 206	6 269	7 529	8 125	1,01	0,89	0,88
Sask.	3 569	4 560	4 595	5 581	7 047	7 429	1,56	1,55	1,62
Alb.	7 121	9 042	10 599	18 026	23 660	27 624	2,53	2,62	2,61
C.-B.	18 564	22 663	24 885	23 093	25 891	27 018	1,24	1,14	1,09
Yn	43	44	36	152	150	177	3,57	3,38	4,96
T.N.-O./Nun.	12	9	7	301	392	475	25,78	42,05	64,44
Serv. à l'étranger	0	0	0	288	284	285	0,00	0,00	0,00
Canada	**216 039**	**254 907**	**277 433**	**231 209**	**269 210**	**292 190**	**1,06**	**1,05**	**1,05**

Exportations internationales des biens

	Commerce des marchandises			Flux de commerce			Ratios d'ajustement		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
	M$			M$			%		
T.-N.-L.	2 284	2 516	2 645	2 412	2 558	2 885	1,06	1,02	1,09
Î.-P.-É.	354	435	466	372	444	571	1,05	1,02	1,23
N.-É.	3 117	3 161	3 440	2 922	3 266	3 606	0,94	1,03	1,05
N.-B.	5 396	5 471	5 459	4 348	4 460	4 571	0,81	0,82	0,84
Qc	46 915	50 258	55 365	46 805	50 308	46 001	1,00	1,00	1,01
Ont.	127 803	139 363	154 760	124 955	135 768	151 174	0,98	0,97	0,98
Man.	6 220	7 314	8 069	5 706	6 583	7 248	0,92	0,90	0,90
Sask.	9 312	10 807	9 924	8 548	9 150	8 644	0,92	0,85	0,87
Alb.	31 698	33 482	31 010	27 526	29 346	27 946	0,87	0,88	0,90
C.-B.	25 765	26 761	26 045	23 326	24 233	23 281	0,91	0,91	0,89
Yn	185	81	7	287	177	98	1,55	2,19	14,32
T.N.-O./Nun.	247	385	319	486	413	261	1,96	1,07	0,82
Serv. à l'étranger	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Canada	**259 295**	**280 034**	**297 509**	**247 693**	**266 706**	**286 286**	**0,96**	**0,95**	**0,96**

4. Analyse des flux du commerce interprovincial et international, 1992 à 2001[12]

4.1. Dépendance accrue envers le commerce international sur l'axe Nord-Sud

En 2001, les Canadiens ont exporté à l'étranger des biens et services d'une valeur de plus de 440 G$, soit environ 41 % du produit intérieur brut (PIB) du Canada, et ont importé des biens et services d'une valeur de près de 385 G$, soit 35 % du PIB (ces estimations excluent les réexportations). Les exportations et les importations internationales ont plus que doublé au cours des années 1990. L'« ouverture » de notre économie s'est donc accrue. Les États-Unis demeurent le plus important partenaire commercial du Canada. D'autre part, le commerce interprovincial[13] a atteint 213 G$ en 2001, en hausse d'environ 60 % par rapport à 1992. L'intégration domestique s'est donc aussi accrue. Mais, fait saillant, depuis 1998, le chiffre des ventes internationales est plus de deux fois supérieur à celui des exportations intérieures, alors que lors des années 1980, les deux étaient à peu près égaux.

Le changement de contextes économique et institutionnel pendant cette période doit être signalé. Les années 1990 ont commencé par une récession et se sont terminées par une forte expansion économique qui, en 2001, s'était atténuée. La faiblesse du dollar canadien, qui est passé de 0,90 $US à la fin de 1991 à près de 0,60 $US 10 ans plus tard, a favorisé nos exportations à l'étranger. L'Accord de libre-échange a été conclu en 1989 avec les États-Unis, et modifié en 1994 pour y inclure le Mexique dans l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA). L'Accord sur le commerce intérieur a aussi été mis en œuvre au milieu des années 1990, sans grande publicité.

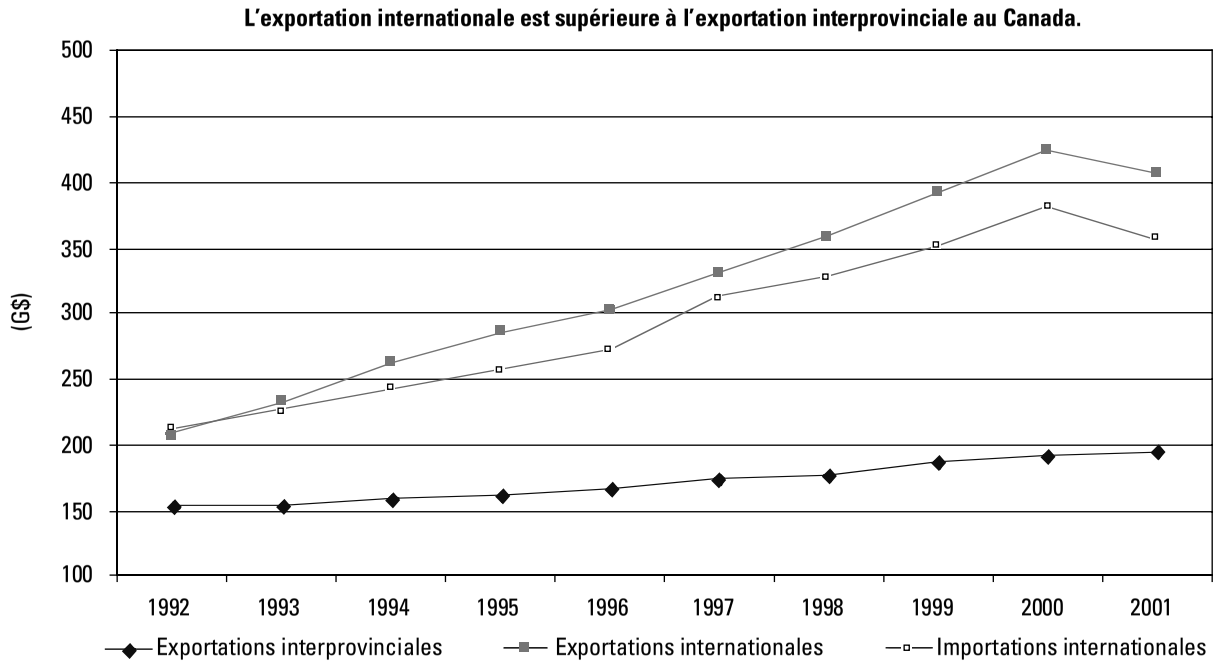
Depuis 1992, la croissance des exportations internationales a été supérieure à celle des exportations interprovinciales. Cependant, en 2001, les ventes à l'étranger ont fléchi, parallèlement au ralentissement de l'économie américaine. Alors que le commerce interne Est-Ouest prédominait, il y a de nombreuses années, c'est le commerce extérieur, principalement sur l'axe Nord-Sud, qui caractérise l'économie canadienne à l'aube du XXIe siècle.

À une exception près, toutes les provinces misent davantage sur les exportations internationales[14].

---

12. À compter de 1998, les flux du commerce provincial sont encore susceptibles d'être modifiés.
13. Les exportations interprovinciales pour l'ensemble du Canada sont égales aux importations interprovinciales de toutes les provinces.
14. Si, entre 1992 et 2001, Terre-Neuve-et-Labrador affichait la plus forte hausse des exportations totales (à des clients étrangers ou canadiens), c'était cependant la seule province où la croissance des exportations interprovinciales (187 %) était supérieure à celle des ventes internationales (175 %). La plate-forme Hibernia a commencé à produire du pétrole à la fin de 1997 ; la plus grande partie de sa production des premières années était destinée à des clients étrangers. Toutefois, depuis l'achèvement, en 2000, du vaste agrandissement de la raffinerie de Saint-Jean (Nouveau-Brunswick), Hibernia expédie son pétrole vers des marchés canadiens.

FIGURE 13.1
Comparaison du commerce interprovincial et international, Canada, 1992 à 2001



4.2. Les petites économies provinciales et le déficit commercial

En 2001, les plus grandes économies provinciales, l'Ontario et le Québec, mais aussi la Saskatchewan et l'Alberta, ont affiché un excédent commercial interne, alors que d'autres provinces, surtout les plus petites ont accusé un déficit. Sur la figure 13.2, on peut suivre l'évolution des balances commerciales globales, externes et internes en prix courants reçus par les producteurs en millions de dollars.

La balance commerciale de l'Ontario en 2001 a dépassé 44 millliards de dollars (contre à peu près 16 milliards en 1992). L'excédent ontarien du commerce interprovincial (qui atteint au moins 20 milliards) depuis 1994 est surtout attribuable aux sociétés financières, dont le siège social est à Toronto, et aux services aux entreprises (ingénierie, architectes, conseils en informatique). L'excédent dans le commerce international, quant à lui, est dû principalement à l'exportation de pièces d'automobiles vers les États-Unis.

La balance commerciale générale de l'Alberta a évolué dans le même sens, en partie grâce à l'augmentation des prix de produits énergétiques.

Pendant la même période, le Québec est passé d'un déficit à un excédent neuf ans plus tard. Le Québec, qui avait jusqu'en 1992 un excédent de deux G$ dans son commerce interprovincial, a depuis augmenté ses importations interprovinciales de services, en particulier de services financiers, ce qui a équilibré sa balance interprovinciale.

La plupart des petites économies provinciales continuent d'accuser un déficit commercial avec les autres provinces. La Colombie-Britannique et la Saskatchewan importent des autres provinces des produits manufacturés pour exporter vers l'étranger la majorité de leur production. La Nouvelle-Écosse accuse un déficit commercial croissant tant avec les autres provinces que dans le commerce international. Le Manitoba, par contre, a enregistré des excédents et des déficits légers tant avec les autres provinces qu'avec l'étranger.

Parmi ces petites économies provinciales, cependant, il existe une exception. En 2001, selon la part des exportations relatives au PIB, le Nouveau-Brunswick se trouvait en tête (avec 75 %, avant la Saskatchewan et l'Ontario) : fruits de mer surgelés, produits de bois, électricité, produits pétroliers raffinés.

4.3. Les fabricants canadiens et les exportations

La dernière décennie a été caractérisée, entre autres, par la libéralisation du commerce (intérieur et extérieur), la vigueur de la demande américaine et la faiblesse du dollar canadien par rapport au dollar américain. Quelle a été l'incidence de ces facteurs économiques sur les fabricants ?

Le tableau 13.3 présente la principale destination des livraisons manufacturières entre 1992 et 2001 ; les marchandises vendues peuvent être destinées à des acheteurs à l'intérieur de la province, à des consommateurs de l'extérieur de la province de production et, enfin, à des clients étrangers.

En 2001, les exportations canadiennes de biens manufacturés ont atteint de nouveaux sommets ; cette année-là, selon des données provisoires, plus de 50 % des livraisons manufacturières canadiennes ont été exportées à

FIGURE 13.2
Comparaison des balances du commerce interprovincial et international par province, 1992 à 2001

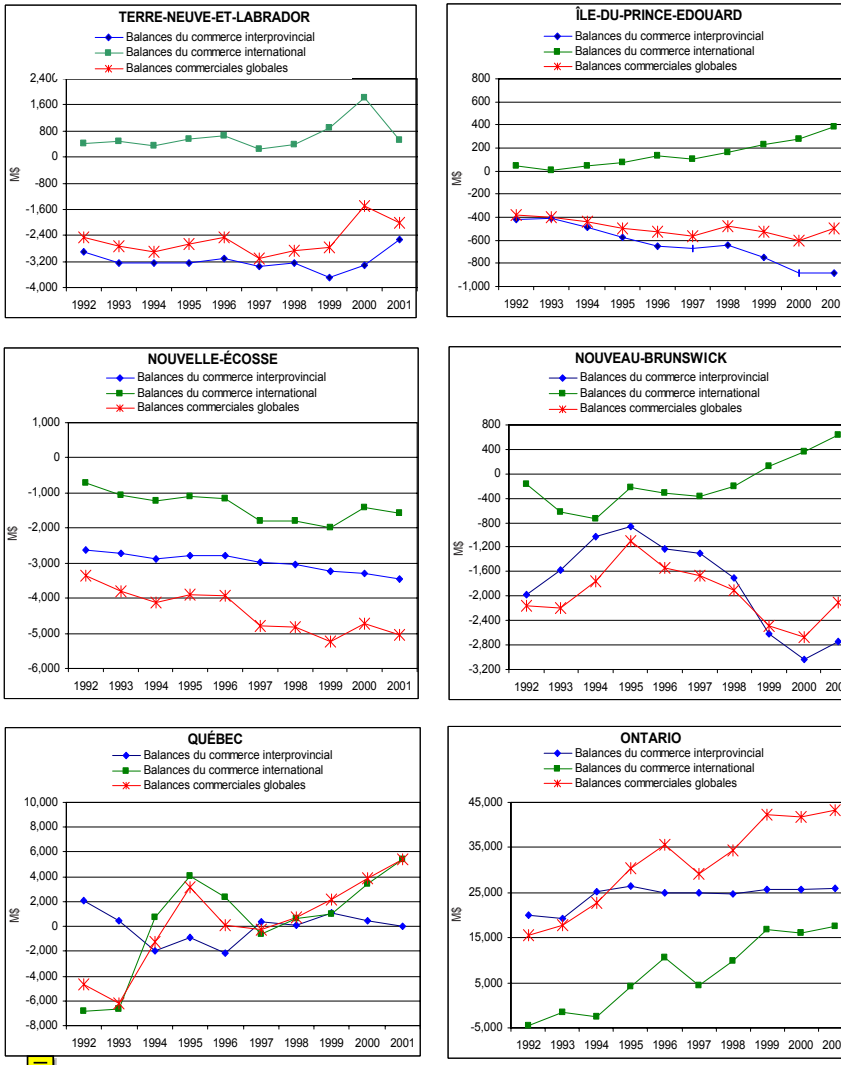
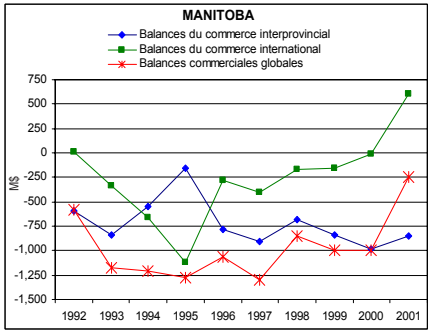
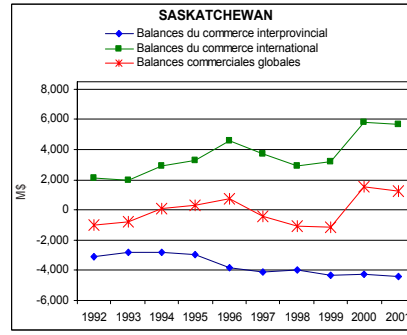
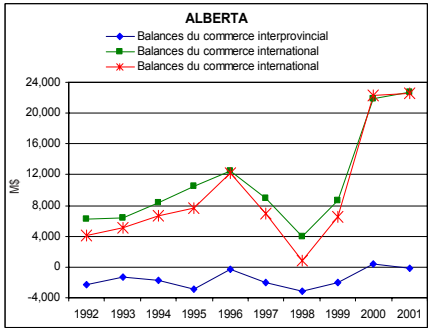
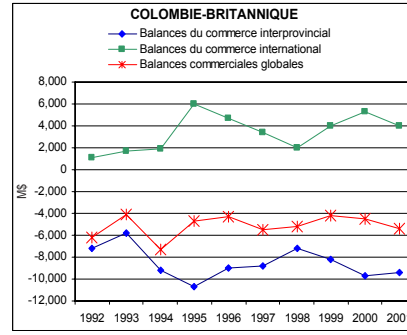


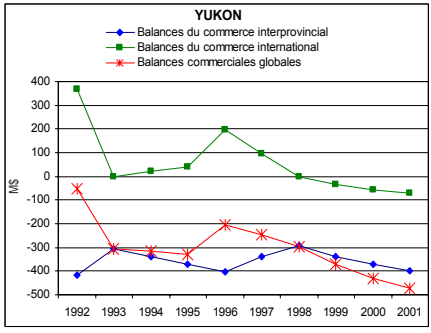
FIGURE 13.2
Comparaison des balances du commerce interprovincial et international par province, 1992 à 2001 (*suite*)

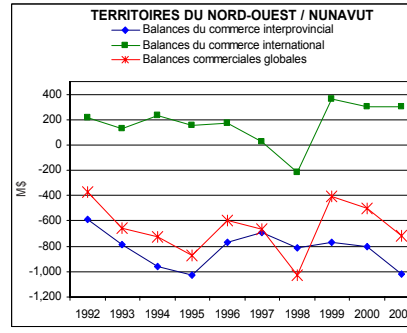












l'étranger, contre moins de 40 % en 1992. En fait, les exportations dépassent la barre des 50 % depuis 1998. Inversement, en 2001, seulement 31 % des livraisons manufacturières étaient destinées à des clients établis à l'intérieur de la province de production. En 2001, les exportations internationales de toutes les provinces (à l'exception de celles des Territoires du Nord-Ouest et du Nunavut) ont gagné en importance. En outre, dans plusieurs provinces, la part des exportations internationales était supérieure à 50 % ; Terre-Neuve-et-Labrador menait le bal avec 68 % grâce, en grande partie, à la mise en service de la raffinerie de Come-by-Chance et à l'expansion continue de l'industrie de la transformation du poisson. En Ontario, la part des exportations internationales, qui atteignait 57 % en 2001, dépasse la barre des 50 % depuis le milieu des années 1990.

À l'Île-du-Prince-Édouard et au Nouveau-Brunswick, la part des exportations a grimpé pour franchir le cap des 50 %. À l'Île-du-Prince-Édouard, les exportations internationales de fruits de mer surgelés et de pommes de terre surgelées ont contribué à cette forte progression alors que, comme nous l'avons déjà mentionné, les ventes à l'étranger de fruits de mer surgelés, de produits du bois, d'électricité et de produits pétroliers raffinés ont expliqué la hausse enregistrée au Nouveau-Brunswick.

Par contre, les résultats de la Nouvelle-Écosse ont été moins spectaculaires, la forte croissance des exportations internationales de pneus, de produits du bois et de matériel ferroviaire ayant été contrebalancée en partie par la chute des exportations à l'étranger de produits du poisson transformés.

Les ventes d'avions et de pièces connexes ont été le principal facteur de la hausse des exportations du Québec à l'étranger entre 1992 et 2001.

Tout en demeurant supérieure à 50 %, la part des exportations internationales de produits manufacturés de la Colombie-Britannique a légèrement reculé entre 1997 et 2001 à cause de la chute des ventes de bois d'œuvre à l'étranger.

Enfin, en 2001 comme en 1992, les livraisons manufacturières des provinces des Prairies, prises collectivement, restaient les moins susceptibles d'être exportées à l'étranger. Les exportations internationales comptaient pour 35 % des livraisons manufacturières de l'Alberta ; il s'agit de la proportion la plus faible parmi les provinces. Les distances relativement grandes qui séparent les provinces des Prairies des grands centres urbains et des grands ports de mer pourraient expliquer cette réalité économique.

5. Conclusions

Entre 1992 et 2001, période au cours de laquelle l'Accord de libre-échange nord-américain et l'Accord sur le commerce intérieur sont entrés en vigueur, on a observé un écart grandissant entre le commerce interprovincial et le commerce international. Les producteurs canadiens cherchent activement à s'imposer sur les marchés étrangers pour accroître leurs ventes, alors que les clients canadiens manifestent une préférence de plus en plus marquée pour les biens étrangers.

TABLEAU 13.3

Flux du commerce de produits manufacturés, 1992, 1997 et 2001

	Production		Destination des actions												
			Commerce interprovincial (%)				Exportations interprovinciales (%)				Exportations internationales (%)				
Origine	M$ 2001	%	1992	1996	1997	2001	1992	1996	1997	2001	1992	1996	1997	2001	Total (%)
T.-N.-L.	3 805	0,7	45	27	30	24	7	8	6	7	48	66	64	68	100
Î.-P.-É.	1 442	0,3	34	25	23	16	0	39	34	31	29	37	43	53	100
N.-É.	8 972	1,6	37	32	32	30	30	32	30	30	33	36	38	40	100
N.-B.	12 285	2,2	30	20	21	17	34	38	37	33	36	41	42	50	100
Qc	136 555	24,0	42	37	35	33	27	22	22	20	31	42	43	48	100
Ont.	295 670	52,0	39	32	32	30	18	16	15	13	42	52	53	57	100
Man.	12 552	2,2	34	25	24	22	35	38	35	36	31	37	41	41	100
Sask.	9 116	1,6	43	32	30	26	25	30	31	30	33	38	40	44	100
Alb.	49 618	8,7	47	39	41	41	28	29	28	25	24	32	31	35	100
C.-B.	38 017	6,7	45	35	34	34	13	12	12	14	42	52	53	52	100
Yn	56	0,0	86	65	70	64	8	20	13	11	6	15	17	25	100
T.N.-O./Nun.	202	0,0	82	85	84	85	4	6	8	11	14	9	8	3	100
Canada	568 291	100,0	41	34	33	31	22	19	19	17	38	47	48	51	100

Ce chapitre visait à présenter certaines sources de données et les méthodes de calcul des flux du commerce (interprovincial et international) des provinces canadiennes. Il importe de continuer à investir dans les sources de données nécessaires au calcul des flux du commerce provincial, car les sources fiables, si elles sont souvent difficiles à obtenir, constituent le pivot du programme des flux du commerce, et de nombreuses décisions publiques.

Les flux du commerce interprovincial constituent une caractéristique unique du programme provincial du Système de comptabilité nationale du Canada. Il n'en existe, à notre connaissance, pas d'équivalent à l'étranger. Sans les flux du commerce provincial, il serait impossible de produire des tableaux provinciaux entrées-sorties en parfaite correspondance avec le PIB provincial total en termes de dépenses, et cohérents entre eux. Sans ce progrès statistique, par exemple, le prochain chapitre sur le Québec et le reste du Canada, n'aurait pas été possible.

Si ces tableaux provinciaux entrées-sorties et les flux connexes du commerce ont été établis pour étayer la répartition des recettes de la taxe fédérale (TVH), ils permettent aussi de mieux comprendre les résultats économiques provinciaux. Ce nouvel ensemble annuel de statistiques provinciales, en parfaite correspondance avec l'ajout des estimations des flux du commerce interprovincial, pourrait se révéler très utile dans une foule d'autres applications, par exemple la formulation de politiques d'expansion régionale, la conclusion d'accords fiscaux et la promotion d'investissements d'entreprises.

Références bibliographiques

GÉNÉREUX, P.A., et LANGEN, B. 2002. *The Derivation of Provincial (Inter-regional) Trade Flows : The Canadian Experience*. Communication à la XIVe Conférence internationale de techniques d'analyse entrée-sortie, Montréal, Québec, 10-15 octobre. Disponible à : <www.io2002conference.uqam.ca/abstracts_papers/new16janv03/Genereux_B_Langen.pdf>.

MESSINGER, H. 1993. Les flux du commerce interprovincial des biens et des services, *L'observateur économique canadien*, Catalogue No 11-010, octobre.

STATISTIQUE CANADA. 1992. *Les flux du commerce interprovincial et international de biens, 1984-1988*, Document technique sur les entrées-sorties, no 49.

STATISTIQUE CANADA. 1996. *Les retombées économiques du commerce interprovincial au Canada*. Cat. No 15-514, août.

STATISTIQUE CANADA. 1998. *Le commerce interprovincial au Canada, 1984-1996*. Cat. No 15-546, février.

STATISTIQUE CANADA. 1999. *Le commerce interprovincial et international au Canada, 1992-1998*. Cat. No 15-546.

CHAPITRE 14

LE MODÈLE D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL CALCULABLE DU MINISTÈRE DES FINANCES, DE L'ÉCONOMIE ET DE LA RECHERCHE DU QUÉBEC

Un modèle birégional du Québec et du reste du Canada

Bernard Decaluwé
CIRPÉE, Université Laval

André Lemelin
Institut national de la recherche scientifique, INRS-UCS, Montréal, et CIRPÉE, Université Laval

Véronique Robichaud
Commission de la coopération environnementale de l'ALENA

David Bahan
Ministère des Finances du Québec

Daniel Florea
Ministère des Finances du Québec

Résumé

Ce chapitre présente l'élaboration d'un modèle d'équilibre général calculable (MEGC) statique multisectoriel, adapté pour tenir compte des caractéristiques et spécificités économiques du Québec, dans un contexte canadien et mondial. En plus d'être un modèle birégionnal, une des originalités du modèle est l'introduction de comptes suprarégionaux, permettant de considérer les transactions entre agents qui ne peuvent être reliés à une notion de territorialité régionale. Ce chapitre contient le détail sur la constitution des comptes de niveau suprarégional, à savoir les comptes d'intérêts et de dividendes, le compte du reste du monde (RdM, hors Canada), les comptes du gouvernement fédéral consolidé et le compte d'accumulation. Ces travaux ont permis de mettre en place un modèle d'équilibre général calculable, opérationnel et détaillé, de grande envergure, permettant de mieux saisir les implications complexes des politiques économiques et fiscales, dans l'aide à la décision.

1. Introduction

Grâce à leur capacité à représenter la complexité des interactions économiques et de leurs influences sur le comportement des agents, les modèles d'équilibre général constituent des outils extrêmement puissants d'analyse des politiques économiques et fiscales.

Au printemps 2000, le ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche du Québec a décidé de se doter d'un tel outil. À cette fin, il a confié au Centre de recherche en économie et finance appliquées (CRÉFA) de l'Université Laval le mandat de développer un modèle d'équilibre général adapté aux particularités de l'économie québécoise. Pour assurer le succès du projet, l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) a accepté de participer activement au développement du modèle et a assumé le mandat d'élaborer la matrice de comptabilité sociale sous-jacente (sur la matrice de comptabilité sociale et sa construction, voir Bahan *et al.*, 2003)[1].

Le modèle d'équilibre général calculable met à la disposition du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche du Québec un outil d'une grande efficacité pour mieux établir les implications complexes des politiques économiques et fiscales, afin de permettre des prises de décisions éclairées. Le modèle a déjà été utilisé comme outil d'aide à la décision, notamment pour étudier l'impact de l'élimination de la règle des 15 ans régissant l'industrie pharmaceutique au Québec (le lecteur intéressé trouvera les détails dans Emini *et al.*, à paraître).

2. Approche générale

Le modèle d'équilibre général pour le Québec est un modèle d'équilibre général calculable (MEGC) statique multisectoriel, adapté pour tenir compte des caractéristiques et spécificités du Québec, dans un contexte canadien et mondial. Concrètement, le Québec fait partie du Canada et, en tant que tel, est soumis aux politiques fiscales et monétaires du gouvernement fédéral ainsi qu'aux règles de libre circulation à l'intérieur des frontières canadiennes.

Étant donné l'imbrication du Québec dans le Canada, le modèle est donc un modèle birégional où, non seulement l'économie du Québec, mais aussi celle du reste du Canada (RdC) sont modélisées de façon explicite, tout en tenant compte de leurs relations mutuelles et avec le reste du monde. Cela permet de prendre en compte les effets de rétroaction (*feedback effects*) entre les deux économies. En outre, en plus de représenter les effets directs des

1. Afin de s'assurer que le modèle réponde aux besoins du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche du Québec, les travaux du CRÉFA, dirigés par Bernard Decaluwé, André Lemelin et Véronique Robichaud, ainsi que ceux de l'ISQ, dirigés par Camille Courchesne, David Bahan et Danielle Bilodeau, ont été réalisés en collaboration avec le personnel du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche, notamment Éric Genest-Laplante, Xavier Brosseau et Brian Girard.

politiques fédérales et provinciales, ce modèle tient compte, grâce à sa structure birégionale, de leurs effets indirects, c'est-à-dire qui touchent le Québec par le biais des effets de ces mêmes politiques sur le reste du Canada et vice-versa.

Dans ce modèle, les agents économiques sont classés en quatre catégories : les entreprises, les ménages, les gouvernements et l'étranger. Tous les agents prennent les prix comme donnés. Mais tandis que les deux premiers ont un comportement d'optimisation, les deux derniers n'en ont pas. Tous respectent néanmoins leurs contraintes budgétaires.

Il s'agit d'un modèle de grande envergure, très détaillé, où la classification des activités et des biens et services est proche de l'agrégation M des comptes entrées-sorties de Statistique Canada. Signalons que la modélisation du reste du Canada est aussi détaillée que celle du Québec, sauf pour ce qui est des gouvernements. Dans le cas des gouvernements, il n'est pas tenu compte de la subdivision du reste du Canada en provinces et territoires, de sorte que les gouvernements des neuf autres provinces sont agrégés en un seul agent, comme le sont tous les gouvernements locaux et régionaux hors Québec. On distingue dans chacune des deux régions : 56 secteurs productifs, 121 catégories de biens et services et 48 catégories de dépenses personnelles de consommation. Les investissements sont répartis en 13 catégories. Il y a 150 types de ménages au Québec et 155 au Canada[2], définis selon la composition du ménage, le niveau de revenu et le groupe d'âge. Cette classification très fine des ménages permettra d'évaluer les impacts sociaux des politiques fiscales, selon l'approche de l'agent représentatif, où tous les agents d'une même catégorie sont réputés avoir les mêmes caractéristiques et se comporter de manière identique. Cela implique en particulier que la variance intragroupe des revenus des ménages est nulle. La demande de travail distingue dans chaque région 11 types de main-d'œuvre ; cette nomenclature est une agrégation des grands groupes de la classification type des professions de 1980. Enfin, on trouve dans le modèle deux types de capital, qui correspondent aux deux agents : les sociétés entreprises et les entreprises individuelles. On peut trouver la liste des équations, variables, paramètres et ensembles du modèle dans Decaluwé *et al.* (2003).

Signalons que le modèle ne s'intéresse pas à l'accumulation des facteurs (évolution du stock de capital, démographie et évolution de la main-d'œuvre) et que les phénomènes dynamiques et intertemporels ne sont pas incorporés dans le comportement des agents. Le modèle repose sur une matrice de comptabilité sociale qui décrit la structure du système économique Québec-Canada pour l'année de référence 1996. C'est à partir de cette matrice que sont calibrés les paramètres « non libres » du modèle, de façon à ce que le modèle reproduise cet état initial (à propos des paramètres « libres », voir Annabi, à paraître).

2. Il y a cinq catégories qui ne comptent aucun ménage membre au Québec. Le groupe d'âge est défini par l'âge de la « personne de référence », selon la terminologie de Statistique Canada.

L'Institut de la statistique du Québec a agi comme maître d'œuvre dans la construction de la matrice, avec l'appui actif des chercheurs du CRÉFA. Les données de la matrice ont été construites de façon à respecter d'abord les grands agrégats de la comptabilité nationale, puis les données des tableaux entrées-sorties produits par Statistique Canada, tout en satisfaisant aux règles de cohérence interne. Bahan *et al.* (2003) présente en détail la méthode suivie par l'Institut de la statistique du Québec pour la construction de la matrice.

3. Traits distinctifs

Nous commentons ici trois des traits distinctifs du modèle, qui apparaissent également dans la structure de la matrice de comptabilité sociale sous-jacente : le caractère birégional du modèle, l'introduction de comptes dits « suprarégionaux » et le choix d'enregistrer les dépenses aux prix payés par l'acheteur.

3.1. Un modèle birégional

Le caractère birégional du modèle apparaît nettement dans la matrice de comptabilité sociale, dont la structure générale est illustrée dans le tableau 14.1. Deux séries parallèles de comptes représentent, l'une, l'économie du Québec, et l'autre, celle du RdC. Les échanges entre le Québec et le RdC apparaissent dans les secteurs de la matrice où les colonnes des comptes du Québec croisent les lignes des comptes du RdC et vice-versa. On trouve là les importations de chaque région en provenance de l'autre (qui, par définition, sont identiques aux exportations de l'autre région). On y trouve aussi les transferts entre ménages du Québec et du RdC, ainsi que les salaires versés à des résidants de l'autre région.

TABLEAU 14.1
Structure de la matrice de comptabilité sociale

	Québec	**Reste du Canada**	**Reste du Monde**
Québec	Transactions internes	Exportations du Québec vers le reste du Canada	Exportations internationales
Reste du Canada	Importations du Québec en provenance du reste du Canada	Transactions internes	Exportations internationales
Reste du monde	Importations internationales	Importations internationales	

3.2. Le niveau suprarégional

L'une des originalités du modèle, inspirée de Round (1988), est l'introduction de comptes suprarégionaux, afin de considérer les transactions entre agents qui ne peuvent être reliés à une notion de territorialité régionale. Dans notre modèle, les comptes de niveau suprarégional sont : les comptes d'intérêts et de dividendes, le compte du reste du monde (RdM, hors Canada), les comptes du gouvernement fédéral consolidé et le compte d'accumulation. La raison d'être de chacun de ces comptes est brièvement expliquée dans ce qui suit. La structure de la matrice de comptabilité sociale avec les comptes suprarégionaux est représentée dans le tableau 14.2.

Les comptes d'intérêts et de dividendes

Au cours des travaux de construction de la matrice de comptabilité sociale, il est apparu que les données disponibles permettaient d'estimer les revenus d'intérêts et de dividendes reçus par les ménages de chaque région et les paiements d'intérêts et de dividendes faits par les entreprises de chaque région, mais qu'il était impossible d'estimer de façon convaincante la région d'origine des intérêts et dividendes reçus ou la région de destination des intérêts et dividendes payés. Ces lacunes dans les données sont évidemment dues à la très grande intégration des marchés financiers au Canada. Pour tenir compte de cet état de fait, il a été décidé de créer deux comptes suprarégionaux, qui ne sont associés à aucune des deux régions, l'un pour les paiements d'intérêts et l'autre pour les dividendes. Tous les intérêts et dividendes payés sont versés au compte suprarégional correspondant et tous les intérêts et dividendes reçus proviennent de l'un de ces deux comptes. Il est évident que compte tenu du mode de construction de la matrice de comptabilité sociale, les sommes des intérêts et des dividendes versés sont égales aux sommes des intérêts et dividendes reçus par l'ensemble des agents.

Le compte reste du monde

Il n'y a pour le reste du monde (RdM) qu'un seul compte agent, auprès de qui sont achetées les importations, tant du Québec que du reste du Canada. Réciproquement, les exportations du Québec et celles du reste du Canada sont vendues à cet unique compte agent ; les demandes par le RdM d'exportations en provenance du Québec et en provenance du Canada sont néanmoins représentées par des fonctions distinctes. De plus, ces fonctions de demande ne sont pas infiniment élastiques. Cette formulation tient compte de plusieurs réalités incontournables :

- Le Québec et le RdC partagent une même monnaie et, au plan international, seul importe le solde du compte courant de l'ensemble du Canada. D'ailleurs, puisqu'il s'agit d'un modèle réel, seul le solde de la balance courante (par opposition au solde de la balance des paiements) est pertinent.
- La demande d'importations internationales de la part du Canada (Québec compris) n'a pas un poids suffisant pour influencer les prix mondiaux. Cela correspond, pour les importations, à l'hypothèse du

TABLEAU 14.2

Matrice de comptabilité sociale birégionale Québec-RdC avec comptes suprarégionaux

				Comptes suprarégionaux			
		Québec	**Reste du Canada**	**Intérêts et dividendes**	**Gouvernement fédéral consolidé**	**Accumulation**	**Reste du monde**
Québec		Transactions internes	Exportations du Québec vers le RdC	Paiements reçus au Québec		Investissements au Québec	Exportations internationales
Reste du Canada		Importations du Québec provenant du RdC	Transactions internes	Paiements reçus dans le RdC	Dépenses du gouv. féd. dans le RdC	Investissements dans le RdC	Exportations internationales
Comptes suprarégionaux	**Intérêts et dividendes**	Versements par les agents au Québec	Versements par les agents dans le RdC				
	Gouvernement fédéral consolidé	Surplus (+) ou déficit (–) du gouv. féd. au Québec	Recettes du gouv. féd. dans le RdC				
	Accumulation	Épargne du Québec	Épargne du reste du Canada		Surplus (+) ou déficit (–)		
	Reste du monde	Importations internationales	Importations internationales				

« petit pays » dans la théorie du commerce international : en tant qu'importateurs, le Québec et le RdC sont sur les marchés mondiaux comme des acheteurs en concurrence parfaite, sans influence sur les prix et faisant face à une offre parfaitement élastique aux prix d'équilibre existants. À ces prix, ils trouveront des fournisseurs pour leur offrir toute quantité demandée.

- Par contre, le Québec et le RdC ne peuvent pas être considérés comme « petits pays » en tant qu'exportateurs. À cause notamment de la spécialisation de leurs exportations et de leur relative concentration sur certains marchés, l'accroissement des exportations exige normalement un effort concurrentiel, ce qui se traduit par une demande qui n'est pas parfaitement élastique aux prix mondiaux. Pour accroître leurs parts de marché, les exportateurs canadiens et québécois devront donc consentir à des baisses de prix. Pour autant, ni le Québec, ni le Canada ne sont vus comme un grand pays pouvant influencer les prix mondiaux des produits exportés ; ils ne détiennent donc aucun pouvoir de monopole sur les marchés d'exportation.
- De plus, même si l'on considérait le Canada dans son ensemble comme un « petit pays », les producteurs du Québec et ceux du RdC sont sur les marchés internationaux en situation de concurrence imparfaite entre eux, de sorte que chacun d'eux fait face à une demande internationale pour ses produits qui n'est pas parfaitement élastique.

Les comptes du gouvernement fédéral consolidé

La représentation du gouvernement fédéral dans le modèle tient compte de trois fonctions essentielles qu'il accomplit : il produit des biens et des services, tant au Québec que dans le reste du Canada, il exerce une ponction fiscale sur les différents agents et, finalement, il effectue des transferts entre agents. Dans sa fonction de producteur de services, il est d'une certaine importance de pouvoir distinguer l'activité du gouvernement fédéral au Québec de son activité dans le RdC. Il faut néanmoins tenir compte du fait que c'est un seul et même agent. C'est pourquoi nous avons écarté l'idée d'avoir deux agents parfaitement distincts pour représenter le gouvernement fédéral, l'un au Québec et l'autre dans le RdC. Au lieu de cela, le gouvernement fédéral au Québec apparaît séparément dans la matrice, mais comme une filiale, pour ainsi dire, du « Gouvernement fédéral consolidé ».

L'agent « Gouvernement fédéral au Québec » reçoit donc le produit des taxes et impôts fédéraux perçus sur le territoire québécois et se voit imputer les dépenses effectuées par le gouvernement fédéral au Québec[3]. Le solde

3. Ainsi, la répartition entre le Québec et le RdC des dépenses fédérales est territoriale. Cette répartition ne permet pas de répartir les bénéfices reçus par les citoyens. Par exemple, les salaires des fonctionnaires fédéraux au Québec relèvent de l'agent « Gouvernement fédéral au Québec », quels que soient les bénéficiaires de l'activité de ces fonctionnaires ; il en est de même des dépenses militaires faites au Québec. Le modèle du Québec s'écarte en cela du modèle de Finances Canada, où les ménages consomment les services des administrations publiques.

des opérations du gouvernement fédéral au Québec (positif ou négatif) est ensuite assumé par le gouvernement fédéral consolidé (voir dans le schéma, l'intersection de la ligne « Gouvernement fédéral consolidé » et de la colonne « Québec »).

Les comptes du gouvernement fédéral consolidé représentent l'ensemble des autres transactions du gouvernement fédéral. L'épargne du gouvernement fédéral consolidé (y compris le solde de ses opérations au Québec) est versée au compte suprarégional d'accumulation.

Le compte d'accumulation

Étant donné la très grande mobilité des capitaux à l'intérieur du Canada, la création de comptes d'accumulation distincts pour le Québec et pour le reste du Canada n'est pas opportune. Toutes les épargnes sont donc versées au compte suprarégional d'accumulation, auquel émargent toutes les dépenses d'investissement, tant au Québec qu'au Canada.

Néanmoins, les flux d'épargne en provenance du Québec et les flux d'investissements réalisés au Québec sont parfaitement distincts des flux équivalents pour le RdC, de sorte qu'il est possible de calculer *ex post* un solde de l'équation Investissement-Épargne pour le Québec. À un surplus au Québec des investissements sur l'épargne devrait correspondre un déficit de même montant du compte courant des échanges du Québec avec le RdC ; inversement, à un surplus d'épargne au Québec devrait correspondre un surplus du compte courant avec le RdC. Nous écrivons « devrait correspondre », parce que certains flux entre comptes suprarégionaux ne peuvent être attribués à aucune région en particulier. Ce sont : les revenus de placements à l'étranger (intérêts et dividendes) versés par le RdM, les transferts internationaux du gouvernement fédéral consolidé et les intérêts, dividendes et revenus d'entreprises indépendantes versés à l'étranger.

3.3. Prix à la production et prix à la consommation

Le *design* de la matrice de comptabilité sociale est d'emblée conditionné par le choix entre deux façons d'enregistrer les flux de dépenses. Dans le modèle d'équilibre général calculable du Québec, les dépenses sont enregistrées aux *prix à la consommation*, c'est-à-dire aux prix payés par les acheteurs, toutes taxes et marges comprises, plutôt qu'aux *prix à la production* (prix reçus par les producteurs, plus généralement par les fournisseurs, hors taxes et marges). De ce choix découle le traitement des taxes indirectes et des marges de transport et de commerce.

Dans le modèle intersectoriel du Québec de l'Institut de la statistique du Québec, les dépenses sont comptabilisées aux prix à la consommation. Dans les tableaux entrées-sorties de Statistique Canada, au contraire, les dépenses sont comptabilisées aux prix à la production. Cela impliquerait notamment, pour les achats d'intrants intermédiaires par les branches, que les taxes indirectes associées à ces achats soient prélevées au niveau de la branche. Il en serait de même, *mutatis mutandis*, pour les marges. Cela dit, les

tableaux entrées-sorties de Statistique Canada sont ici complétés par des tableaux de taxes et de marges (de transport et de commerce) qui ont permis de répartir les taxes indirectes et les marges payées sur les intrants entre les biens correspondants. Ainsi, les taxes indirectes et marges associées aux achats d'intrants intermédiaires sont prélevées au niveau de la demande intérieure de produits en même temps que les taxes indirectes et marges associées aux autres achats de la demande intérieure.

Pourquoi cette préférence ? Parce qu'en général, les taux des taxes indirectes dépendent plutôt de la nature du produit que de l'identité de l'acheteur. L'approche retenue est donc bien adaptée à la simulation de changements fiscaux où certaines catégories de produits seraient exemptées d'une taxe ou grevées à un taux différent. En revanche, la méthode de Statistique Canada serait mieux adaptée aux simulations de changements fiscaux où certaines activités ou certains agents seraient exemptés de payer une taxe ou assujettis à des taux différents. Pour incorporer au modèle une partie des possibilités offertes par la méthode de Statistique Canada, sans renoncer aux avantages de l'autre approche, il est prévu que les taux de taxes indirectes puissent être éventuellement différenciés entre trois grandes catégories d'acheteurs : ménages consommateurs, investisseurs et branches de production (consommation intermédiaire).

4. Structure du modèle

En dehors des traits distinctifs déjà signalés, la structure générale du modèle est relativement standard. Pour chaque région, le modèle reproduit le circuit classique des revenus et dépenses. Les facteurs de production (travail et capital) sont utilisés dans la production de biens et services qui sont, soit vendus localement, soit exportés vers l'autre région ou vers l'étranger. Conjointement, l'offre et la demande sur les marchés des facteurs déterminent les taux de salaire et de rendement du capital, et par là la rémunération des facteurs. Celle-ci se traduit en revenu pour les agents économiques : une fois pris en compte les transferts entre agents (y compris les impôts sur le revenu) et l'épargne, les revenus engendrent la demande finale. La demande finale, combinée à la demande intermédiaire, constitue la demande intérieure, qui interagit avec l'offre des producteurs locaux et celle de l'autre région et du reste du monde. Sont ainsi déterminés les prix et les quantités des produits achetés localement et importés, ce qui boucle la boucle. Il s'agit donc bel et bien d'un modèle d'équilibre général, où les prix et les quantités d'équilibre sont déterminés par l'interaction de l'offre et de la demande sur les marchés.

Dans chaque branche, la technologie de production, à rendements d'échelle constants, utilise du capital, du travail et des intrants intermédiaires. La production est représentée par un processus à deux niveaux : au premier niveau, la valeur ajoutée est produite selon une fonction Cobb-Douglas, à partir du capital et des différentes catégories de travailleurs ; au second, la valeur ajoutée et la consommation intermédiaire sont combinées selon une fonction Leontief pour obtenir l'extrant. La consommation intermédiaire totale de chaque branche est constituée de biens et services selon une fonction Leontief.

L'output est un agrégat des divers produits de la branche, destinés au marché intérieur et à l'exportation, vers l'autre région ou vers le reste du monde. Des fonctions à élasticité de transformation constante (CET) emboîtées à deux niveaux permettent de capter l'imparfaite substituabilité, du point de vue de la production, d'abord entre les différents produits, puis entre les biens produits pour le marché intérieur et ceux qui sont destinés à l'exportation vers l'autre région ou vers le reste du monde. Au premier niveau, l'output composite de la branche est donc une combinaison de ses divers produits. Au second niveau, chaque produit est un agglomérat de biens de même catégorie dirigé vers chacun des trois marchés de destination : le marché intérieur, le marché d'exportation vers l'autre région (le reste du Canada pour le Québec et vice-versa) et le marché des exportations internationales. À chaque étape, la composition de l'agrégat est déterminée de façon à maximiser le revenu de la firme représentative en fonction des prix des composantes.

Les ménages tirent leur revenu des salaires, des dividendes et intérêts, des transferts nets du gouvernement et de l'étranger. Les revenus du travail générés par la production sont répartis entre les catégories de ménages selon des parts fixes. Toutefois, même si les ménages sont propriétaires des entreprises, ils ne reçoivent pas directement la rémunération du capital : la part qui leur revient est d'abord versée aux entreprises, qui paient des dividendes et intérêts aux comptes suprarégionaux correspondants ; c'est à partir de ces comptes suprarégionaux que les revenus de placements sont distribués, en parts fixes, entre les catégories de ménages.

On représente le comportement de chaque catégorie de ménages dans chaque région à l'aide d'un ménage représentatif. La façon dont les ménages disposent de leur revenu est illustrée dans un modèle à plusieurs niveaux :

- Les recettes des ménages de chaque catégorie sont réparties entre l'impôt sur le revenu, l'épargne, la consommation et les transferts.
- Les ménages paient aux gouvernements de l'impôt sur le revenu, selon des proportions fixes des revenus totaux après déduction des transferts non imposables reçus.
- Une fois prélevé l'impôt sur le revenu, une part fixe du revenu disponible est consacrée par chaque catégorie de ménages à l'épargne.
- Les transferts versés par les ménages, y compris la partie transfert des intérêts sur les dettes de consommation, sont fixés de façon exogène.
- Le solde constitue, pour chaque catégorie de ménages, le montant de ses dépenses de consommation totales.
- Chaque ménage représentatif répartit ensuite ses dépenses entre les catégories de dépenses personnelles, de façon à maximiser son utilité. La fonction d'utilité choisie est du type Linear Expenditure System (LES) à la Stone-Geary.
- Enfin, pour chaque catégorie de dépenses personnelles, on fait la somme des dépenses de l'ensemble des ménages d'une région donnée, puis ces dépenses sont réparties entre les différents biens et services de façon optimale selon une fonction à élasticité de substitution constante (CES).

L'absorption intérieure de chaque bien est la somme des quantités demandées de ce bien par les ménages, les entreprises et les gouvernements, aux fins de consommation finale, d'investissement et de consommations intermédiaires. Dans la plupart des cas, un bien ou un service peut être fourni par plus d'un secteur productif local, ou encore peut être importé du reste du Canada ou d'ailleurs dans le monde. L'hypothèse est faite que, du point de vue des acheteurs, les produits d'une même catégorie de biens et services provenant des différents secteurs productifs locaux sont parfaitement substituables entre eux.

Tel n'est pas le cas, par contre, des biens et services produits localement par rapport aux importations provenant de l'autre région ou du reste du monde. La quantité demandée de chaque bien est donc un composite de production locale et d'importations. La répartition de la demande de ce bien composite entre les trois sources d'approvisionnement concurrentes est régie par une fonction à élasticité de substitution constante (CES). C'est le choix d'une élasticité non infinie qui traduit l'hypothèse que les importations et les produits locaux ne sont pas parfaitement substituables, conformément à l'approche dite d'Armington (1969), couramment utilisée dans ce type de modèle. Ainsi, les parts des trois sources d'approvisionnement dans l'agrégation sont déterminées par la minimisation du coût d'acquisition du composite ; grâce à la propriété d'homothéticité de la fonction CES, on en déduit le prix du bien composite. Un avantage de cette forme de modélisation des importations est la possibilité d'appliquer une fiscalité différente aux biens selon leur origine (c'est le cas des droits de douane, qui ne sont prélevés que sur les importations internationales).

Un soin particulier a été apporté à la représentation de la fiscalité. Chaque taxe s'applique dans le modèle à un flux qui représente d'aussi près que possible l'assiette fiscale correspondante. C'est le cas notamment des taxes indirectes, qui s'appliquent pour ainsi dire en couches successives les unes sur les autres. De plus, le modèle prévoit que les taux de taxes indirectes peuvent être différents, selon qu'il s'agit de dépenses de consommation des ménages, d'investissement ou de consommation intermédiaire[4].

5. Conclusion

La réalisation du modèle d'équilibre général calculable pour le Québec constitue un bel exemple de collaboration entre le gouvernement et les universités. Le projet a permis de mettre en valeur l'expertise de chacune des parties et de susciter en même temps les synergies potentielles des intervenants. Les travaux ont démontré qu'il est possible, avec des moyens somme toute raisonnables, de mettre en place un modèle d'équilibre général calculable, opérationnel et détaillé, de grande envergure, adapté aux complexités de

4. Le lecteur intéressé pourra trouver le détail des spécifications du modèle dans Decaluwé *et al.* (2003).

l'économie du Québec. Ces travaux ont permis de mettre à la disposition du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche un outil d'une grande efficacité qui aidera à mieux comprendre et analyser les impacts des décisions économiques.

Références bibliographiques

ANNABI, N. (à paraître). *Formes fonctionnelles et paramétrisation dans les modèles d'équilibre général calculables*. Ministère des Finances du Québec, Collection « Feuille d'argent ».

ARMINGTON, P. 1969. *A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production*. IMF Staff Papers 16, 159-178.

BAHAN, D., BILODEAU, D., LEMELIN, A., et ROBICHAUD, V. 2003. *Une matrice de comptabilité sociale birégionale pour le modèle d'équilibre général du ministère des Finances du Québec* (MEGFQ). Collection « Feuille d'argent », Travaux de recherche 2003-003. Québec, QC : Direction des communications du ministère des Finances. Disponible à : <www.finances.gouv.qc.ca/fr/ministere/bourses/pdf/2003_003.pdf>.

DECALUWÉ, B., LEMELIN, A., ROBICHAUD, V., et BAHAN, D. 2003. *Modèle d'équilibre général du ministère des Finances du Québec* (MEGFQ) *: Caractéristiques et structure du modèle*. Collection « Feuille d'argent ». Travaux de recherche 2003-002. Québec, QC : Direction des communications du ministère des Finances. Disponible à : <www.finances.gouv.qc.ca/fr/ministere/bourses/pdf/2003_002.pdf>.

EMINI, C.A., BAHAN, D., FLOREA, D., GENEST-LAPLANTE, É., DECALUWÉ, B., LEMELIN, A., et ROBICHAUD, V. (à paraître). *Impact de l'élimination de la règle des quinze ans régissant l'industrie pharmaceutique au Québec : analyse à l'aide du modèle d'équilibre général du ministère des Finances, de l'Économie et de la Recherche du Québec*. Ministère des Finances du Québec, Collection « Feuille d'argent ».

ROUND, J.I. 1988. Incorporating the international, regional, and spatial dimension into a SAM : Some methods and applications. Dans *Recent Advances in Regional Economic Modeling*, Harrigan, F., McGregor, P.G. (dir.). London Papers in Regional Science, Vol. 19. London, UK : Pion Ltd, 24-45.

CHAPITRE 15

IMPACTS MACROÉCONOMIQUES DE MESURES D'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE SUR L'AGRICULTURE AU CANADA

Paul J. Thomassin
Université McGill

L. Martin Cloutier
Université du Québec à Montréal

Résumé

Dans ce chapitre, nous examinons les résultats de l'application du modèle d'entrée-sortie canadien à l'étude de moyens à prendre pour tenter d'atténuer les gaz à effet de serre dans les secteurs agricoles et agroalimentaires. À cette fin, un modèle d'entrée-sortie rectangulaire a été appliqué à l'étude de multiples scénarios d'atténuation des gaz à effet de serre. Le modèle utilisé mesure 1) les effets directs, 2) les effets directs et indirects et 3) les effets directs, indirects et induits sur le produit industriel. Les résultats de huit scénarios, correspondant à autant de moyens d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre, sont présentés. Ces résultats sont parfois équivoques quant aux répercussions économiques et environnementales encourues. Ainsi, pour l'ensemble des scénarios considérés, les résultats indiquent que les mesures d'atténuation envisagées auraient un impact économique négatif et que les moyens envisagés seraient insuffisants pour atteindre les objectifs de Kyoto.

1. Introduction

En ratifiant le protocole de Kyoto, le Canada s'engageait à ramener ses émissions de gaz à effet de serre à 6 % de leur niveau de 1990. Il est lucide de supposer que cette réduction d'émissions de gaz à effet de serre, une fois effectuée, engendrerait des répercussions économiques sur les divers secteurs de l'économie canadienne. La production agricole n'y échapperait pas.

L'objectif premier de ce chapitre consiste à montrer comment un modèle d'entrée-sortie peut être utilisé pour mesurer les impacts macroéconomiques de mesures d'atténuation des gaz à effet de serre sur la production agricole. Cette démonstration présente un certain nombre de défis intéressants aux plans conceptuel et pratique. L'un des objectifs secondaires est de présenter cette démarche de recherche et de faire un survol de quelques résultats obtenus à travers cet exercice.

La problématique de modélisation de la réduction des gaz à effet de serre en agriculture présente un contexte intéressant. On estime qu'au Canada la production agricole était responsable de 9,5 % des émissions totales des gaz à effet de serre en 1990 (Neitzert *et al.*, 1999). Le CO_2 est reconnu comme la principale source d'émission pour l'ensemble des secteurs industriels étant donné l'utilisation des hydrocarbures comme source d'énergie dans les processus de production. Mais la composition des émissions de gaz à effet de serre en agriculture a la particularité d'être différente de celle d'autres secteurs industriels ; elle comprend principalement le N_2O et le CH_4, dans des proportions de 61 % et de 38 %, respectivement, alors que le CO_2 ne compte que pour 1 % du total.

En outre, la production agricole repose sur des processus biologiques et physiologiques complexes en interaction avec la consommation de ressources et l'environnement naturel. Les processus de production en interaction avec les systèmes environnementaux sont sources d'incertitudes, et l'impact de ces nombreux mécanismes naturels souvent peu connu au plan scientifique. D'où une confusion dans l'analyse économique qui dépend également d'une compréhension physique du terrain. Par exemple, il est fort difficile d'élaborer des moyens d'atténuation des gaz à effet de serre dans ce secteur étant donné les différents types de sols, les pratiques agricoles, la variété des processus impliqués, les conditions climatiques, etc., qui ont diverses manifestations et répercussions dans un pays aussi étendu que le Canada.

Une autre difficulté réside dans la définition de l'unité d'analyse. En effet, selon les termes du protocole de Kyoto, les sols en production agricole ne sont pas reconnus comme étant des puits de carbone. Cet aspect fut un point sensible des dernières sessions de négociation et aura un impact déterminant sur les méthodes à adopter dans l'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture.

Les sections suivantes du chapitre sont structurées comme suit. Dans la prochaine section, le contexte de la modélisation des impacts des solutions envisagées pour atténuer les gaz à effet de serre est exposé. Le détail mathématique du modèle d'entrée-sortie employé dans cette étude est présenté à la section 3. Ensuite, les résultats de scénarios d'impacts économiques et

environnementaux sont analysés dans la section 4. On trouve, dans cette section, un survol des liens entre les modèles d'optimisation ayant contribué à l'estimation des entrées du vecteur de la demande finale employé dans l'analyse d'entrée-sortie. Le modèle d'entrée-sortie est utilisé pour le calcul des impacts économiques sur le produit industriel. Dans la section 5, on résume les résultats des principaux scénarios d'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture et l'on établit une comparaison en prenant pour référence le maintien du statu quo sur la période 1990-2010. Les résultats économiques obtenus par le modèle d'entrée-sortie sont interprétés en lien avec les calculs d'impact sur les gaz à effet de serre dans les secteurs de l'agriculture et agroalimentaire, obtenus par le modèle CEEMA. Une conclusion termine le chapitre.

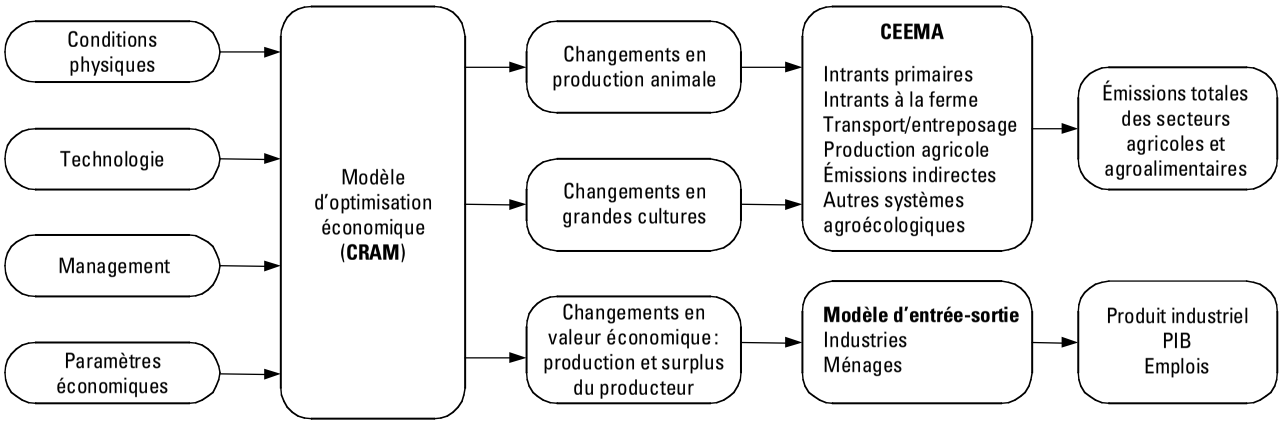
2. Modélisation des effets macroéconomiques sur l'environnement

Afin de déterminer les méthodes possibles d'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture au Canada, des tables de discussions ont été formées. La Table de l'agriculture et de l'agroalimentaire sur le changement climatique[1] (TAACC, 2000) a procédé en trois temps pour déterminer des méthodes d'atténuation appropriées. Dans un premier temps, les experts de diverses disciplines ont examiné la gestion des sols, les pratiques culturales, d'élevage et agroforestières, pouvant mener à une réduction des gaz à effet de serre. Dans un deuxième temps, la TAACC a déterminé quelles méthodes, parmi celles proposées, pourraient faire l'objet d'analyses approfondies, ainsi que de nombreux modèles pour mesurer les impacts économiques, sociaux, environnementaux et sur la santé humaine. Dans un dernier temps, la TAACC (2000) a produit un document résumant les options possibles.

Une combinaison de modèles a été employée pour obtenir les estimations nécessaires au calcul macroéconomique d'entrée-sortie des divers scénarios intersectoriels agroéconomiques. L'ensemble des modèles utilisés est montré dans la figure 15.1. Le modèle d'entrée-sortie mesure les répercussions macroéconomiques en montrant le produit industriel brut requis pour satisfaire aux exigences de la demande finale pour les produits. Dans le contexte de cette étude, la composition du vecteur de la demande finale et les changements à apporter à cette demande selon les scénarios étudiés ont été calculés par le Canadian Economic and Emissions Model for Agriculture (CEEMA). Le CEEMA contient deux volets, un modèle d'optimisation économique, le CRAM, et un modèle d'émission de gaz à effet de serre (*Greenhouse Gas Emission Model* ; Agriculture et Agroalimentaire Canada, 1999a, 1999b, 1999c, 1999d). Le volet économique du CEEMA sera employé, dans une première étape, pour mesurer les résultats de référence permettant de représenter le maintien du statu quo. Les résultats des méthodes d'atténuation mesurées par

1. Pour plus de détails au sujet de la Table de l'agriculture et de l'agroalimentaire sur le changement climatique, voir le site Internet : <www.agr.gc.ca/policy/environment/air_03_03_f.phtml>.

FIGURE 15.1
Interrelations entre les modèles employés pour mesurer les impacts sur les émissions de gaz à effet de serre et sur l'économie



Source : Adapté de Agriculture et Agroalimentaire Canada (2000).

le modèle génèrent donc une composition des extrants en denrées agricoles pour les différentes productions. C'est cette différence entre les résultats du modèle de référence pour le scénario de maintien du statu quo et chacun des scénarios associés à chacune des méthodes d'atténuation proposées qui détermine le changement dans la composition de la demande finale et qui fera l'objet de mesures d'impacts 1) directs, 2) directs et indirects et 3) directs, indirects et induits, par le modèle d'entrée-sortie.

3. Le modèle d'entrée-sortie

Dans cette section, nous examinerons de plus près la formulation du modèle d'entrée-sortie utilisé pour effectuer les calculs de scénarios visant à mesurer les impacts industriels. Ces scénarios définissent les paramètres d'adoption de mesures d'atténuation des gaz à effet de serre dans les secteurs de l'agriculture et de l'agroalimentaire. Le modèle d'entrée-sortie repose sur la formulation rectangulaire des produits par industrie telle qu'elle a été décrite par Miller et Blair (1985). Il diffère du modèle de Leontief qui présente des tableaux de flux sur une base industrielle. Le modèle rectangulaire est le type de modèle conçu et régulièrement mis à jour par Statistique Canada. Le cadre comptable des tableaux entrées-sorties est présenté de manière synoptique au tableau 15.1. Ce tableau représente les flux des produits utilisés comme entrées intermédiaires et primaires dans le processus de production et de la composition de la demande finale. Les flux de produits sont mesurés en prix reçus par les manufacturiers et les valeurs sont exprimées en dollars canadiens.

Quelques matrices composent le cadre comptable représenté dans le tableau. La matrice d'utilisation reporte les valeurs de toutes les entrées du processus de production. La matrice d'utilisation comprend les sous-matrices **U**, **YI**, **PE** et **YP**. Les dimensions et l'interprétation des données que l'on retrouve dans ces matrices sont définies comme suit : **U** est une matrice $nc \times ni$ d'entrées intermédiaires utilisées par les autres industries ; **PE** est une matrice $nc \times npe$ des produits achetés par le secteur des ménages ; **YI** est une matrice $nyh \times ni$ de l'achat d'entrées intermédiaires par les ménages ; **YP** est une matrice $nyh \times npe$ de paiement de revenus (ou d'achats d'entrées primaires par les ménages). Les dimensions de ces matrices sont définies comme suit : *nc* est le nombre de produits, *ni* le nombre de secteurs industriels, *npe* le nombre de catégories de ménages et *nyh* le nombre d'entrées primaires achetées par les ménages.

La lecture horizontale de la matrice **U** donne une estimation de la valeur des produits utilisés comme intrants dans le processus de production par les industries. De manière analogue, la matrice **PE** affiche les dépenses des ménages en produits, biens et services, par catégorie de revenu. La somme horizontale des entrées des matrices **U**, **PE** et **F** donne le vecteur **q**. Le vecteur **q** est la demande finale totale, donc intermédiaire et finale, pour les produits dans l'économie.

TABLEAU 15.1

Cadre comptable du modèle canadien d'entrée-sortie

Nom de la matrice		Type de compte	Fabrication		Utilisation		Catégories de demande finale						Total
			Ouvert	Fermé	Ouvert	Fermé	Exogènes						
			Produits	Sources de revenu	Industries	Dépenses personnelles	f	E	X	M	A	N	
Utilisation	Ouvert	Produits			**U**	**PE**	F						**q**
	Fermé	Produits primaire s			**YI**	**YP**	YF						**r**
	Exogène	Produits primaires			EYI	EYP	EYF						**e**
Fabrication	Ouvert	Industries	**V**										**g**
	Fermé	Ménages		**Wh**									
Total			**q'**	**r'**	**g'**	**h'**	**e'**						

Source : Adapté de Statistique Canada (1981).

Les entrées de la demande finale sont représentées par les sous-matrices **F** et **YF**. La matrice **F** est une matrice $nc \times nf$ des produits alloués aux catégories de la demande finale, tandis que la matrice **YF** de dimension $nyh \times nf$ inclut les entrées primaires utilisées par les catégories de la demande finale. La dimension *nf* représente le nombre de catégories dans la demande finale.

Les valeurs de la matrice **YI** donnent une estimation des revenus utilisés comme entrées primaires par les secteurs industriels de l'économie. Les matrices **YP** et **YF** contiennent les achats d'intrants primaires et de salaires utilisés par les ménages. La somme horizontale de ces trois matrices donne le total de toutes les dépenses pour les diverses catégories de revenus que l'on retrouve dans l'économie, soit le vecteur **r**.

La demande intermédiaire pour les produits et l'achat des intrants primaires destinés aux ménages utilisés par chaque secteur sont reportés verticalement dans les matrices **U** et **YI**. En ajoutant les entrées primaires exogènes, **EYI**, sur une base sectorielle aux matrices **U** et **YI**, et en additionnant verticalement, on obtient le vecteur **g′**. Le vecteur **g′** est de dimension $1 \times ni$ et donne la valeur des coûts de production totaux pour chaque secteur. En lisant les colonnes des matrices **PE**, **YP**, **EYP** vers le bas, on obtient les dépenses des ménages par classe de revenu. La somme des colonnes renvoie à la valeur des dépenses des ménages par classe de revenu dans les entrées du vecteur **h**, de dimension $1 \times npe$.

La matrice de fabrication montre les valeurs des sorties produites dans l'économie. Ces matrices comprennent deux sous-matrices, **V** et **W**. La matrice **V** est une matrice $ni \times nc$ de la valeur des sorties de chaque secteur industriel et **W** est une matrice de dimension $npe \times nph$ des sources de revenus associées avec les classes de revenu des ménages. Le vecteur **g** de dimension $ni \times 1$ est obtenu par la somme horizontale de la matrice **V** et donne une estimation du total de la valeur des produits sur une base sectorielle. Ce vecteur peut également être interprété pour signifier qu'il représente le revenu total de chaque secteur. Le vecteur **h**, de dimension $npe \times 1$, est donné par la somme horizontale des éléments de la matrice **W**. Ce vecteur constitue la valeur des entrées primaires produites par les ménages par catégorie de revenu.

Les colonnes de la matrice **V** donnent la valeur de chaque sortie produite par tous les secteurs. La somme verticale des éléments de la matrice donne la valeur totale des sorties produites dans l'économie par produit et elle est représentée par le vecteur **q′**. Le vecteur **r′** donne le total de revenu par revenu primaire par catégorie de revenu et il est le résultat de la somme de la matrice **W**. La dimension de **q′** est de $1 \times nc$ des sorties de produits et celle de **r′** est de $1 \times nyh$ des revenus associés aux entrées primaires.

Les modèles d'entrée-sortie sont des modèles d'équilibre général et statiques de l'économie. Les identités suivantes doivent être respectées. Premièrement, la valeur des entrées fournies par l'ensemble de l'économie, **q**, doit être égale à la valeur des produits demandés, **q′**. La même relation tient pour les ménages : la valeur totale des revenus par source de revenu par classe de revenu, **r′**, est égale au total de la valeur des intrants primaires payés par les secteurs, **YI**, les ménages, **YP**, et de la demande finale, **YF**, et elle est donnée par le vecteur **r**.

Une relation d'équilibre analogue tient sur une base sectorielle. Le revenu total des sorties produites par les secteurs, **g**, est égal aux coûts totaux de chaque secteur industriel, **g'**. Pour les ménages, le revenu total par classe de revenu des entrées primaires de revenus, **h**, est le vecteur transposé des dépenses totales par classe de revenu, **h'**.

La formulation mathématique ci-après reprend le modèle élaboré par Cloutier et Thomassin (1994). Cette formulation présente la méthode par laquelle le modèle canadien ouvert peut être fermé pour le secteur des ménages. Il est donc important d'utiliser une notation matricielle partitionnée qui permet de suivre les multiplicateurs mesurés par le modèle lorsque ce dernier fait l'objet d'un choc exogène de la demande finale. Le modèle initial de Cloutier et Thomassin (1994) est étendu pour montrer l'impact des fuites dans l'obtention de la matrice de Miyazawa (1976), permettant de mesurer les impacts industriels directs, indirects et induits.

Le cadre comptable du modèle rectangulaire canadien est défini par des relations d'équilibre qui servent à modéliser et à mesurer l'impact d'un changement dans la composition de la demande finale pour des produits ou pour diverses sources de revenus. La première relation en (1) décrit l'allocation des sorties (biens, services, intrants primaires reliés au revenu) par la demande intermédiaire, les dépenses personnelles et les catégories de la demande finale. En notation matricielle, la valeur de la demande intermédiaire, des dépenses personnelles et des catégories de la demande finale pour les produits sont additionnées pour obtenir la valeur totale pour la demande,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{PE} \\ \mathbf{YI} & \mathbf{YP} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) + \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}), \tag{1}$$

où les matrices et vecteurs sont définis comme ci-dessus et **i** est un vecteur unitaire de dimension concordante.

L'équation de l'offre en (2) décrit que la valeur totale du produit industriel est égale à la somme de tous les produits des secteurs industriels. De manière analogue, la valeur totale du revenu des ménages correspond à la somme de toutes les sources de revenu,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} (\mathbf{i}), \tag{2}$$

où les matrices et vecteurs sont définis comme dans la description du cadre comptable décrit au tableau 15.1.

Deux postulats importants entrent dans le processus de production représenté par ce modèle. Premièrement, les entrées intermédiaires et les entrées primaires associées au revenu utilisées dans le processus de production sont directement proportionnelles aux sorties des secteurs industriels et des ménages. Cela fait référence au processus technologique de Leontief et s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{PE} \\ \mathbf{YI} & \mathbf{YP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{g}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{h}} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

où **B** est une matrice *nc* × *ni* de coefficients techniques ; **P** est une matrice *nc* × *npe* de coefficients des ménages ; **H** est une matrice *nyh* × *ni* de coefficients techniques primaires ; **T** est une matrice *nyh* × *nye* de coefficients d'entrées primaires des ménages et le « ^ » dénote une matrice diagonale de dimension concordante.

Le deuxième postulat indique que les sorties sont allouées par secteur en proportion de parts de marché fixes. De manière semblable, les revenus des ménages sont alloués en proportion fixe par groupe de revenu. Ce postulat s'exprime par

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{r}} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

où **D** est une matrice *ni* × *nc* de parts de marché et **J** est une matrice *npe* × *nyh* de parts de coefficients de parts de revenu.

L'ensemble de ces relations et postulats technologiques est lié ci-après dans l'élaboration d'un modèle permettant de mesurer les impacts macroéconomiques d'un changement exogène sur la demande finale ou d'une entrée primaire reliée au revenu. En prenant la partie gauche de l'équation (2), et en substituant la partie droite du postulat en (4), on obtient que le postulat des parts de marché s'exprime par

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

En substituant [***q r***]′ dans (5) en utilisant la partie à droite de l'équation (1), c'est-à-dire la valeur de la demande totale, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{PE} \\ \mathbf{YI} & \mathbf{YP} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) + \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) \right\}. \tag{6}$$

De plus, en substituant (3), le postulat technologique, pour le premier terme entre les crochets en (6), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) \right\}. \tag{7}$$

Le modèle développé jusqu'à l'équation (7) ne considère pas de manière explicite les fuites de flux de l'économie telles que les importations, la production des gouvernements, les retraits d'inventaires des produits utilisés comme entrée intermédiaire ou primaire dans la satisfaction de la demande finale ou de la demande en revenu. Prendre en considération ces fuites rend les mesures obtenues par le modèle plus précises. Or, on peut ventiler la demande finale de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f} & \mathbf{E} & \mathbf{X} & \mathbf{M} & \mathbf{A} & \mathbf{N} \\ \mathbf{Yf} & \mathbf{YE} & \mathbf{YX} & \mathbf{YM} & \mathbf{YA} & \mathbf{YN} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) \tag{8}$$

où **f** est un vecteur colonne de *nc* × 1 qui exprime la demande finale nette des réexportations, des importations, de la production du gouvernement et des retraits d'inventaires ; **Yf** est un vecteur *nyh* × 1 des valeurs des entrées primaires dans la demande finale nette des réexportations, des exportations,

des importations, de la production du gouvernement et des retraits d'inventaires ; **E** est un vecteur $nc \times 1$ de la valeur des exportations ; **YE** est un vecteur $nyh \times 1$ d'entrées primaires de réexportations ; **X** est un vecteur $nc \times 1$ de la valeur des produits réexportés, **YX** est un vecteur $nyh \times 1$ de la valeur des entrées primaires exportées ; **M** est un vecteur $nc \times 1$ de produits exportés ; **YM** est un vecteur $nyh \times 1$ d'importation d'intrants primaires ; **A** est un vecteur de dimension $nc \times 1$ qui reporte la production des gouvernements ; **YA** est un vecteur $nyh \times 1$ de la production par les gouvernements d'intrants primaires ; **N** est un vecteur de dimension $nc \times 1$ qui reporte la valeur des retraits d'inventaires ; **YN** est un vecteur $nyh \times 1$ de la valeur des retraits d'inventaires d'intrants primaires.

Les importations, la production des gouvernements et les retraits d'inventaires sont supposés en proportions fixes de la demande pour les produits, ce qui peut s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{YM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\boldsymbol{\alpha}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\hat{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f} + \mathbf{E} \\ \mathbf{Yf} + \mathbf{YE} \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{YA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\boldsymbol{\tau}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\hat{\boldsymbol{\nu}} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f} + \mathbf{X} \\ \mathbf{Yf} + \mathbf{YX} \end{bmatrix} \right\},$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{YN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\boldsymbol{\mu}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\hat{\boldsymbol{\rho}} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f} + \mathbf{X} \\ \mathbf{Yf} + \mathbf{YX} \end{bmatrix} \right\} \tag{9}$$

En substituant les relations de fuite définies en (9) dans (8) et après simplification, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) = \begin{bmatrix} (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{f} & (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{X} & (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}})\mathbf{E} \\ (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} - \hat{\boldsymbol{\nu}} - \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{Xf} & (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\nu}} - \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{YX} & (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}})\mathbf{YE} \end{bmatrix} (\mathbf{i})$$
$$+ \begin{bmatrix} -(\hat{\boldsymbol{\alpha}} + \hat{\boldsymbol{\tau}} + \hat{\boldsymbol{\mu}}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -(\hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}}) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} \right\}. \tag{10}$$

En substituant (10) en (7) et en rendant le premier terme de (1) égal à [**FD**](i), on obtient

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & (\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{P} \\ \mathbf{H} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} \right\} + [\mathbf{FD}] (\mathbf{i}) \tag{11}$$

En récrivant les termes de (11), on obtient en (12) le calcul des sorties industrielles requis pour satisfaire le changement exogène de la demande finale pour les produits ou en termes de revenus par secteur.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{D}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{B} & -(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{P} \\ -\mathbf{J}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{H} & \mathbf{I} - \mathbf{J}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}) \tag{12}$$

Si l'on définit la matrice inverse de (12) de la manière suivante, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{D}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{B} & -(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\alpha}} - \hat{\boldsymbol{\tau}} - \hat{\boldsymbol{\mu}})\mathbf{P} \\ -\mathbf{J}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{H} & \mathbf{I} - \mathbf{J}(\mathbf{I} - \hat{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\boldsymbol{\nu}} + \hat{\boldsymbol{\rho}})\mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} & \boldsymbol{\Theta} \\ \boldsymbol{\Lambda} & \boldsymbol{\Gamma} \end{bmatrix}^{-1} \tag{13}$$

En résolvant la matrice inverse partitionnée en (13), nous obtenons la formulation de Miyazawa (1976) pour un secteur des ménages endogènes. En substituant la matrice partitionnée dans (12), et en multipliant la matrice diagonale adjacente, on obtient une matrice rectangulaire de Miyazawa en (14) qui tient compte des fuites.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b(I + \Theta\Gamma\Lambda\beta)D} & \mathbf{\beta\Theta KJ} \\ \mathbf{K\Theta\beta D} & \mathbf{KJ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{YF} \end{bmatrix} (\mathbf{i}). \qquad (14)$$

Les multiplicateurs pour les effets induits des ménages sont donnés par la matrice $\mathbf{K} = (\mathbf{\Gamma} - \mathbf{\Lambda\beta\Theta})$. En additionnant les colonnes de la matrice **K**, on obtient les multiplicateurs de Keynes pour le secteur des ménages. La matrice des effets directs, indirects et induits est donnée par $\mathbf{\Lambda\beta\Theta}$. La matrice $\mathbf{\beta\Theta K}$ est la matrice utilisée pour le calcul du changement en consommation résultant d'un choc exogène sur la demande. La matrice $\mathbf{K\Theta\beta}$ dénote la matrice des multiplicateurs de revenus qui varient avec les changements de la demande finale. L'équation (14) est celle employée pour calculer les impacts des méthodes d'atténuation des émissions des gaz à effet de serre envisagées dans les divers scénarios proposés visant à satisfaire les exigences du Canada.

4. Élaboration des scénarios et résultats

Une série de procédures est effectuée dans la préparation des scénarios pour l'étude des méthodes d'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture (pour plus de détails consulter à cet effet Thomassin et Baker, 2000, et Thomassin, 2002). Premièrement, le modèle CRAM effectue deux estimations. La première d'entre elles est un calcul du scénario de référence de maintien du statu quo pour la période 1990-2010. Deuxièmement, un autre calcul suppose une mesure d'atténuation, dans le cadre d'un scénario, durant la période 2000-2010. Troisièmement, la différence entre ces deux mesures devient le changement dans la composition de la demande finale dont les impacts sont calculés par les modèles d'entrée-sortie ouvert (permettant de mesurer les effets directs et indirects) et fermé pour les ménages (permettant de mesurer les effets directs, indirects et induits). Quatrièmement, les fuites de flux sont soustraites de la demande finale. Cinquièmement, les changements dans la composition de la demande finale sont négatifs et positifs pour un même scénario. Sixièmement, ces effets sont distincts et alloués séparément dans la composition de la demande finale pour obtenir les résultats d'un scénario. Septièmement, les répercussions obtenues par les modèles d'entrée-sortie sont ensuite agrégées, permettant ainsi l'obtention d'un résultat net par scénario. Huitièmement, les effets industriels nets mesurés entre les modèles ouverts et fermés pour les ménages ont été calculés pour obtenir les effets induits.

Les résultats des scénarios sont présentés dans le tableau 15.2. Les trois premières colonnes de ce tableau (A, B et C) montrent les impacts macroéconomiques du modèle d'entrée-sortie, mesurés en sorties industrielles ; alors que les résultats des colonnes D et E, soit ceux obtenus par le modèle CEEMA, montrent la variation relative de la réduction des gaz à effet de serre pour

TABLEAU 15.2

Changements en sorties industrielles et en émissions de gaz à effet de serre pour divers scénarios d'atténuation (en M$)

Scénarios	Modèle d'entrée-sortie			Impact sur la production des gaz à effet de serre	
	(A) Effets directs	(B) Effets directs et indirects	(C) Effets directs, indirects et induits	(D) Impact sur les gaz à effet de serre GIEC[1]/Stocks (% du maintien du statu quo)	(E) Impact de la production agricole sur les gaz à effet de serre[2] (% du maintien du statu quo)
1. Gestion des éléments nutritifs des sols – Meilleure gestion des engrais azotés.	–64,98	–105,91	–70,76	–1,47	–1,37
2. Augmentation de l'utilisation sans labour.	26,96	50,21	–286,90	0,61	–3,06
3. Diminution de l'utilisation de la jachère d'été.	494,37	1 120,27	1 899,01	2,52	2,05
4a. Programme d'établissement d'une couverture végétale permanente (PECVP) – Pas d'augmentation du troupeau de bétail.	–311,22	–708,45	–1 192,63	–0,91	–1,73
4b. Programme d'établissement d'une couverture végétale permanente (PECVP) – faible augmentation du troupeau de bétail.	–259,36	–584,97	–1 009,67	–0,05	–1,12
4c. Programme d'établissement d'une couverture végétale permanente (PECVP) – forte augmentation du troupeau de bétail.	–184,32	–403,39	–128,55	0,96	–0,20
5. Combinaison de gestion de lots de pâturages.	113,95	269,07	516,01	0,01	–3,90
6. Amélioration de la qualité des fourrages.	60,19	140,38	106,97	–0,36	–0,07
7. Combinaison de stratégies de nutrition.	–34,49	–96,54	–258,33	–1,13	–1,10
8. Brise-vent sur 0,1 % des terres en culture dans l'Ouest canadien.	–13,05	–29,30	–64,39	–0,03	–0,29

[1] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

[2] Les impacts des émissions de gaz à effet de serre ont été mesurés avec les coefficients du modèle CENTURY adapté aux conditions Canadiennes (Jenkins *et al.*, 2000). Le total des impacts de la production agricole inclut le GIEC/niveau de stock plus une utilisation à la ferme des hydrocarbures et des puits de carbone (séquestration du C dans les sols).

chacun des scénarios. Les estimations de la colonne D s'appuient sur celles du GIEC, ainsi que sur celles d'experts, et traduisent les changements dans les émissions de gaz à effet de serre.

En d'autres termes : comment ce scénario va-t-il contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre ? Selon ces estimations, le Canada devrait réduire de 63 tonnes métriques ses émissions totales associées à l'agriculture, soit de 8 % par rapport au niveau de 1990. La colonne E renvoie les résultats analogues, en supposant toutefois que les sols puissent servir de puits de carbone et qu'il soit possible de comptabiliser l'utilisation d'hydrocarbures à la ferme. Selon les résultats de la colonne E, le Canada devrait réduire ses émissions totales reliées à l'agriculture de 6 %, par rapport à une situation de maintien du statu quo.

Le scénario 1 propose une gestion améliorée à la ferme des engrais azotés. Cette gestion aurait un impact sur l'ensemble de la production agricole au Canada et mènerait à une réduction de la consommation d'engrais azotés par les producteurs. Les résultats montrent que ce scénario réduirait l'activité économique en sorties industrielles directes de 65 M$, les effets directs et indirects seraient réduits de 105 M$ et les effets directs, indirects et induits de 70 M$. Il est intéressant de noter que les effets positifs de ce scénario sur l'agriculture et les secteurs agroalimentaires ne seraient pas compensés par les pertes encourues au niveau de la demande par le secteur des engrais. Par contre, ce scénario conduirait à une réduction d'environ 1,4 % des émissions de gaz à effet de serre, que les sols servent ou non de puits de carbone.

Le scénario 2 examine une pratique culturale sans labour. Ce scénario suppose que les producteurs adoptent des pratiques permettant de minimiser les perturbations dans les mouvements de sols, favorisant ainsi leur potentiel comme puits de carbone. Les répercussions de l'utilisation des sols comme puits de carbone montrent des réductions de 3,06 % (voir la colonne E) versus une augmentation des émissions de 0,61 % selon les données obtenues avec les paramètres du GIEC (voir la colonne D). Ces pratiques de gestion des sols nécessitent une augmentation de l'utilisation des herbicides, mais une réduction dans l'utilisation des machineries et des hydrocarbures. Les calculs supposent que les rendements agricoles ne seraient pas affectés. Les résultats économiques de ce scénario sont également équivoques. Les effets directs et indirects sont de 27 et de 50 M$, respectivement. Mais c'est au plan des effets directs, indirects et induits que l'économie perdrait 287 M$. Cela s'explique par le fait que ce sont d'autres secteurs de l'économie, et les classes de revenus des ménages de plus de 50 000 $ par année, et non pas ceux des intrants agricoles, de l'agriculture et de la transformation agroalimentaire, qui y perdraient.

Le scénario 3 affiche les résultats d'une réduction de la jachère d'été, principalement pratiquée dans les prairies de l'Ouest canadien. L'impact de la diminution de cette pratique de 38 % par rapport au maintien du statu quo produirait un effet positif important sur la production industrielle au Canada : les effets directs, indirects et induits sur l'économie seraient de 1 899 M$. Les

résultats de ce scénario iraient à l'encontre de l'objectif recherché de réduire les émissions de gaz à effet de serre puisqu'il mènerait à une augmentation de plus de 2 % des émissions par rapport au maintien du statu quo !

Le scénario 4 examine le programme d'établissement d'une couverture végétale permanente. Ce scénario est proposé avec divers degrés d'intensité dans la composition du troupeau de bétail : 4a) ne prévoit aucun changement dans le troupeau de bétail ; 4b) prévoit une faible augmentation du bétail ; 4c) prévoit une forte augmentation du bétail. Ce programme augmenterait de manière importante le potentiel en puits de carbone des sols en convertissant les plantes vivaces sur les terres marginales des provinces des prairies en couverture végétale permanente. En effet, la colonne E pour les scénarios 4a) et 4b) montre l'apport significatif des sols en puits de carbone selon ce scénario, avec des réductions de 1,73 % et de 1,12 %, respectivement. Selon les résultats des scénarios 4a), 4b), et 4c), les répercussions les plus importantes en sorties industrielles directes viendraient du scénario 4a) qui ne prévoit aucune augmentation du troupeau de bétail. Les résultats des analyses d'entrée-sortie montrent que les coûts économiques de ce scénario sont très élevés, soit 1 192, 1 009, et 128 M$ en effets directs, indirects et induits, pour les scénarios 4a), 4b) et 4c), respectivement. Dans le cas du scénario 4c, les coûts économiques sont compensés par une augmentation de la production de bœuf, une source de revenu supplémentaire qui ne compense pas suffisamment les coûts additionnels du programme, par rapport au maintien du statu quo.

Le scénario 5 considère des combinaisons de gestion de lots de pâturages, c'est-à-dire en réduisant le stockage sur les terrains de parcours, en utilisant les pâturages complémentaires et la rotation des pâturages. Ce scénario concerne principalement les provinces de l'Ouest canadien. Les effets escomptés sur l'environnement de ce scénario sont des plus intéressants avec une réduction de 3,90 %, si l'on considère la possibilité d'utiliser les sols comme puits de carbone. Selon les calculs du modèle d'entrée-sortie, ce résultat serait accompagné d'un impact positif sur l'économie : en effets directs de 114 M$, en effets directs et indirects de 270 M$ et en effets directs, indirects et induits totalisant 516 M$. Les secteurs qui seraient les plus avantagés par ces changements seraient l'élevage bovin, la culture des protéagineux et du blé, la production laitière de même que le secteur des intrants agricoles.

L'amélioration de la qualité des fourrages est envisagée dans le scénario 6. Cette méthode d'atténuation consiste à améliorer la qualité des fourrages de 15 % par rapport au maintien du statu quo en utilisant de meilleures méthodes de récolte et de stockage. Une meilleure qualité des fourrages permet de réduire les émissions des CH_4 en diminuant la consommation de l'énergie par les ruminants. Ce scénario diminuerait sensiblement l'émission des gaz à effet de serre d'environ 0,36 % par rapport au maintien du statu quo. Les résultats de ce scénario sont positifs pour l'économie. Les répercussions économiques directes, indirectes et induites sur le produit industriel sont de 60,19, de 140,38 et de 106,97 M$.

Le scénario 7 examine la possibilité de combiner des moyens permettant de mieux gérer la nutrition animale en diminuant l'apport protéique dans la composition de la diète du bétail. Ce scénario combine les impacts de ces

diètes et réduira d'environ 1,13 % les gaz à effet de serre. Par contre, au plan économique, les résultats de ce scénario ne sont guère encourageants puisque l'on se retrouve avec des effets directs et indirects négatifs de 96,54 M$ sur le produit industriel. Les secteurs où les effets directs, indirects et induits sont les plus importants comprennent : les ménages avec un revenu de plus de 60 000 $ et entre 50 000 $ et 59 000 $, la transformation animale, l'élevage bovin, les finances et l'immobilier.

Enfin, le scénario 8 sert à évaluer l'impact d'une conversion de 0,1 % des terres agricoles de l'Ouest canadien actuellement en culture en brise-vent. Ce scénario réduirait l'émission des gaz à effet de serre d'un facteur de 0,03 % ou de 0,29 %, selon les spécifications des colonnes D ou E, respectivement. Bien que modestement bénéfiques sur l'environnement, les impacts économiques conduisent à une diminution du produit industriel direct, indirect et induit de l'ordre de 64,39 M$.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une application du cadre d'analyse d'entrée-sortie canadien au problème complexe de réduction des gaz à effet de serre. Nous avons vu qu'il est possible de mesurer les impacts macroéconomiques sur le produit industriel tout en tenant compte de l'effet des relations interindustrielles dans l'économie.

Les impacts industriels de huit scénarios, qui sont autant de moyens envisagés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, ont été décrits. Les estimations présentées ont fait l'objet d'une évaluation économique et certains scénarios se sont révélés avantageux aux plans économique et environnemental. C'est le cas de la combinaison de la gestion des lots de pâturages (scénario 5) et de l'amélioration de la qualité des fourrages (scénario 6). Pour les autres résultats présentés, le compromis difficile entre les résultats économiques et ceux associés à l'environnement est pleinement mis en évidence. Sauf pour les cas mentionnés ci-dessus, les moyens envisagés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre en agriculture sont associés à des baisses du produit industriel.

Parmi les scénarios étudiés, pris séparément ou ensemble, aucun ne pourrait satisfaire les exigences du protocole de Kyoto. Ce résultat fait ressortir le besoin de trouver des solutions novatrices permettant d'atténuer les gaz à effet de serre en agriculture. Il semblerait que des solutions additionnelles ne feraient qu'augmenter les coûts économiques de ces solutions. De toute évidence, si plusieurs de ces scénarios étaient adoptés, les coûts économiques en termes de produit industriel, de PNB et d'emplois pourraient être plus importants.

Les résultats obtenus avec le modèle d'entrée-sortie reposent sur un certain nombre d'hypothèses. En particulier, le modèle utilisé reflète la structure industrielle de 1991 et les coefficients qui le complètent ne suivent pas une évolution (ou même un ajustement) jusqu'en 2010. On peut anticiper

que les liens interindustriels de l'économie canadienne vont continuer à évoluer dans le temps. Ensuite, les scénarios ont été appliqués sans tenir compte de la variété des sols, des climats et des interactions complexes avec les systèmes naturels à travers le Canada. Supposer que ces variations ont peu d'importance est, dans une certaine mesure, réducteur. Le risque informationnel posé par ces deux suppositions pourrait mener à une surestimation ou à une sous-estimation des résultats obtenus au plan quantitatif. Finalement, le modèle demeure muet sur les incitatifs requis sur le terrain pour que les producteurs adoptent les gestions proposées dans les scénarios et qui absorberaient les coûts de complexité et de transactions pouvant résulter de ces mises en œuvre.

Références bibliographiques

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 1999a. *Medium Term Policy Baseline*. Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 1999b. *Canadian Economic and Emissions Model for Canada (CEEMA Version 1) : Report 1 Model Description*. Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 1999c. *Canadian Economic and Emissions Model for Canada (CEEMA Version 1) : Report 2 Model Description*. Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 1999d. *Results of the CRAM Analysis*. Ottawa, ON.

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 2000. *Analysis for Strategies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Canadian Agriculture : Technical Report to the Agriculture and Agri-Food Table*. Ottawa, ON : Agriculture et Agroalimentaire Canada.

CLOUTIER, L.M, et THOMASSIN, P.J. 1994. Closing the Canadian input-output model : Homogeneous vs non-homogenous household sector specifications. *Economic Systems Research* 6 : 397-414.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC). 2003. *Présentation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse : World Meteorological Organization.

JENKINS, B., KULSHRESHTHA, S.N., MACGREGOR, R.J., GILL, R., DAUNCEY, C., DESJARDINS, R.J., BOEHM, M.M., THOMASSIN, P.J., WEERSINK, A., PARTON, K., et CLEARY, J. 2000. *Analysis of Strategies for Reducing Green Gas Emissions from Canadian Agriculture*. Rapport technique présenté à Agriculture et Agroalimentaire Canada. Rapport préliminaire, Ottawa, ON.

MILLER, R.E., et BLAIR, P.D. 1985. *Input-Output Analysis : Foundations and Extensions*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

MIYAZAWA, K. 1976. *Input-Output Analysis and the Structure of Income Distribution*. New York : Springer-Verlag.

NEITZERT, F., OLSEN, K., et COLLAS, P. 1999. *Canada's Greenhouse Gas Inventory : 1997 Emissions and Removals with Trends*. Ottawa, ON : Environnement Canada.

STATISTIQUE CANADA. 1981. *User's Guide to Statistics Canada Structural Economics Models*. Ottawa, ON : Structural Analysis Division.

TAACC. 2000. *Options Report : Reducing Greenhouse Gas Emissions from Canadian Agriculture*. Ottawa, ON : Agriculture and Agrifood Climate Change Table et National Climate Change Secretariat. Disponible à : <www.nccp.ca/html/tables/pdf/options/agri-finalop_eng.pdf>.

THOMASSIN, P.J. 2002. Macroeconomic impacts of reducing greenhouse gas emissions from Canadian agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture* 17 : 149-157.

THOMASSIN, P.J., et BAKER, L. 2000. *Macroeconomic Analysis of Greenhouse Gas Alternatives to Satisfy the Kyoto Protocol : Technical Report*. Ottawa, ON : Agriculture and Agri-Food Canada, May.

CHAPITRE 16

UN RÉEXAMEN DE L'HYPOTHÈSE DE SCHUMPETER À PARTIR D'UNE APPROCHE D'ENTRÉE-SORTIE

Pierre Mohnen
Université de Maastricht
Université du Québec à Montréal
MERIT et CIRANO

Thijs ten Raa
Tilburg University

Résumé

Est-ce que la concurrence est favorable à la croissance ? La théorie néoclassique nous enseigne que la concurrence conduit à la meilleure allocation des ressources. Schumpeter défend la position que les rentes monopolistiques permettent aux entrepreneurs de financer de la recherche et, par ce biais, de faire avancer le progrès technologique. Nous réexaminons ce débat en utilisant l'analyse d'entrée-sortie. Nous mesurons la performance par la productivité totale des facteurs et nous prenons les rentes définies comme la différence entre les rémunérations observées des ressources et celles qui sous-tendent un équilibre concurrentiel comme mesure inverse de la concurrence. L'analyse est menée à partir des tableaux entrées-sorties du Canada de 1962 à 1991. Cette étude nous permet de soutenir l'hypothèse de Schumpeter.

1. Introduction

Est-ce que la concurrence est favorable à la croissance ? Les économistes néoclassiques soutiennent que oui en argumentant que la concurrence élimine l'inefficience. Non, disent les économistes schumpétériens en faisant valoir que les rentes de monopole encouragent les entrepreneurs à investir en recherche et développement (R-D). Les deux hypothèses font appel à des mécanismes différents. Les premiers raisonnent en termes d'efficience statique, les seconds parlent d'efficience dynamique. Pour trancher le débat, il faut se tourner vers l'évidence empirique. Les résultats de l'étude de Nickell (1996) supportent la thèse néoclassique en faveur de la concurrence, mais sans grand éclat. Aghion *et al.* (2001, 2002) et Boone (2001) proposent des modèles qui montrent que la relation entre la concurrence et l'innovation est non monotone. Griffith (2001) trouve que la concurrence sur le marché des biens améliore la performance des firmes qui ne sont pas sous le contrôle de leurs propres gestionnaires ou propriétaires. Voyons de plus près quels sont leurs arguments. Ensuite, nous exposerons notre approche.

Quand la concurrence est forte, les chances de gains provenant d'une innovation sont élevées, car l'innovateur va rafler l'entièreté du marché. En revanche, la marge de profit y est moindre. Aghion *et al.* (2001) combinent ces deux effets opposés dans un modèle de duopole, où les firmes se font une concurrence à la Bertrand (en prix). La concurrence peut être mesurée par l'élasticité de substitution entre les produits des duopoles. Une plus grande substituabilité entre les produits augmente les gains de l'innovateur parmi les firmes de même niveau (effet néoclassique), mais réduit les gains marginaux des firmes en avance technologique (effet schumpétérien). Une concurrence entre « égaux » va devenir une concurrence inégale avec un équilibre moins incitatif à l'innovation : les suiveurs font face à de faibles marges de profit, alors que les meneurs ne sont plus incités à accroître leur avance. L'effet non incitatif de la dissipation des rentes l'emporte sur l'effet incitatif d'échappement à la concurrence. La relation entre la concurrence et l'innovation est en forme de U renversé. Aghion *et al.* (2002) trouvent un appui empirique pour ce modèle en confrontant les données sur la concurrence avec celles sur les brevets. Boone (2001), quant à lui, avance un modèle de type Hotelling avec trois vendeurs et obtient une relation entre l'innovation et la concurrence sous forme de U. Il écrit par ailleurs qu'au fond tout peut arriver (« *basically anything can happen* »).

Aghion *et al.* (2001, 2002) et Griffith (2001), tout comme Schumpeter, jaugent le pouvoir de monopole sur le marché des produits. Pour notre part, nous allons mesurer les déviations de la concurrence par les marges de rémunération sur le produit marginal dont profitent les détenteurs des facteurs de production. Après tout, les économistes néoclassiques ne prétendent-ils pas que la concurrence rend les gestionnaires plus vigilants ? Et Schumpeter lui-même n'a-t-il pas soutenu que ce sont les profits des capitalistes qui permettent de financer la recherche ? Il se pourrait même que les résultats théoriques contradictoires puissent s'expliquer par des effets différents sur les marchés des facteurs de production.

Comment allons-nous opérationnaliser les concepts de concurrence et de performance ? La performance est assez facile à mesurer. Solow (1957) a montré que sur des marchés concurrentiels, le déplacement de la fonction des possibilités de production, qui en bout de ligne détermine le niveau de vie, se mesure par la croissance de la productivité totale des facteurs (PTF). Dans des économies moins concurrentielles, la croissance de la PTF reste une mesure pertinente, bien qu'elle capte alors le déplacement de la frontière des possibilités de production et les variations d'efficience (Nishimizu et Page, 1982). Nous mesurons donc la performance par la croissance de la PTF.

La concurrence est plus difficile à mesurer. En organisation industrielle, il existe plusieurs indices de concurrence, les plus populaires étant les indices de concentration. Nous ne les utilisons pas, car il est possible que même les industries composées de peu d'entreprises soient très concurrentielles. Dans la tradition de Lerner (1934), nous mesurons le pouvoir de marché par l'excès du prix au-dessus du coût moyen, c'est-à-dire par les rentes. Nickell (1996) mesure les rentes par la différence entre le taux de rendement sur le capital d'une entreprise et celui sur les bons du Trésor, mais il admet que sa mesure est assez fruste et qu'elle ne capte que les rentes sur le capital. Or, les économistes néoclassiques soutiennent fréquemment que la concurrence élimine aussi les rentes des travailleurs.

Dans la lignée de Nickell, nous prenons les rentes comme mesure négative de la concurrence. Elles sont définies comme étant la différence entre les rémunérations observées et celles qui correspondent à un équilibre concurrentiel. Ce dernier est obtenu en simulant une solution d'équilibre général.

Le reste de ce chapitre est structuré comme suit. La section 2 présente le modèle que nous utilisons pour déterminer les valeurs concurrentielles. Dans la section 3, nous définissons les rentes et les imputons au travail et au capital. Puis, dans la section 4, nous estimons la relation qui existe entre les rentes et la croissance de la productivité totale des facteurs. Une conclusion suit dans la section 5.

2. Le modèle de la productivité

L'approche standard pour mesurer la productivité totale des facteurs consiste à diviser un indice du montant de la production par un indice du montant des facteurs de production, en utilisant comme pondérations les prix des produits du côté de l'extrant et les rémunérations des facteurs du côté de l'intrant (Solow, 1957 ; Jorgenson et Griliches, 1967). Cette mesure indice de la PTF se justifie dans un monde parfaitement concurrentiel. Cependant, le monde que nous analysons ne correspond pas à un équilibre concurrentiel. Pour mesurer le négatif de la concurrence, nous avons besoin de mesurer la différence entre les rémunérations observées et celles qui correspondent à un équilibre concurrentiel. Nous avons besoin de simuler un tel équilibre correspondant aux quantités de produits et de facteurs observées.

Notre modèle a l'essence d'un modèle d'entrée-sortie, mais avec un nombre de biens différent du nombre de secteurs, comme dans un modèle d'analyse d'activités. Les industries transforment les facteurs et les intrants intermédiaires en productions de biens et de services qui s'acheminent vers la demande finale domestique et les exportations nettes. Les productivités marginales des facteurs sont les prix fictifs associés aux contraintes factorielles d'un programme de maximisation du bien-être. Si nous supposons que les producteurs utilisent des technologies à coefficients fixes et que les préférences des utilisateurs finaux des biens et services sont également de type Leontief, alors les prix fictifs associés à ces contraintes sont consistants avec une comptabilité de la croissance et captent les variations d'efficience propres aux modèles de frontières d'efficience (ten Raa et Mohnen, 2002).

Dans ce modèle, on maximise la demande finale domestique, en conservant la composition de cette demande en termes de biens et en respectant les contraintes de disponibilités matérielles, de dotations factorielles et de balance commerciale :

$\max_{s,c,g} \mathbf{e}^{\mathrm{T}}\mathbf{fc}$ sous les contraintes

$$\begin{aligned} (\mathbf{V}^{\mathrm{T}} - \mathbf{U})\mathbf{s} &\geq \mathbf{fc} + \mathbf{Jg} =: \mathbf{F} \\ \mathbf{Ks} &\leq \mathrm{M} \\ \mathbf{Ls} &\leq \mathrm{N} \\ -\boldsymbol{\pi}\mathbf{g} &\leq -\boldsymbol{\pi}\mathbf{g}^{\mathrm{T}} =: \mathrm{D} \\ \mathbf{s} &\geq 0 \end{aligned} \qquad (1)$$

où les variables endogènes (**s**,**c**,**g**) et les autres paramètres sont respectivement (avec dimensions des matrices entre parenthèses) :

- **s** vecteur d'activités (nombre d'industries)
- **c** niveau de la demande finale domestique (scalaire)
- **g** vecteur des exportations nettes (nombre de biens échangeables)
- **e** vecteur unité composé de uns
- T symbole de transposée
- **f** demande finale domestique (nombre de biens)
- **V** tableau des productions (nombre d'industries par nombre de biens)
- **U** tableau des utilisations (nombre de biens par nombre d'industries)
- **J** matrice 0-1 de sélection des biens échangeables (nombre de biens par nombre de biens échangeables)
- **F** demande finale potentielle (nombre de biens)
- **K** matrice de stocks de capital (nombre de types de capital par nombre d'industries)
- **M** dotations en capital (nombre de types de capital)
- **L** vecteur ligne d'emploi sectoriel (nombre d'industries)
- **N** force de travail (scalaire)
- $\boldsymbol{\pi}$ vecteur ligne des prix relatifs des biens aux É.-U. (nombre de biens échangeables)

$\mathbf{g}^t$ vecteur des exportations nettes observées au temps t (nombre de biens échangeables)

$\mathbf{D}$ déficit commercial observé (scalaire)

Nous dénotons les prix fictifs associés aux contraintes du programme (1) par $\mathbf{p}$ (prix des biens, nombre de biens en vecteur ligne), $\mathbf{r}$ (productivités marginales du capital, nombre de types de capital en vecteur ligne), $\mathbf{w}$ (productivité du travail, scalaire), ϵ (parité de pouvoir d'achat, scalaire), et σ (vecteur ligne d'écarts, nombre d'industries). Les contraintes duales s'écrivent :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(\mathbf{V}^{\mathrm{T}} - \mathbf{U}) &= \mathbf{r}\mathbf{K} + \mathbf{w}\mathbf{L} - \boldsymbol{\sigma} \\ \mathbf{p}\mathbf{f} &= \mathbf{e}^{\mathrm{T}}\mathbf{f} \\ \mathbf{p}\mathbf{J} &= \boldsymbol{\epsilon}\boldsymbol{\pi} \end{aligned} \tag{2}$$

D'après la première contrainte duale, la valeur ajoutée évaluée aux prix fictifs est égale aux coûts des facteurs évalués eux aussi aux prix fictifs pour les industries actives (où l'écart est nul d'après la théorie de la programmation linéaire). La deuxième égalité dans (2) est une contrainte de normalisation : la moyenne pondérée des prix fictifs des biens est égale à 1. La troisième contrainte duale indique que les prix domestiques canadiens des biens échangeables sont égaux aux prix en vigueur aux États-Unis, compte tenu de la parité de pouvoir d'achat.

Les productivités du capital et du travail sont données par les prix fictifs $\mathbf{r}$ et $\mathbf{w}$ (de même $\boldsymbol{\epsilon}$ est la productivité marginale du déficit commercial). Au total, à la frontière, la croissance de la productivité est définie comme

$$\mathbf{FP} = (\dot{\mathbf{r}}\,\mathrm{M} + \dot{\mathbf{w}}\,\mathrm{N} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}\,\mathrm{D}) / (\mathbf{r}\mathrm{M} + \mathbf{w}\mathrm{N} + \boldsymbol{\epsilon}\mathrm{D}) - \dot{\mathbf{p}}\,\mathbf{f} / (\mathbf{p}\mathbf{f}) \tag{3}$$

et est égale au résidu de Solow,

$$\mathbf{SR} = [\mathbf{p}\,\dot{\mathbf{F}} - \mathbf{r}(\mathbf{K}\mathbf{s})^{\bullet} - \mathbf{w}(\mathbf{L}\mathbf{s})^{\bullet}] / (\mathbf{r}\mathrm{M} + \mathbf{w}\mathrm{N} + \boldsymbol{\epsilon}\mathrm{D}) \tag{4}$$

et a un effet dû aux termes de l'échange,

$$\mathbf{TT} = \boldsymbol{\epsilon}\,\dot{\boldsymbol{\pi}}\,\mathbf{g} / (\mathbf{r}\mathrm{M} + \mathbf{w}\mathrm{N} + \boldsymbol{\epsilon}\mathrm{D}) \tag{5}$$

comme le montrent ten Raa et Mohnen (2002). Le résidu de Solow est lui-même une agrégation de Domar des résidus de Solow pour chaque industrie,

$$\mathbf{SR}_i = [\mathbf{p}(\mathbf{V}^{\mathrm{T}} - \mathbf{U})^{\bullet}{}_{\cdot i} - \mathbf{r}\,\dot{\mathrm{K}}_{\cdot i} - \mathbf{w}\,\dot{\mathrm{L}}_{\cdot i}] / \mathbf{p}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}{}_{\cdot i} \tag{6}$$

où les pondérations sont

$$\mathbf{p}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}{}_{\cdot i}\,\mathbf{s}_i / (\mathbf{p}\mathbf{F}_i). \tag{7}$$

3. Les rentes

Au sens large, on entend par rentes les paiements effectués pour rémunérer un facteur de production. Ainsi, une entreprise de location d'espaces de bureau perçoit des rentes de location. Ces rentes incluent les coûts d'opportunité ainsi que les marges de profit provenant d'une position de monopole.

Dans un sens plus strict, les rentes se limitent aux rentes de monopole et n'incluent donc que les paiements au-dessus du coût d'opportunité. C'est cette dernière définition que nous allons utiliser.

La première contrainte duale (2) correspond à l'égalisation entre la valeur ajoutée et les coûts des facteurs en concurrence parfaite. La contrepartie de cette égalité pour les prix observés des biens, du capital et du travail, respectivement $\mathbf{p}^\circ$, $\mathbf{r}^\circ$, et $\mathbf{w}^\circ$ est :

$$\mathbf{p}^\circ(\boldsymbol{V}^{\mathbf{T}} - \mathbf{U}) = \mathbf{r}^\circ\mathbf{K} + \mathbf{w}^\circ\mathbf{L} + \boldsymbol{\sigma}^\circ \tag{8}$$

Ici $\boldsymbol{\sigma}^\circ$ est défini de façon résiduelle et représente les profits.

La rente sectorielle est définie comme la différence entre la valeur ajoutée observée, le vecteur ligne $\mathbf{p}^\circ(\mathbf{V}^{\mathbf{T}} - \mathbf{U})$, et la valeur ajoutée en concurrence parfaite, c'est-à-dire issue de la résolution du programme linéaire, le vecteur ligne $\mathbf{p}(\mathbf{V}^{\mathbf{T}} - \mathbf{U})$. Les rentes sectorielles peuvent être assignées aux facteurs de production. En utilisant (2) et (8), nous obtenons comme expression alternative de la rente sectorielle :

$$\textit{Rente} = (\mathbf{r}^\circ - \mathbf{r})\mathbf{K} + (\mathbf{w}^\circ - \mathbf{w})\mathbf{L} + (\boldsymbol{\sigma}^\circ + \sigma) \tag{9}$$

Celle-ci est composée des rentes du capital et du travail et des profits excédentaires. Selon la pratique courante, nous allons combiner les rentes du capital et les profits excédentaires et définir la rente du capital comme $\mathbf{K}_{rente} = (\mathbf{r}^\circ - \mathbf{r})\mathbf{K} + (\boldsymbol{\sigma}^\circ + \boldsymbol{\sigma})$. La rente qui revient au travail est $\mathbf{L}_{rente} = (\mathbf{w}^\circ - \mathbf{w})\mathbf{L}$. Par conséquent,

$$\textit{Rente} = \mathbf{K}_{rente} + \mathbf{L}_{rente} \tag{10}$$

Notons que chaque terme dans (10) est un vecteur ligne de rentes sectorielles. La consolidation des profits excédentaires et des rentes du capital se justifie quand les profits reviennent, comme c'est le cas dans le système capitaliste, aux détenteurs des biens de capitaux et non aux travailleurs. Les rentes représentent alors les paiements excédant les prix concurrentiels de telle sorte qu'elles constituent une mesure négative de la concurrence. Cela s'inscrit dans la logique de Nickell (1996), qui mesure les rentes du capital en supposant que $\mathbf{r}$ = rendement sur les bons du Trésor et que $\boldsymbol{\sigma} = 0$, et qui ignore les rentes du travail. Nous obtenons les prix concurrentiels, y compris $\mathbf{w}$ et $\boldsymbol{\sigma}$, en résolvant l'équilibre concurrentiel qui sous-tend le programme linéaire.

4. Concurrence et productivité

Le programme linéaire (1) est appliqué aux données de l'économie canadienne de 1962 à 1991. Nous utilisons les tableaux entrées-sorties de Statistique Canada à prix constants. Tous les tableaux ont été convertis aux prix de 1986. Les données sur les types de stocks de capital, les heures travaillées et les rémunérations du travail proviennent de la banque de données KLEMS (Johnson, 1994). Nous distinguons trois types de stock de capital : les bâtiments, l'équipement et l'infrastructure. Chaque type de capital de même que le travail sont supposés être parfaitement mobiles entre les différents secteurs de l'économie. Les prix des biens échangeables aux États-Unis proviennent

TABLEAU 16.1
Rentes du capital et croissances de la productivité totale des facteurs (PTF) par industrie

Industrie	Rentes du capital (en % de la VA observée)	Croissance de la PTF (en %)	Industrie	Rentes du capital (en % de la VA observée)	Croissance de la PTF (en %)
Toutes	3,05	–0,45	Mat. transport	3,25	0,34
Agriculture	25,61	7,71	Électrique	2,62	1,81
Pêche	1,11	–0,98	Non métallique	2,00	1,98
Forêts	2,10	3,19	Produits pétrole	3,58	–2,84
Mines	1,35	–0,56	Chimique	3,61	–0,64
Pétrole	0,53	–3,35	Autres manuf.	2,02	0,62
Carrières	0,26	–0,02	Construction	3,44	0,93
Serv. miniers	0,22	0,02	Transport	7,13	1,40
Aliments	5,92	0,16	Pipelines	0,29	–8,91
Boissons	1,72	0,51	Entreposage	0,43	–1,41
Tabac	0,31	0,58	Communications	5,47	–1,71
Caoutchouc	0,69	–0,03	Autres serv. publ.	–16,15	0,58
Plastique	0,92	–0,98	Comm. de gros	14,35	0,01
Cuir	0,82	5,82	Comm. de détail	1,15	1,33
Textiles	2,11	2,57	Ind. financières	15,35	–2,60
Habillement	3,77	3,31	Assurances	1,28	–0,17
Bois	2,23	2,17	Serv./entreprises	11,35	–9,76
Meubles	1,22	1,92	Serv./enseignem.	0,30	–1,38
Papier	3,10	–1,77	Soins de santé	–0,49	–1,27
Imprimerie	0,52	0,15	Restauration	1,25	–0,45
Métaux	3,61	–0,11	Loisirs	1,63	–0,62
Fabric. métal.	2,11	0,99	Serv. personnels	4,28	–8,52
Machinerie	3,31	0,74	Autres services	5,53	–11,02

Notes : Les secteurs 39, 40, 48-50 ne sont pas inclus, car ce sont des secteurs fictifs. D'ailleurs, pour ces secteurs, nous n'avons pas de données sur le capital, ni sur le travail. Pour les intitulés exacts des industries, voir Statistique Canada (1987).

du Bureau of Labor Statistics, Office of Employment Projection, des États-Unis. Pour convertir les prix américains en dollars canadiens, nous avons utilisé autant que possible les rapports de valeurs unitaires, qui sont spécifiques à chaque industrie, sinon les parités de pouvoir d'achat, qui sont calculées par catégories de la demande finale. Onze des 94 biens sont considérés comme non échangeables puisque nous n'observons ni importation ni exportation pour ces biens. Pour de plus amples informations sur les sources de données, les constructions et les hypothèses faites, voir ten Raa et Mohnen (2002).

À partir des prix fictifs issus de (2), nous calculons pour chaque industrie et chaque année la croissance annuelle de la PTF et les rentes du capital. Le tableau 16.1 résume les moyennes calculées de ces deux mesures pour chaque industrie. Pour tester l'effet schumpétérien de la concurrence sur la croissance de la productivité, nous avons régressé la croissance de la productivité sur les rentes du capital

$$SR_{it} = \alpha + \beta K_{rente_{it}} + \varepsilon_{it} \qquad (11)$$

où ε_{it} est un terme d'erreur de distribution gaussienne normale de moyenne nulle et homoscédastique. Un effet positif de la concurrence sur la productivité devrait se refléter par un signe négatif du β. À partir des données panel de 45 industries canadiennes sur 29 années, sans tenir compte d'indicateurs sectoriels, nous obtenons par la méthode des moindres carrés ordinaires $\beta = 0{,}0005$ avec une statistique student $t = 1{,}54$. Le signe du coefficient confirme l'intuition de Schumpeter, mais l'estimation n'est pas significativement différente de zéro.

Quand on empile les données, il est naturel de tenir compte d'effets temporels et sectoriels. Les variables dichotomiques temporelles sont censées « corriger » pour les effets cycliques. Mais, en fait, notre mesure de la croissance de la productivité (3) dissocie déjà les déplacements de la frontière productive des changements d'efficience (voir ten Raa et Mohnen, 2002). Le résidu de Solow ne capte que le déplacement de la frontière de production. Il n'est donc pas nécessaire d'introduire des effets temporels. Toutefois, il est possible qu'il y ait des spécificités sectorielles aux taux de croissance de la productivité. En réestimant (11) avec des indicateurs sectoriels, c'est-à-dire en rendant l'effet fixe, α, propre à chaque industrie, α_i, nous obtenons

$$\beta = 0{,}0008 \ (t = 1{,}83) \tag{12}$$

Les rentes sur le capital ont le signe prédit par Schumpeter et sont significativement différentes de zéro à un niveau de significativité de 7 %. Si nous contrôlons en plus pour les rentes du travail, le coefficient des rentes du capital reste inchangé, mais la statistique de student t tombe à 1,38. Le coefficient des rentes du travail, quant à lui, n'est pas significatif.

La plupart des études empiriques attribuent à la R-D un effet positif sur la productivité. Si l'hypothèse de Schumpeter, selon laquelle les rentes capitalistiques encouragent la recherche, tient, il faudrait trouver un effet positif des rentes capitalistiques sur la R-D. Nous aurions alors une confirmation de notre résultat précédent avec en plus une explication plus structurelle de cette relation. Nous avons donc régressé la R-D sur les rentes du capital et du travail en y incluant des variables dichotomiques sectorielles pour capter les opportunités technologiques ou les politiques ciblées à la recherche, qui font que l'on observe davantage de R-D dans certains secteurs (voir Cohen et Levin, 1989).

L'estimation par les moindres carrés ordinaires sur données empilées avec indicateurs sectoriels et un délai d'une période dans les séries chronologiques sur les rentes, pour éviter un biais de simultanéité, donne les résultats suivants :

$$\beta_K = 0{,}45 \ (t = 2{,}03), \ \beta_L = -0{,}45 \ (t = -1{,}83) \tag{13}$$

Nos résultats confirment que, comme l'avait postulé Schumpeter, les rentes sur le capital poussent à plus de R-D. En revanche, les rentes sur le travail sont associées à moins de R-D.

5. Conclusion

Nous avons réexaminé par le truchement des données canadiennes des tableaux entrées-sorties l'hypothèse schumpétérienne selon laquelle la concurrence est défavorable à l'innovation et donc à la productivité. Pour cela, nous avons dans un premier temps déterminé l'allocation optimale des ressources qui correspondrait à un équilibre concurrentiel, en procédant à une analyse d'activités qui maximise le bien-être (la demande finale domestique) sous des contraintes de disponibilité des ressources. Dans un tel équilibre, les prix fictifs du travail et du capital mesurent, d'une part, leurs productivités marginales et, d'autre part, leurs rémunérations en concurrence parfaite. La croissance de la productivité est alors mesurée par les résidus de Solow calculés à partir des prix fictifs du programme d'allocation optimale et les rentes sont définies comme la différence entre les prix observés et les prix de concurrence parfaite.

Nous trouvons que les rentes sur le capital contribuent positivement à la R-D de même qu'à la croissance de la productivité, contrairement aux rentes sur le travail. Autrement dit, les imperfections de marché ne nuisent pas à la productivité pour autant que les rentes incombent au capital. Comme celui-ci est majoritairement aux mains d'individus mieux nantis, se pose alors un problème de distribution de la richesse. La coexistence pacifique de l'efficience et de la distribution équitable du revenu ne tient plus dans une perspective de long terme.

Références bibliographiques

AGHION, P., HARRIS, C., HOWITT, P., et VICKERS, J. 2001. Competition, imitation and growth with step-by-step innovation. *Review of Economic Studies* 68 : 467-492.

AGHION, P., BLOOM, N., BLUNDELL, R., GRIFFITH, R., et HOWITT, P. 2002. *Competition and Innovation : An Inverted U Relationship*. 11th WZB Conference on Industrial Organization.

BLUNDELL, R., GRIFFITH, R., et VAN REENEN, J. 1999. Market share, market value and innovation in a panel of British manufacturing firms. *Review of Economic Studies* 66 : 529-554.

BOONE, J. 2001. Intensity of competition and the incentive to innovate. *International Journal of Industrial Organization* 19 : 705-726.

COHEN, W.M., et LEVIN, R.C. 1989. Empirical studies of innovation and market structure. Dans *Handbook of Industrial Organization*, Vol. II. Schmalensee, R., Willig, R.D. (dir.). Amsterdam, NL : Elsevier Science Publishers.

GRIFFITH, R. 2001. *Product Market Competition, Efficiency and Agency Costs : An Empirical Analysis*. The Institute for Fiscal Studies, WP01/1.

JOHNSON, J. 1994. *Une base de données KLEMS décrivant la structure des entrées de l'industrie canadienne*. Statistique Canada, Division des entrées-sorties, cahier technique p. 73F.

JORGENSON, D., et GRILICHES, Z. 1967. The explanation of productivity change. *Review of Economic Studies* 34 : 308-350.

LERNER, A. 1934. The concept of monopoly and the measurement of monopoly power. *Review of Economic Studies* 1 : 157-175.

NICKELL, S. 1996. Competition and corporate performance. *Journal of Political Economy* 104 : 724-746.

NISHIMIZU, M., et PAGE, J.M. Jr. 1982. Total factor productivity growth, technological progress and technical efficiency change : Dimensions of productivity change in Yugoslavia, 1965-1978. *Economic Journal* 92 : 920-936.

SOLOW, R. 1957. Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics* 39 : 312-320.

STATISTIQUE CANADA. 1987. *La structure par entrées-sorties de l'économie canadienne*, Cat. Nº 15-510 – hors série, Ottawa, ON : Ministère des Approvisionnements et Services Canada.

TEN RAA, Th., et MOHNEN, P. 2002. Neoclassical growth accounting and frontier analysis : A synthesis. *Journal of Productivity Analysis* 18 : 111-128.

NOTICES BIOGRAPHIQUES

David BAHAN détient une maîtrise en sciences économiques de l'Université de Montréal. En 2000, il se joint à l'Institut de la statistique du Québec où il participe au développement du modèle d'équilibre général du ministère des Finances du Québec. Depuis 2002, il est économiste au ministère des Finances du Québec où il coordonne les travaux de développement du modèle d'équilibre général de cet organisme.

Christoph BÖHRINGER est le directeur du Département de l'économie de l'environnement et des ressources, et du management environnemental du Centre européen de recherche économique (ZEW) à Mannheim, Allemagne. Il détient un doctorat de l'Université de Stuttgart. Au cours des dernières années, ses recherches ont porté sur des analyses appliquées en environnement et les politiques énergétiques au moyen de modèles d'équilibre général calculables. Il a publié de nombreux travaux dans des revues internationales notamment *Canadian Journal of Economics, European Journal of Political Economy, Journal of Policy Modeling, Oxford Review of Economic Policy, The Energy Journal, Applied Economics, Energy Economics* et le *Journal of Environmental Economics and Management.*

L. Martin CLOUTIER est professeur agrégé au Département de management et technologie, École des sciences de la gestion, Université du Québec à Montréal depuis 2000. Il détient un doctorat de l'University of Illinois at Urbana-Champaign. Précédemment, il avait obtenu un B.Sc. et une M.Sc. de l'Université McGill, où il a complété un mémoire sur les politiques agricoles avec endogénéisation des ménages dans l'analyse d'entrée-sortie, alors primé meilleur mémoire au Canada par la Société canadienne d'agro-économie. Le professeur Cloutier dirige la maîtrise en informatique de gestion et coordonne le programme de MBA pour cadres spécialisé en gestion des bio-industries. Il a publié ses travaux dans des revues internationales en management et en économique, portant sur une modélisation systémique des flux d'information dans la prise de décision, en gestion de la propriété intellectuelle en biotechnologie et en environnement.

Catherine Coleman est analyste politique de la conservation de l'eau au Service de la conservation à Environnement Canada. Elle a reçu un baccalauréat en sciences de l'environnement de l'Université de Waterloo et a obtenu une maîtrise dans ce domaine de l'Université de Western Ontario. Le thème de ses recherches a porté sur le cadre de convention des Nations Unis sur le changement climatique et le processus décisionnel du gouvernement du Canada qui a mené à la signature et à la ratification du protocole de Kyoto.

Klaus Conrad est professeur d'économique à l'Université de Mannheim depuis 1980. Il a obtenu un doctorat de l'Université de Tübingen et a par la suite poursuivi des études au Center for International Affairs à Harvard University. Il a reçu des bourses de recherche de la Fondation allemande des sciences et fut président de la European Association of Environmental and Resource Economics, 2002-2003. En carrière, il a publié plus de 100 articles dans des revues et livres internationaux. Ses intérêts de recherche portent sur les modèles d'équilibre général calculables appliqués à l'économie des ressources et de l'environnement.

Christian DeBresson est professeur au Département de management et technologie, École des sciences de la gestion, Université du Québec à Montréal depuis 1990. Il fut l'organisateur local de la XIVe Conférence internationale des techniques d'analyse d'entrée-sortie à Montréal en 2002. Travaillant à l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) à Paris au début des années 1970 sur les politiques et les indicateurs d'innovation, il décide de faire sa thèse de doctorat simultanément sous la direction d'Henri Aujac et de compiler des « matrices d'innovation ». Ses techniques d'adaptation de l'analyse d'entrée-sortie à l'innovation reçurent l'approbation de Wassily Leontief, furent présentées en 1993 à Séville à la Xe Conférence internationale et se retrouvent toutes consignées dans *Economic Interdependence and Innovative Activity : An Input-Output Analysis*, Edward Elgar, 1996. En 2003, il fut élu par les membres de l'International Input-Output Association membre de son conseil international.

Bernard Decaluwé est professeur titulaire au Département d'économique à l'Université Laval depuis 1977. Il a obtenu son titre de docteur en sciences économiques de l'Université catholique de Louvain en 1975. En 1998 il recevait, avec son collègue André Martens, le prix francophone de la recherche, Prix Mohammed El Fasi, pour la mise au point et la diffusion d'instruments d'analyse quantitative du développement. Il a récemment publié, avec André Martens et Luc Savard, un important ouvrage sur *La politique économique du développement et des modèles d'équilibre général calculables*. Outre ses nombreuses publications scientifiques, il a piloté de multiples projets d'assistance technique et de coopération internationale dans différents pays d'Afrique et d'Asie.

Erik DIETZENBACHER est professeur agrégé d'économie internationale et d'administration à la Faculty of Economics, University of Groningen, Pays-Bas. Ses intérêts de recherche portent sur l'analyse d'entrée-sortie appliquée à de multiples sous-disciplines. Il est le directeur général de la revue *Economic Systems Research*, publiée par l'International Input-Output Association, et est membre des conseils éditoriaux des revues *Journal of Regional Science* et *Revista de Estudios de Economía Aplicada*. Il fut responsable de la programmation scientifique des conférences de l'International Input-Outpout Association de New York (1998) et de Montréal (2002). Il a codirigé les ouvrages *Input-Output Analysis* (1998, avec H.D. Kurz et C. Lager), *Input-Output Analysis : Frontiers and Extensions* (2001, avec M.L. Lahr), et *Wassily Leontief and Input-Output Economics* (2004, avec M.L. Lahr).

Faye DUCHIN est professeure d'économie à la Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York. Elle a, depuis de nombreuses années, analysé des scénarios d'avenir au moyen de modèles mathématiques et de bases de données très détaillées d'économies de pays et du monde. Avec un réseau de chercheurs interdisciplinaires, ses travaux actuels portent sur les moyens d'atteindre un développement durable ; et cherche à engager non seulement les décideurs politiques, mais également la société civile. Plus spécifiquement, elle élabore un cadre pour l'étude de scénarios se rapportant au mode de vie dont le but est de mesurer les impacts avec des matrices de comptabilité sociale. Elle a également développé un modèle du monde afin d'étudier les répercussions de scénarios sur les changements dans les moyens de production, ainsi que les décisions relatives à la fertilité et à la consommation des ménages. Elle est actuellement la présidente de l'International Input-Output Association.

Daniel FLOREA possède une licence en mathématiques et une licence en économie, obtenues à Bucarest, ainsi qu'un MBA en finances de l'École des Hautes Études commerciales de Montréal. Après avoir débuté sa carrière en enseignement des mathématiques, il a travaillé pour le ministère des Affaires étrangères et du Commerce extérieur de la Roumanie. En septembre 2001, il s'est joint à l'équipe du ministère des Finances du Québec, où il a contribué à la réalisation de plusieurs projets reliés au modèle d'équilibre général du ministère des Finances du Québec.

Pierre A. GÉNÉREUX travaille à Statistique Canada.

Dale W. JORGENSON, professeur universitaire Samuel W. Morris en sciences économiques à Harvard University depuis 1969, où il avait reçu son doctorat, et est directeur du Program on Technology and Economic Policy au John F. Kennedy School of Government. Jorgenson a été honoré en devenant un membre élu de l'American Philosophical Society, de la Royal Swedish Academy of Sciences, de la U.S. National Academy of Sciences et de l'American Academy of Arts and Sciences. Il fut élu membre de l'American Association for the Advancement of Science, de l'American Statistical Association et de l'Econometric Society. Il a mené des travaux de recherche novateurs sur les

technologies de l'information et la croissance économique, l'énergie et l'environnement, les politiques fiscales et le comportement d'investissement et en économétrie appliquée. Il est l'auteur de plus de 232 articles en économique et le directeur de 24 ouvrages collectifs.

Lawrence R. Klein est le professeur émérite Benjamin Franklin en sciences économiques à l'University of Pennsylvania. Il a joint les rangs du corps professoral du Département d'économie en 1958 après avoir complété un doctorat au Massachusettes Institute of Technology environ une décennie plus tôt. Entre-temps il enseigna à de nombreuses institutions incluant l'University of Chicago, l'University of Michigan et Oxford University. Il a contribué, en 1947, à l'élaboration des premiers modèles économétriques pour le compte du gouvernement du Canada. Dès son arrivée à l'University of Pennsylvania, il débute l'élaboration des dits *Wharton Models* toujours en développement. En 1980, il fut le lauréat du prix Alfred Nobel en sciences économiques pour ses travaux sur la stagflation.

Yasushi Kondo est professeur agrégé à la l'Université de Waseda depuis 2002. Depuis 1999, il avait occupé des postes de professeurs à l'Université Toyama. Il détient un doctorat en économique de l'Université de Tsukuba et avait obtenu un baccalauréat et une maîtrise en économique de l'Unversité de Waseda. On retrouve ses publications dans *Journal of Industrial Ecology, Journal of Material Cycles and Waste Management, Econometrics Journal* et *Japanese Economic Review.* Ses intérêts actuels de recherche portent sur les cycles de vie hybrides.

Brent Langen travaille à Statistique Canada.

André Lemelin est professeur-chercheur à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS Urbanisation, Culture et Société) à Montréal ; il participe au Groupe interuniversitaire de Montréal *Villes et Développement*, désigné Centre d'excellence par l'Agence canadienne pour le développement international (ACDI). Après avoir obtenu un baccalauréat et une maîtrise en économique de l'Université Laval, il obtient un doctorat en économique de Harvard University. Ses recherches courantes portent sur le développement d'un modèle dynamique d'équilibre général calculable bi-régional Québec-reste du Canada pour le ministère des Finances du Québec, sur l'estimation des flux d'échanges interrégionaux au Québec et sur la mise au point d'une méthode d'estimation des PIB régionaux au Québec.

Gordon McBean est titulaire de la Chaire en politiques à l'Institut de la réduction des pertes catastrophiques et professeur de géographie et de sciences politiques à l'Université de Western Ontario, à London, Ontario. Le professeur McBean est actif sur les scènes nationale et internationale dans de nombreux forums portants sur les dimensions scientifiques du changement climatique et des activités de changement environnemental et climatique. Il était membre de la délégation canadienne à Kyoto. Il a été directeur du comité scientifique international pour le *World Climate Research Program* et responsable pour le

Canada du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour le Canada, dont il est le principal auteur pour les rapports de 1990 et de 1995. Il est le président du conseil d'administration de la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère et un auteur principal du *Arctic Climate Impact Assessment*. Le professeur McBean est un membre élu de la Société Royale du Canada, de l'American Meteorological Society, de la Société canadienne de météorologie et d'océanographie et un récipiendaire de la médaille Patterson pour sa contribution à l'étude de la météorologie au Canada.

Pierre Mohnen est professeur au Département d'économie et d'administration des affaires de l'Université de Maastricht et membre au MERIT (Maastricht Economic Research on Innovation and Technology). Il est également membre associé au CIRANO (Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations) et professeur associé au Département d'économie, École des sciences de la gestion, Université du Québec à Montréal. Il détient une licence et une maîtrise en économie de l'Université de Louvain et un doctorat en économie de l'Université de New York. Ses recherches portent principalement sur la productivité et l'innovation.

Jan Mutl est professeur adjoint à l'Université Johann Wolfgang Goethe à Francfort, Allemagne. Il a obtenu un doctorat en économique de University of Maryland et préalablement une maîtrise en transition économique de l'Université Européenne Centrale, Budapest, Hongrie, et un baccalauréat en mathématiques de l'Université Masaryk, Brno, République Tchèque. Il a été membre-chercheur du Center for Sustainable Economy, Washington, D.C., où il a mené des travaux de recherche d'envergure sur l'impact des taxes de carbone sur l'économie américaine avec les techniques d'analyse d'entrée-sortie. Ses intérêts de recherche incluent le développement de méthodes nouvelles en économétrie pour application au système financier international.

Shinichiro Nakamura est professeur d'économique à l'Université de Waseda depuis 1992. Il a obtenu un baccalauréat et une maîtrise en économique de l'Université Keio, Tokyo, et un doctorat de l'Université de Bonn, Allemagne. Ses publications principales ont paru dans *Journal of Industrial Ecology, Japanese Economic Review, Journal of Applied Econometrics* et *Review of Economics and Statistics*. Ses intérêts actuels de recherche portent sur la gestion des déchets et sur les principes de la thermodynamique appliqués à l'économie de la gestion des déchets. Il fut professeur invité à l'Université de Toronto. L'adresse de sa page Internet est : <www.f.waseda.jp/nakashin/>.

Kazuhiko Nishimura est professeur agrégé à la Faculté d'économique, Université Nihon Fukushi. Il a reçu un baccalauréat en génie chimique, une maîtrise en génie industriel et un doctorat en génie social, tous de l'Institut technologique de Tokyo. Il est l'auteur de nombreux articles portant sur les flux matériels, les cycles de produits, le design de recyclage, les permis d'émissions, le transfert technologique au moyen de modèles d'équilibre général, d'entrée-sortie, d'optimisations numériques et d'expériences en laboratoires.

Ses intérêts de recherche actuels portent sur la coordination des décisions locales avec les objectifs globaux de gestion environnementale au moyen de méthodes statiques et dynamiques sur des thèmes tels le recyclage, les permis d'émissions, la gestion des risques, le transfert technologique et les systèmes énergétiques en Asie du nord-est.

Véronique Robichaud est gestionnaire du programme Économie, environnement et commerce à la Commission de coopération environnementale de l'Amérique du Nord. Elle a complété un baccalauréat et une maîtrise en économique à l'Université Laval. Elle a poursuivi ensuite ses travaux de recherche en tant qu'économiste au Centre de recherche en économie et finance appliquées (CRÉFA) de l'Université Laval, lesquels ont essentiellement porté sur les matrices de comptabilité sociale et les modèles d'équilibre calculables, notamment pour des groupes de pays liés par des accords commerciaux et des régions. Elle a développé son expertise en matière d'évaluation des impacts économiques de l'application de mesures environnementales et participe maintenant à divers travaux liés entre autres à l'énergie renouvelable et l'efficacité énergétique.

Frederic M. Scherer est professeur émérite Aetna à la John F. Kennedy School of Government, Harvard University. Outre une maîtrise obtenue auprès de l'University of Michigan, il est titulaire d'un MBA et d'un doctorat de Harvard University. Ses domaines de recherche sont l'économie industrielle et l'économie des changements technologiques, qui l'ont amené, entre autres, à publier des ouvrages tels que *Industrial Market Structure and Economic Performance* (troisième édition, avec D. Ross) ; *The Economics of Multi-Plant Operation : An International Comparisons Study* (avec trois co-auteurs) ; *International High-Technology Competition* ; *Competition Policies for an Integrated World Economy* ; *Mergers, Sell-offs, and Economic Efficiency* (avec D.J. Ravenscraft) ; *Innovation and Growth : Schumpeterian Perspectives* ; *The Weapons Acquisition Process* (en collaboration avec M.J. Peck) ; *Industry Structure, Strategy, and Public Policy* ; et *New Perspectives on Economic Growth and Technological Innovation*. À l'heure actuelle, ses travaux de recherche portent sur l'économie des œuvres musicales entre 1650 et 1900. L'adresse de sa page Internet est : <www.fmscherer.com>.

Thijs ten Raa est professeur d'économique à l'Université de Tilburg aux Pays Bas depuis 1986. Il détient un doctorat de l'Université de New York en sciences économiques. Ses intérêts de recherche portent sur les dimensions techniques et le design de modèles d'analyses d'entrée-sortie ; en particulier sur les dimensions structurelles et également régionales. Il a à son actif plus de 120 publications. Il fut lauréat de nombreux prix et bourses dont celles des fondations Fulbright et Sloan, et de l'OTAN. Il fut également titulaire d'une bourse de recherches pour professeurs du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada et de la National Science Fondation des États-Unis. Il est membre de nombreux conseils éditoriaux de revues scientifiques internationalement reconnues dont *Economic Systems Research* et *Journal of Regional Science*.

Paul J. THOMASSIN est professeur agrégé au Département d'agro-économie à l'Université McGill. Il détient un doctorat en agro-économie de l'University of Hawaii. Ses intérêts de recherche portent sur l'économie de l'environnement, notamment sur les impacts macroéconomiques des changements en politiques. Il a élaboré le modèle d'entrée-sortie utilisé par Agriculture et Agroalimentaire Canada. Il est actuellement le directeur scientifique du Réseau national de recherche sur les dimensions humaines de la gestion des gaz à effet de serre dans la biosphère au Canada. Il a été un professeur invité à la William S. Richardson, School of Law, University of Hawaii, membre visiteur au National Centre for Development Studies, Australian National University, et professeur honoraire à la Division of Science and Technology, University of Auckland (Nouvelle-Zélande).

Daniel J. WILSON est économiste-chercheur au Economic Research Department de la Federal Reserve Bank of San Francisco depuis 2001. Il a obtenu un doctorat en sciences économiques de l'University of Maryland. Ses intérêts de recherche portent sur le changement technologique et la productivité. Les résultats de ses travaux ont été publiés dans des revues internationales en économie dont *Journal of Monetary Economics*, *Review of Economic Dynamics* et *Economic Systems Research*.

TRADUCTEUR

Georges BASTIN est professeur au Département de linguistique et de traduction, Université de Montréal depuis 1998. Il a enseigné la traduction et l'interprétation à l'Université centrale du Venezuela pendant près de 20 ans. Il a reçu un doctorat de l'Université de Paris III en sciences de la traduction et de l'interprétation. Il enseigne, entre autres, la méthodologie de la traduction et les techniques de rédaction et de révision. Il est également formateur de l'Ordre des traducteurs, terminologues et interprètes agréés du Québec (OTTIAQ). Ses recherches portent actuellement sur l'histoire de la traduction en Amérique latine, la pédagogie de la traduction et la rédaction. Il est l'auteur de divers ouvrages et articles relatifs à la traduction.