

**Application d'un modèle de microsimulation avec agents  
partiellement rationnels :  
le report du fardeau des taxes sur la masse salariale**

Par Marcelin Joanis

Rapport de recherche

présenté à M. Jacques Robert  
et M. Léonard Dudley

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

Université de Montréal  
Département de Sciences économiques

Le 31 août 1999

Application d'un modèle de microsimulation  
avec agents partiellement rationnels :  
le report du fardeau des taxes sur la masse  
salariale

Marcelin Joanis  
Département de Sciences économiques  
Université de Montréal

Août 1999  
Tous droits réservés

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Taxes sur la masse salariale : une revue de la littérature</b>	<b>11</b>
2.1	Problématique . . . . .	11
2.1.1	La situation au Québec . . . . .	12
2.1.2	La situation ailleurs au Canada et dans le monde . . . . .	13
2.2	L'incidence des taxes sur la masse salariale . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Un modèle de microsimulation avec agents partiellement rationnels</b>	<b>18</b>
3.1	Une hypothèse : la rationalité partielle . . . . .	19
3.1.1	Définitions . . . . .	19
3.1.2	Pourquoi la rationalité partielle? . . . . .	20
3.2	Description du modèle . . . . .	22
3.2.1	Modélisation du comportement des firmes . . . . .	23
3.2.2	Modélisation du comportement des individus . . . . .	23
3.2.3	Modélisation du gouvernement . . . . .	24
3.2.4	Séquence des actions . . . . .	25
3.3	Les microsimulations et l'analyse des politiques publiques . . . . .	26
3.3.1	Définition et caractéristiques . . . . .	26
3.3.2	Applications . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Choix et validation de l'algorithme d'apprentissage</b>	<b>30</b>
4.1	Les algorithmes d'apprentissage . . . . .	30
4.1.1	Catégories d'algorithmes . . . . .	31
4.1.2	Représentation de la solution . . . . .	32
4.1.3	Le problème de la convergence . . . . .	33
4.2	Description d' <i>Ecosim 1</i> . . . . .	34

4.2.1	Modélisation du comportement des firmes . . . . .	35
4.2.1.1	Algorithme 1 . . . . .	35
4.2.1.2	Algorithme 2 . . . . .	37
4.2.2	Modélisation du comportement des individus . . . . .	40
4.2.3	Modélisation du gouvernement . . . . .	40
4.2.4	Séquence des actions . . . . .	40
4.2.5	Paramétrisation . . . . .	41
4.3	Tests de convergence . . . . .	42
4.3.1	Équilibre théorique . . . . .	43
4.3.2	Choix de l'algorithme d'apprentissage . . . . .	45
4.3.2.1	Performance de l'algorithme 1 . . . . .	45
4.3.2.2	Performance de l'algorithme 2 . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Facteurs influant sur le report du fardeau de la taxe</b>	<b>50</b>
5.1	Description d' <i>Ecosim 2</i> . . . . .	50
5.1.1	Algorithme d'apprentissage . . . . .	50
5.1.2	Paramétrisation . . . . .	52
5.1.3	Données agrégées . . . . .	52
5.1.4	Calcul du taux de report . . . . .	53
5.2	Résultats des simulations . . . . .	54
5.2.1	Scénario 1 : hausse du taux de la taxe . . . . .	54
5.2.1.1	Concurrence entre les firmes sur le marché du travail . . . . .	57
5.2.1.2	Niveau des prestations de sécurité sociale . . . . .	58
5.2.1.3	Mobilité des travailleurs entre les firmes . . . . .	60
5.2.2	Scénario 2 : baisse du taux de la taxe . . . . .	61
5.2.2.1	Concurrence entre les firmes sur le marché du travail . . . . .	62
5.2.2.2	Mobilité des travailleurs entre les firmes . . . . .	64
5.3	Recherches futures . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>69</b>

# Table des figures

4.1	Série temporelle générée par <i>Ecosim 1</i> avec l'algorithme 1 . . .	47
5.1	Scénario 1 : profits moyens de l'industrie . . . . .	55
5.2	Scénario 1 : salaire moyen de l'industrie . . . . .	56
5.3	Scénario 2 : profits moyens de l'industrie . . . . .	62
5.4	Scénario 2 : salaire moyen de l'industrie . . . . .	63
5.5	Scénario 2 : taux de report selon le nombre de firmes . . . . .	64
5.6	Scénario 2 : taux de report selon la mobilité des travailleurs . . . . .	66
5.7	Scénario 1 ( $\tau = 0,5$ ) : chômage . . . . .	67
5.8	Scénario 2 (1 firme) : budget du gouvernement . . . . .	68

# Avant-propos

Ce rapport de recherche a été rédigé en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences au Département de Sciences économiques de l'Université de Montréal. Il rapporte les résultats de recherches effectuées dans le cadre du projet GAMME (Gestion Automatisée de Multiples Marchés Électroniques), sous la direction du professeur Jacques Robert du Département de Sciences économiques de l'Université de Montréal et sous l'égide du Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations (CIRANO). Ce programme de recherche comporte deux grands volets : un volet économique et un volet informatique. Seul le volet économique est présenté dans ce rapport. Le volet informatique a été développé par Vincent Trussart, étudiant au Département d'Informatique et de Recherche opérationnelle de l'Université de Montréal. Ses travaux ont fait l'objet d'un mémoire de maîtrise en informatique intitulé *Ecosim : un environnement de simulation économique microanalytique adaptative*, déposé plus tôt en 1999 à la Faculté des études supérieures.

Je n'aurais pu me consacrer pleinement à ce programme de recherche des plus stimulants sans un financement adéquat. Il est venu principalement du programme de bourses de maîtrise en recherche du Fonds pour les Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR) du gouvernement du Québec. Je remercie également le CIRANO pour son soutien technique, logistique et financier au cours des trois dernières années. Je remercie enfin la Fondation Berthelet-Aubin et la Faculté des Études Supérieures de l'Université de Montréal de m'avoir permis de me consacrer à temps plein cet été à la rédaction de ce rapport.

Je prendrai maintenant quelques lignes pour remercier les personnes qui ont le plus grandement contribué à rendre possibles les travaux qui sont présentés ici. Tout d'abord, Vincent Trussart a gracieusement accepté de poursuivre le développement des modules *Ecosim* au-delà de ce qui était

nécessaire pour ses propres travaux. Sans ce travail effectué le soir et la fin de semaine par cet informaticien dévoué, il m'eût été impossible d'aller aussi loin dans l'exploration du merveilleux monde des microsimulations avec agents partiellement rationnels. Travailler en collaboration avec Vincent fut une expérience des plus enrichissantes.

Marie Connolly, étudiante en sciences économiques, et Natalie Guay, étudiante en informatique, toutes deux de l'Université de Montréal, ont ensuite pris la relève du développement d'*Ecosim*. Très professionnellement, elles ont accompli l'importante tâche d'implanter *Ecosim* dans l'environnement de simulation générique *SWARM*. Leurs travaux sur l'architecture informatique et le développement de l'algorithme d'apprentissage d'*Ecosim 2* ont été déterminants. Je les félicite pour leur sérieux au travail, leur complicité et leur enthousiasme contagieux. Avec Marie, Natalie et Vincent, j'ai réalisé que le travail d'équipe et l'interdisciplinarité sont des ingrédients essentiels d'une démarche scientifique stimulante.

Les derniers mais non les moindres, je tiens enfin à remercier les codirecteurs du projet GAMME, Jacques Robert et Robert Gérin-Lajoie (maintenant directeur informatique chez BCE Émergis), pour le support scientifique, technique et humain qu'ils m'ont offert tout au long de mon séjour au CIRANO. Je souhaite à tous mes collègues candidats à la maîtrise de connaître la latitude et l'encadrement dont Vincent et moi avons bénéficié sous leurs hospices. Directeur de recherche disponible et exigeant, Jacques Robert a su m'insuffler la passion des problèmes complexes et l'importance de la rigueur scientifique.

En terminant, je ne pourrais passer sous silence l'incalculable contribution des membres de l'atelier de recherche de maîtrise à l'hiver 1999, sous la direction du professeur Léonard Dudley. En espérant que le résultat final saura témoigner que leurs critiques et suggestions ont été considérées à leur juste valeur. Salutations pêle-mêle aux compagnons de l'université (Benoît F. Méthot et Alexandre Genest en tête de liste), à la joyeuse équipe du personnel du département (Carole, Lyne, Suzanne, Jocelyne), à ma famille et à mes amis (ceux qui sont ici-bas et celui qui est là-haut).

# Sommaire

Ce document rapporte les résultats d'un programme de recherche visant à développer un engin de microsimulation avec agents partiellement rationnels applicable à l'évaluation des politiques fiscales. Nous en présentons ici une application à la problématique des taxes générales sur la masse salariale payées par les employeurs. Deux modèles sont présentés. Inspiré du modèle de développement du projet américain *Aspen*, un premier modèle (*Ecosim 1*) est destiné à valider la technologie utilisée, tant au plan informatique qu'économique. Il se compose d'individus au comportement stochastique, d'un gouvernement exogène et d'une industrie oligopolistique où les firmes se concurrencent en prix à l'aide d'algorithmes d'apprentissage informatiques.

Ce premier modèle a servi à comparer la performance de deux algorithmes d'apprentissages et à choisir celui qui équiperait les firmes du second modèle : (i) un algorithme adaptatif avec *classifier system* (fortement inspiré d'*Aspen*) et (ii) un algorithme génétique sans système de classement (développé au CIRANO). La performance des deux algorithmes a été évaluée sur la base de leur capacité à optimiser correctement, c'est-à-dire à converger vers la solution optimale du modèle économique. Étant donné l'importance des interactions entre les firmes du modèle, ce sont les prévisions de l'équilibre stratégique (avec rationalité parfaite) qui sont comparées avec les résultats des simulations. Les tests de convergence mettent en lumière les limites de l'algorithme d'*Aspen*. Avec cet algorithme, le simulateur ne parvient pas optimiser le système de façon satisfaisante pour certaines valeurs des paramètres. Quant à l'algorithme génétique sans système de classement, il s'avère suffisamment puissant pour reproduire avec une faible marge d'erreur l'équilibre stratégique calculé théoriquement, et ce, dans toutes les conditions testées.

La performance du second algorithme aux tests de convergence nous a permis d'amener le modèle au niveau de complexité désiré. Une seconde version du simulateur, *Ecosim 2*, modélise la concurrence sur le marché du travail



dans le but d'aborder la problématique des taxes sur la masse salariale. Avec ce modèle plus complexe, nous cherchons à répondre à la question suivante : quels facteurs influent sur le taux de report vers les employés du fardeau des taxes générales sur la masse salariale payées par les employeurs ? Le thème des taxes sur la masse salariale a été traité dans la littérature empirique par un certain nombre d'auteurs. C'est l'article de Brittain (1971) qui a lancé le débat sur le sujet. Les entreprises parviennent-elles à reporter la totalité du fardeau de la taxe aux travailleurs par le biais de salaires plus faibles ? Brittain conclut que oui, ce qui va dans le sens de la théorie néoclassique. Plusieurs études effectuées par la suite présentent des résultats différents. Par ailleurs, les résultats économétriques obtenus varient beaucoup d'une étude à l'autre. Le maillon faible de cette littérature semble être la difficulté de modéliser la transition vers l'équilibre de long terme de manière satisfaisante.

Déjà utilisées dans le domaine de l'évaluation des politiques publiques, les microsimulations avec agents partiellement rationnels peuvent apporter un éclairage nouveau à cette question et, par conséquent, faciliter la prévision des effets de divers scénarios de réforme fiscale. Les microsimulations sont une technique d'analyse économique particulièrement bien adaptée à la modélisation de phénomènes dynamiques au sein de populations hétérogènes. En particulier, la modélisation explicite des processus d'apprentissage des agents augmente le temps de réponse du système aux chocs. Durant cette transition, au cours de laquelle ils apprennent à réagir le mieux possible à leur environnement économique, les agents peuvent être considérés comme partiellement rationnels.

Les résultats des simulations effectuées avec *Ecosim 2* nous permettent de formuler cinq propositions théoriques concernant l'impact de trois facteurs sur la capacité des firmes à reporter le fardeau des taxes sur la masse salariale : la concurrence entre les firmes sur le marché du travail, la mobilité des travailleurs et le niveau des prestations de sécurité sociale. En résumé, le modèle prévoit qu'une forte concurrence, une forte mobilité des travailleurs et des prestations de sécurité sociale élevées tendent à réduire le taux de report dans le cas d'une hausse de taxes. À l'inverse, dans le cas d'une baisse de taxes, le taux de report est négativement influencé par une faible concurrence et par une faible mobilité des travailleurs.

# Chapitre 1

## Introduction

Avec l'ouverture des frontières à la libre circulation de la main-d'œuvre, les travailleurs locaux font de plus en plus face à la concurrence de travailleurs étrangers. Or, la réglementation, les institutions et le traitement fiscal du marché du travail varient beaucoup d'un pays à l'autre. Il en résulte souvent de grandes différences de coûts de main-d'œuvre. Dans plusieurs pays, la taxation de la masse salariale est une composante de plus en plus importante des coûts de main-d'œuvre. Il est permis de croire que cette tendance affecte la compétitivité relative de ces économies, notamment en les rendant moins désirables aux yeux des investisseurs privés. La taxation de la masse salariale a-t-elle un impact important sur la profitabilité des entreprises et, par conséquent, est-elle susceptible de défavoriser un pays dans les décisions de localisation des entreprises ?

La théorie néoclassique se veut rassurante. L'égalité entre la productivité marginale et le coût du travail devant toujours être respectée, la somme du salaire et de la taxe doit demeurer constante si la productivité marginale n'est pas affectée. Seules leurs proportions respectives peuvent varier. Ainsi, la théorie néoclassique prédit qu'une hausse de la taxe sur la masse salariale doit se traduire par une diminution proportionnelle du salaire. C'est ce que les économistes appellent le report du fardeau de la taxe. Cette prévision théorique a été confirmée empiriquement dans un important article de Britain en 1971. Il conclut que les employeurs parviennent à reporter la totalité du fardeau de la taxe à leurs employés ou, en d'autres termes, que le taux de report de la taxe est de 100%. La taxation de la masse salariale ne devrait donc pas être un facteur de localisation important pour les entreprises puisqu'il leur est possible d'éviter d'en assumer le fardeau.

Depuis la publication de ce résultat de Brittain, de nombreux autres économistes ont cherché à estimer le taux de report des taxes sur la masse salariale avec des méthodes et des échantillons différents. La plupart d'entre eux ont calculé des taux de report sensiblement inférieurs à 100%. Certains rapportent même des taux de report presque nuls. Si ce dernier cas est effectivement représentatif de la réalité, la taxation de la masse salariale peut alors devenir un important facteur de localisation des entreprises et nuire considérablement à la compétitivité d'un pays.

Considérée globalement, la littérature sur la question semble montrer que le report du fardeau de la taxe est un phénomène non négligeable, mais qu'il agit progressivement. La plupart des auteurs s'entendent toutefois pour dire que le taux de report atteint 100% en longue période, mais certains auteurs mettent même en doute ce résultat. Dans ce rapport, nous tenterons de répondre à la question suivante : quels facteurs influent sur le taux de report vers les employés du fardeau des taxes générales sur la masse salariale payées par les employeurs ?

Au-delà de l'utilisation d'une bonne méthode économétrique pour estimer le taux de report, le principal défi soulevé par cette question se situe à notre avis au niveau théorique. En effet, la théorie néoclassique prédit généralement une transition rapide et marquée vers un taux de report complet de la taxe. Or, il semble que, dans le cas des taxes sur la masse salariale, on observe des transitions s'étendant souvent sur plusieurs années. Une modélisation adéquate du report des taxes sur la masse salariale des employeurs vers les employés doit, selon nous, expliquer non seulement l'ampleur du report à l'équilibre mais aussi les conditions de la transition vers cet équilibre. Pour accomplir ce genre de tâche, il est habituellement nécessaire de relâcher l'une des hypothèses du modèle néoclassique. Traditionnellement, les économistes ont souvent abandonné l'hypothèse de la flexibilité des prix en introduisant une certaine rigidité des prix et des salaires. Nous avons plutôt choisi de relâcher l'hypothèse de la rationalité parfaite des agents en y substituant une hypothèse alternative : la rationalité partielle (*bounded rationality*).

Cette hypothèse comportementale est considérée par un nombre grandissant d'auteurs (Sargent en tête) comme une façon intéressante et réaliste de créer des épisodes transitoires dans les modèles économiques. La rationalité partielle est souvent incluse dans un modèle en ayant recours à des algorithmes d'apprentissage. Un algorithme d'apprentissage est une manière de représenter mathématiquement les processus cognitifs auxquels les agents font appel pour apprendre les meilleures stratégies à utiliser dans une situa-

tion particulière. À un moment donné dans le temps, un agent ne connaît donc pas nécessairement toutes les stratégies qui sont à sa disposition, ni leurs performances respectives. Ainsi, un tel modèle prédit que les agents utiliseront temporairement des stratégies sous-optimales avant de découvrir la ou les meilleures stratégies. C'est cette approche novatrice et prometteuse que nous avons choisi d'adopter.

La manipulation d'un modèle avec agents partiellement rationnels nécessite le développement d'un engin de microsimulation disposant de ressources de calcul relativement importantes. Le modèle élaboré dans ce rapport (baptisé *Ecosim*) a pu être implémenté grâce à une architecture informatique de pointe faisant appel notamment à la programmation orientée objet et à un logiciel de microsimulation générique (*SWARM*)<sup>1</sup>.

Le présent rapport est composé de quatre chapitres. Dans un premier temps, le chapitre 2 présente la problématique des taxes sur la masse salariale et une revue de la littérature économique sur le sujet. Notre modèle économique est décrit en détails au chapitre 3. L'hypothèse de la rationalité partielle et les techniques de microsimulation y sont également discutées. Le chapitre 4 est consacré au choix d'un algorithme d'apprentissage approprié. Un modèle simple (*Ecosim 1*) est utilisé pour comparer la performance de deux algorithmes présentant des caractéristiques différentes. Enfin, le chapitre 5 décrit le programme de simulations que nous avons mené avec le modèle complet (*Ecosim 2*) et les propositions théoriques que nous en avons tirées.

---

<sup>1</sup>*Ecosim* a d'abord été développé par Vincent Trussart, puis par Natalie Guay et Marie Connolly.

## Chapitre 2

# Taxes sur la masse salariale : une revue de la littérature

Les taxes sur la masse salariale payées par les entreprises sont une source de revenus de plus en plus importante pour les gouvernements de la plupart des pays industrialisés. Au Québec, ces taxes représentent environ 10% des revenus du gouvernement provincial. Ce chiffre varie énormément d'une province ou d'un pays à l'autre. Il existe aussi une variété de façons de prélever ces taxes et de raisons de le faire. Toutefois, elles ont généralement au moins deux caractéristiques communes : elles sont destinées au financement des programmes sociaux – du moins officiellement – et elles sont considérées par les entreprises comme un ajout à leurs coûts de main-d'œuvre. Conséquemment, les taxes sur la masse salariale peuvent être vues comme une illustration de l'existence d'un arbitrage entre la couverture du filet de sécurité sociale et le niveau de l'emploi d'une économie.

La première section du chapitre décrit brièvement la problématique sous-jacente aux taxes sur la masse salariale au Québec, ailleurs au Canada et dans le monde. Quelques faits stylisés sont présentés. L'objectif de la seconde section de ce chapitre est de parcourir la littérature sur l'impact économique des taxes sur la masse salariale.

### 2.1 Problématique

Sous l'étiquette “taxes sur la masse salariale” se retrouve un vaste ensemble de taxes et de contributions diverses prélevées par les gouvernements.

Plusieurs sous-ensembles peuvent être considérés. Un premier critère de classement est l'incidence légale de la taxe : elle peut être payée soit par l'employeur, soit par l'employé. Des exemples de cette seconde catégorie seraient les cotisations des employés à un régime de pensions public ou encore à un régime d'assurance-chômage. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons aux seules taxes payées par les employeurs. Elles sont en effet l'objet d'un intéressant débat dans la société et parmi les économistes depuis plusieurs années.

Une taxe sur la masse salariale sera ensuite générale ou spécifique selon qu'elle est versée au fonds consolidé du gouvernement ou qu'elle est reliée à un bénéfice spécifique. Les deux exemples du paragraphe précédent sont des taxes spécifiques. La distinction entre ces deux types de taxes n'est pas toujours évidente. La cotisation à une caisse d'assurance est clairement une taxe spécifique ; mais suffit-il d'attacher à une taxe l'étiquette "contribution à un fonds" (destiné à financer une fonction sociale du gouvernement comme la santé ou l'éducation) pour qu'il s'agisse d'une taxe spécifique ? Dans le cadre de ce rapport, nous nous concentrerons sur les taxes générales sur la masse salariale. Certaines taxes sur la masse salariale dépendent du comportement passé des entreprises : par exemple, le risque de blessures auquel les employeurs exposent leurs employés. Voyons comment ces différentes catégories de taxes sont utilisées, d'abord au Québec et ensuite ailleurs au Canada et dans le monde.

### 2.1.1 La situation au Québec

Les gouvernements fédéral et provincial utilisent la masse salariale des entreprises comme base d'imposition. Une entreprise peut avoir à payer jusqu'à cinq taxes sur la masse salariale au gouvernement du Québec<sup>1</sup> :

1. Une cotisation au Fonds des Services de Santé (FSS) de 4,26% de la masse salariale ;
2. Une contribution de 2,8% au Régime des Rentes du Québec (RRQ) ;
3. Une cotisation – variable selon les secteurs industriels – à la Commission de la Santé et de la Sécurité au Travail (CSST) ;
4. Une taxe (conditionnelle) de 1% pour la formation de la main d'œuvre ;

---

<sup>1</sup>Données provenant de [MFQ (1998)].

5. Une contribution de 0,08% à la Commission des Normes du Travail (CNT).

La cotisation au FSS constitue un excellent exemple de taxe sur la masse salariale à laquelle on a donné une allure spécifique, mais qui est en fait essentiellement une taxe générale. Cette taxe comptait pour près de 45% du fardeau fiscal provincial des entreprises québécoises en 1997-98, ce qui représentait 10% des revenus budgétaires totaux du gouvernement québécois. Depuis juillet 1999, les entreprises ayant une masse salariale inférieure à 5 millions \$ bénéficient de taux inférieurs à 4,26%. Les quatre autres taxes sont spécifiques. Deux d'entre elles, les contributions au RRQ et à la CNT, ne dépendent pas du comportement passé des entreprises. Le "1%" pour la formation et la cotisation à la CSST dépendent par ailleurs respectivement des efforts de formation de la main-d'œuvre et du risque associé au secteur industriel des entreprises.

Le gouvernement fédéral prélève quant à lui deux taxes sur la masse salariale. Toutefois, seule la cotisation au programme d'Assurance-Emploi s'applique au Québec puisque cette province ne participe pas au Régime de Pensions du Canada (RPC). Au 1<sup>er</sup> janvier 1997, le taux de cotisation des employeurs était de 4,06%, applicable seulement aux premiers 845\$ de revenus gagnés par chaque employé (à concurrence de 1,583.40\$ par année). Les employés contribuent quant à eux à un taux de 2,9% pour un maximum annuel de 1,131\$<sup>2</sup>. Les employés contribuent aussi au RRQ.

### **2.1.2 La situation ailleurs au Canada et dans le monde**

Le Québec n'est pas la seule province canadienne à percevoir des taxes sur la masse salariale. Le gouvernement de Terre-Neuve perçoit une taxe de 2% (1% pour les entreprises du secteur des ressources renouvelables) lorsque la masse salariale des entreprises excède 100,000\$ par année. Cette taxe est destinée au financement des systèmes de santé et d'éducation. En Ontario, une taxe semblable au FSS québécois s'applique à un taux de 1,95% sur la masse salariale lorsqu'elle est supérieure à 400,000\$. Cette taxe représentait 6,1% des revenus totaux du gouvernement ontarien en 1990-91. Au Manitoba, les entreprises dont la masse salariale est comprise entre un et deux millions de dollars par année paient une taxe de 4,5% sur celle-ci. Un taux de 2,25% s'applique ensuite. Cette taxe est également destinée au financement

---

<sup>2</sup>Données provenant de [Treff et al. (1997)].

de la santé et de l'éducation. Elle représentait 7,28% des revenus fiscaux du gouvernement manitobain en 1990-91. Les autres provinces n'utilisent pas cette source de revenus<sup>3</sup>.

Bien que la taxation de la masse salariale soit un phénomène de plus en plus important au Canada, Dahlby (1993) note que le Canada y a toujours moins recours que la plupart des autres pays industrialisés. En 1989, la part des revenus de l'État provenant des contributions de sécurité sociale (*social-security contributions*) était plus faible au Canada que dans les six autres pays du G7. Or, les contributions auxquelles Dahlby fait référence incluent vraisemblablement les contributions des employeurs, mais aussi des employés. Étant donné cela, il est intéressant de constater que le Canada occupe le second rang du G7 pour le pourcentage des contributions de sécurité sociale qui sont assumées par les employeurs, derrière l'Italie et devant la France ; suivent ensuite dans l'ordre le Royaume-Uni, le Japon, les États-Unis et l'Allemagne. Il semble que les pays se trouvant au sommet de cette liste soient aussi ceux qui ont aujourd'hui les taux de chômage les plus élevés.

## 2.2 L'incidence des taxes sur la masse salariale

Si l'incidence légale des taxes générales sur la masse salariale ne fait aucun doute (elles sont payées à 100% par les employeurs), leur incidence économique fait l'objet d'un grand débat parmi les économistes depuis le début des années 1970. Il a pris naissance lors de la publication d'une étude économétrique de Brittain (1971) sur l'incidence des taxes sur la masse salariale, l'une des premières à paraître sur le sujet. Sa conclusion est saisissante : les données semblent indiquer que les employeurs arrivent à refilet la totalité du fardeau des taxes sur la masse salariale à leurs employés par le biais de salaires plus faibles. Bien qu'en apparence paradoxale, cette conclusion s'accorde parfaitement avec les prédictions de la théorie néoclassique. Comme la taxe s'ajoute aux coûts de main-d'œuvre des entreprises, les autres coûts afférents à la main-d'œuvre – dont le principal est le salaire lui-même – doivent s'ajuster à la baisse afin de préserver l'égalité entre la productivité marginale et le coût du travail.

Le résultat de Brittain suggère donc une parfaite adéquation entre la

---

<sup>3</sup> *Idem.*



théorie néoclassique et la réalité. Ceci est particulièrement étonnant lorsque l'on confronte les hypothèses de la théorie néoclassique aux nombreuses rigidités du marché du travail résultant de la présence d'institutions comme les négociations collectives, les lois sur le salaire minimum, etc. Il n'est donc pas surprenant que cet article de Brittain ait engendré une abondante littérature sur le sujet. Les résultats empiriques rapportés par les nombreux chercheurs s'étant penchés sur la question depuis sont extrêmement variés. Les "taux de report" observés s'échelonnent en fait de 0 à 100%<sup>4</sup> ! Par exemple, dans une étude effectuée sur des données canadiennes pour la décennie 1980, Wilton et Prescott (1993) arrivent à une conclusion diamétralement opposée à celle de Brittain :

La hausse des cotisations sociales s'est répercutée sur les coûts des entreprises et. d'après les données disponibles, il ne semble pas que les entreprises aient été en mesure d'éviter ces augmentations de coût en consentant des hausses salariales moins élevées. [Wilton et al. (1993), p. 46]

Les travaux de Brittain ont fait l'objet de plusieurs critiques théoriques et méthodologiques. Ces critiques ont donné lieu à de nombreuses ré-estimations du taux de report qu'il fut le premier à calculer. Nous porterons notre attention sur trois d'entre elles, qui représentent bien l'évolution dans le temps de la recherche sur la question. Hamermesh (1980) a cherché à tenir compte des rigidités qui caractérisent le marché du travail, en postulant que les salaires ne peuvent s'ajuster que lentement après un choc. Il a trouvé que :

Using the best available estimates of the lags implicit to the adjustment processes, we find that, even though payroll tax increases may eventually be borne mostly by labor, it probably takes several years before a majority of the tax burden is shifted. [Hamermesh (1980), p. 751]

La prédiction de la théorie néoclassique ne serait donc valable qu'à long terme selon Hamermesh. La plupart des études empiriques subséquentes sont cohérentes avec cette proposition. Holmlund (1983) calcule un taux de report dans le voisinage de 50% pour un horizon temporel d'une année (données suédoises, 1951-79). Il remarque :

---

<sup>4</sup>Le taux de report est la part du fardeau de la taxe qui est transférée à d'autres agents. Brittain l'a estimé à 100%.

The basic message of the empirical analysis is that payroll tax increases have produced some backward shifting onto wages, but the shifting appears to be far from complete. [Holmlund (1983), p. 2]

Les études les plus récentes en la matière ont cherché à inclure explicitement la négociation collective des salaires dans la spécification des relations à estimer. C'est l'optique qu'a choisi Pissarides (1991) pour analyser le marché du travail australien (1972-86). Contrairement à ses prédécesseurs, Pissarides met en doute la validité de la prédiction de Brittain (1971) et de la théorie néoclassique, même à long terme. Il calcule en effet un taux de report en longue période de seulement 37%<sup>5</sup>. Le tableau suivant résume la littérature sur l'incidence des taxes sur la masse salariale.

Auteur	Report	Méthodologie
Brittain (1971)	100% à c. t.	Coupe transversale (1 année, 64 pays)
Hamermesh (1980)	100% à l. t.	Simulations (équilibre général calibré)
Holmlund (1983)	35% - 70% à c. t.	Séries temporelles (Suède, 1950-79)
Pissarides (1991)	37% à l. t.	Séries temporelles (Australie, 1972-86)

La littérature économique indique donc que le report du fardeau de la taxe sur la masse salariale est au bas mot un phénomène non négligeable. L'horizon temporel considéré et le degré de flexibilité du marché du travail semblent avoir un impact important sur le taux de report observé. À court terme, certains facteurs (dont les rigidités du marché du travail) empêchent les entreprises de reporter le fardeau des taxes sur la masse salariale à leurs employés. La hausse des coûts de main-d'œuvre se fait donc vraisemblablement ressentir sur le niveau de l'emploi. Selon les conditions de marché, l'incidence de la taxe est ensuite progressivement transférée des employeurs aux employés par des salaires plus faibles.

Les économistes ont encore une compréhension limitée des facteurs qui influent sur les conditions de cette transition. Ce bref survol de la littérature suffit pour constater que de nouvelles recherches sur le sujet sont nécessaires pour mieux comprendre comment opèrent les impacts des taxes sur la masse salariale sur les entreprises et l'économie en général. Le phénomène du report des taxes sur la masse salariale, comme plusieurs autres phénomènes économiques, semble se caractériser par l'atteinte de l'équilibre néoclassique en

<sup>5</sup>[Dahlby (1993). p. 131].

longue période seulement. La plupart des modèles néoclassiques, caractérisés par les attentes rationnelles, ne parviennent pas à expliquer les longues transitions observées dans les données. Ils prévoient généralement des transitions instantanées. Il est possible de tenir compte de la vitesse d'ajustement de certaines variables économiques dans les estimations économétriques. Cela se fait généralement en ayant recours à des méthodes *ad hoc*, sans fondements théoriques. Nous proposons une alternative qui consiste à modéliser les entreprises comme des agents *partiellement* rationnels. Certains modèles de ce type présentent la caractéristique intéressante de converger, en longue période, vers l'équilibre prédit par la théorie néoclassique. Notre modèle est présenté au chapitre suivant.

## Chapitre 3

# Un modèle de microsimulation avec agents partiellement rationnels

Il existe de nombreuses façons d'incorporer la rationalité partielle dans un modèle économique. L'une des plus intéressantes et des plus courantes consiste à modéliser explicitement le processus d'apprentissage. *Grosso modo*, cette approche suggère que les agents apprennent progressivement à utiliser les stratégies optimales, i.e. qu'ils deviennent de plus en plus "rationnels" au fur et à mesure qu'ils explorent leur environnement économique et qu'ils expérimentent les différentes stratégies qui sont à leur disposition. Il en résulte une phase de transition où les agents peuvent utiliser temporairement des stratégies sous-optimales. Dans ce type de modèles, l'existence d'une transition entre le court et le long terme ne repose donc pas sur l'hypothèse controversée que les prix sont rigides. Ce choix ne constitue toutefois pas une prise de position sur cette délicate question. Notre approche vise plutôt à développer une explication théorique plus complémentaire qu'alternative.

En introduction à ce chapitre, nous présentons une brève revue de la littérature sur la rationalité partielle et ses applications en sciences économiques. Nous décrivons ensuite le modèle que nous allons utiliser. Les modèles avec agents partiellement rationnels comme celui-ci sont des modèles dynamiques. La dynamique du modèle est due à la modélisation explicite des processus d'apprentissage des agents. La dernière section de ce chapitre est consacrée aux techniques de simulation appropriées à ce type de modèles ainsi qu'à leur utilisation pour l'analyse des politiques gouvernementales.

## 3.1 Une hypothèse : la rationalité partielle

Il existe une abondante littérature sur la rationalité partielle (*bounded rationality*) en microéconomie, en macroéconomie et en finance. La rationalité partielle est souvent vue comme un moyen d'expliquer certaines divergences que l'on constate entre les prévisions de la théorie néoclassique et l'observation de la réalité. Le cas des taxes sur la masse salariale pose exactement ce genre de problèmes. Pourquoi observe-t-on parfois des données conformes aux prévisions de la théorie néoclassique et d'autres fois pas ? L'utilisation de règles pré-définies (*rules of thumb*), plutôt que la résolution par les agents d'un problème d'optimisation, est une explication potentielle qui a intéressé récemment de nombreux auteurs. Lettau et Uhlig (1999) décrivent ainsi la littérature sur ce thème :

The motivation of these authors is partly the difficulty of explaining observed facts – partly, because rules of thumb are interesting paradigm in themselves, and partly, because they can be used as a computational tool. [Lettau et al. (1999), p. 149]

Les modèles avec agents partiellement rationnels représentent à la fois un important défi en termes de programmation et une avenue intéressante pour résoudre des problèmes économiques complexes. Par exemple, l'existence d'épisodes transitoires est une réalité que la théorie néoclassique n'explique pas de façon satisfaisante. L'économie réelle ne s'ajuste jamais instantanément après un choc et la transition entre deux équilibres est souvent de longue durée et difficile à comprendre. Sargent (1993) situe ainsi la littérature sur la rationalité partielle :

Against this background, more and more economists have recently ventured into what Christopher Sims (1980) characterized as the “wilderness” of irrational expectations and bounded rationality, aiming partly to create theories of transition dynamics, partly to understand the properties of equilibrium dynamics themselves, and partly to create *new* dynamics of systems that do not settle down. [Sargent (1993), pp. 1-2]

### 3.1.1 Définitions

La rationalité partielle a l'avantage de pouvoir se définir relativement au concept beaucoup plus connu des attentes rationnelles. Selon Sargent, les

attentes rationnelles sont le résultat de deux conditions : la rationalité individuelle – “each person’s behavior can be described as the outcome of maximizing an objective function subject to perceived constraints” [Sargent (1993), p. 6] – et une perception identique de l’environnement par tous les individus. Sargent définit les attentes *partiellement* rationnelles comme le relâchement de cette seconde condition :

I interpret a proposal to build models with “boundedly rational” agents as a call to retreat from the second piece of rational expectations (mutual consistency of perceptions) by expelling rational agents from our model environments and replacing them with “artificially intelligent” agents who behave like econometricians. [Sargent (1993), p. 3]

Selon le prix Nobel Herbert A. Simon, cité dans Berk, Hughson et Vandezande (1996), un agent est partiellement rationnel s’il a une connaissance incomplète de l’ensemble des alternatives possibles, ou encore s’il possède des habiletés de calcul insuffisantes pour résoudre les problèmes auxquels il fait face. Une conséquence de la rationalité partielle est l’adoption par les agents des stratégies qui accroissent leur bien-être (ou leurs profits) au fur et à mesure qu’ils les découvrent :

Thus an empirically verifiable prediction of any theory of bounded rationality is that agents should adopt welfare-improving strategies upon observing them. [Berk et al. (1996), p. 955]

### 3.1.2 Pourquoi la rationalité partielle ?

Grâce à l’essor de l’économie expérimentale, il existe maintenant une importante évidence empirique à l’effet que les agents économiques ne sont que partiellement rationnels dans plusieurs situations. Pour vérifier cette hypothèse, Berk, Hughson et Vandezande (1996) ont fait appel à une base de données inusitée : les enregistrements du jeu télévisé américain *The Price is Right*. Ils ont observé attentivement le comportement des participants à l’émission. Ils en concluent que leurs comportements sont mieux expliqués par l’utilisation de *rules of thumb* simples que par un modèle avec rationalité parfaite. Ils ont aussi observé que les participants devenaient de plus en plus “rationnels” au fur et à mesure qu’une émission progressait. En fait, les participants apprennent progressivement, par essais et erreurs, à utiliser les meilleures stratégies :

[...] we find convincing evidence that contestants improve their bidding after observing the previous strategies : contestants learn. This is consistent with the hypothesis that suboptimal bidding stems from the computational limitations of contestants, that is, bounded rationality. [Berk et al. (1996), p. 955]

Cette étude pour le moins unique en son genre en sciences économiques n'est qu'un exemple des nombreux travaux qui ont été faits sur la question des évidences empiriques de la rationalité limitée. John Conlisk (1996), qui en a fait une recension exhaustive, a tenté de répondre à la question : "Why Bounded Rationality ?" En plus des évidences empiriques, tant en psychologie qu'en économique, il fournit les éléments de réponse suivants :

1. Plusieurs modèles basés sur la rationalité partielle semblent avoir un meilleur pouvoir explicatif que les modèles avec rationalité parfaite ;
2. Dans de nombreux contextes, le recours à l'hypothèse de la rationalité parfaite est justifié par des arguments insatisfaisants ;
3. Les coûts reliés à une décision économique sont souvent très importants, ce dont les modèles "traditionnels" tiennent rarement compte.

Conlisk ne prétend toutefois pas qu'il faille adopter un seul et unique concept de rationalité. Il s'agit d'adopter celui qui décrit le mieux un contexte particulier :

The evidence and models surveyed suggest that a sensible rationality assumption will vary by context, depending on such conditions as deliberation cost, complexity, incentives, experience, and market discipline. [Conlisk (1996), p. 692]

Dans *Bounded rationality in macroeconomics* (1993), Sargent soulève quatre applications potentielles de la rationalité partielle en économique :

1. La **recherche d'équilibres** (*equilibrium selection*) : les modèles avec attentes rationnelles ont souvent plusieurs équilibres et le recours à la rationalité partielle permet parfois de sélectionner les plus plausibles.
2. Une **nouvelle source de dynamisme** (*new source of dynamics*) : il est parfois difficile d'expliquer à l'aide de modèles avec attentes rationnelles le volume de l'activité économique que l'on observe dans la réalité (en particulier sur les marchés financiers). Des modèles avec rationalité partielle ont donné des résultats intéressants en ce sens.

3. L'analyse des **changements de régimes** (*regime changes*) : les attentes rationnelles expliquent bien les transitions rapides et contrastées. Or, l'observation d'épisodes transitoires longs ou mitigés semble confirmer l'hypothèse que les agents ne sont pas toujours parfaitement rationnels.
4. De **nouvelles méthodes** d'optimisation et d'estimation : la littérature sur l'intelligence artificielle suggère de nouvelles techniques de calcul qui sont de plus en plus utilisées par les économistes<sup>1</sup>.

Notre application de la rationalité partielle à la problématique des taxes sur la masse salariale emprunte les quatre chemins proposés par Sargent. D'abord, il s'agit d'isoler des équilibres potentiellement différents de celui qui est prédit par la théorie néoclassique. Ensuite, le caractère dynamique de notre modèle émerge grâce à la modélisation explicite du processus d'apprentissage des agents. Nous simulons aussi des changements importants dans la politique fiscale, i.e. des changements de régimes pour lesquels il n'existe que peu ou pas de données. Enfin, une grande importance est accordée aux techniques de calcul et à leurs propriétés.

## 3.2 Description du modèle

La présente section décrit le modèle économique qui nous permettra, au chapitre 5, de simuler diverses politiques fiscales : *Ecosim 2*. Dans la réalité, lorsqu'une entreprise fait face à une variation du taux de la taxe sur la masse salariale, elle peut réagir en ajustant le niveau du salaire qu'elle offre, son nombre d'employés ou encore le prix de son produit. Par souci de simplicité, nous avons évacué la décision de *pricing* pour nous concentrer uniquement sur le marché du travail. Il est important de noter qu'*Ecosim 2* est un modèle microéconomique d'équilibre partiel. Par conséquent, les données macroéconomiques (production, emploi, chômage, etc.) sont obtenues par l'agrégation des données individuelles. Les conclusions du modèle sont obtenues en effectuant des microsimulations par ordinateur. Cette technique est discutée à la fin du présent chapitre.

Décrivons d'abord le comportement des trois types d'agents du modèle :  $m$  firmes partiellement rationnelles,  $n$  individus au comportement stochastique

---

<sup>1</sup>[Sargent (1993), pp. 25-33].

<sup>2</sup>*Ecosim 1* a servi à des fins de développement. Il sera décrit au chapitre 4.



et un gouvernement.

### 3.2.1 Modélisation du comportement des firmes

Les entreprises ont deux types de décisions à prendre : la détermination du salaire ( $w_j^t$ ) et une décision d'embauche. Ces deux décisions sont prises simultanément à l'aide d'un algorithme d'apprentissage qui sera décrit au chapitre 5. Le nombre d'employés ( $e_j^t$ ) que la firme  $j$  peut embaucher à la période  $t$  est limité par le nombre d'individus qui choisissent de lui offrir leurs services ( $N_j^t$ ), ce qui implique que la condition suivante doit être remplie en tout temps :  $e_j^t \leq N_j^t$ . Ce mécanisme est expliqué à la prochaine section.

Il se peut donc que la production d'une firme soit contrainte. Si  $\hat{e}_j^t$  est le nombre d'employés désirés par une firme nonobstant  $N_j^t$ , nous avons donc  $e_j^t = \min \{ \hat{e}_j^t, N_j^t \}$ . La quantité produite par une firme à chaque période est ensuite déterminée par la fonction de production simple suivante :  $q_j^t = \alpha e_j^t$ , où  $\alpha > 0$ . Comme la main-d'œuvre est le seul facteur considéré, la décision de production se fonde dans la décision d'embauche. Nous supposons enfin que le prix du bien équilibre toujours le marché selon la fonction de demande inverse suivante :  $p^t = (\alpha + 1)n - Q^t$ , où  $Q^t = \sum_{j=1}^m q_j^t$  est la quantité totale produite dans l'économie. Cette définition implique la non-négativité du prix de marché.

### 3.2.2 Modélisation du comportement des individus

Les individus ne sont actifs que sur le marché du travail. Un individu est rattaché à une firme pour une période s'il choisit de lui offrir ses services. Tel qu'indiqué à la section précédente, une firme n'est en aucun cas tenue d'employer les  $N_j$  individus qui lui sont rattachés. Parmi ceux-ci,  $e_j^t$  sont employés et  $U_j^t = N_j^t - e_j^t$  sont chômeurs. Ce sont des chômeurs involontaires. Leur nombre dans l'économie se calcule ainsi :

$$U^t = \sum_{j=1}^m U_j^t$$

Peu importe son statut, un individu peut changer d'entreprise d'attache à chaque période. Il peut aussi quitter volontairement le marché du travail et se prévaloir de la prestation de sécurité sociale ( $T$ ). Ce choix est fondé sur les différents salaires offerts par les firmes et sur le montant des prestations.

La probabilité qu'un individu rattaché à la firme  $k$  choisisse d'y demeurer est calculée ainsi :

$$P_{kk} = \frac{w_k^r}{w_k^r + T^c + \sum_{j \neq k} w_j^s} \quad (3.1)$$

où les exposants  $c, r$  et  $s$  sont des paramètres de préférence. Lorsque  $r = s$ , il y a mobilité parfaite des travailleurs entre les firmes. La probabilité qu'un individu rattaché à la firme  $k$  passe à la firme  $l$  est calculée de manière similaire :

$$P_{kl} = \frac{w_l^s}{w_k^r + T^c + \sum_{j \neq k} w_j^s} \quad (3.2)$$

Enfin, la probabilité qu'un individu rattaché à la firme  $k$  quitte volontairement le marché du travail est donnée par :

$$P_{kc} = \frac{T^c}{w_k^r + T^c + \sum_{j \neq k} w_j^s} \quad (3.3)$$

Cette spécification nous assure que la distribution est exhaustive, soit que  $P_{kc} + \sum_{j=1}^m P_{kj} = 1$ . En plus du chômage involontaire évoqué, le modèle admet donc aussi le chômage volontaire puisqu'un individu peut choisir de quitter temporairement le marché du travail. Le nombre de chômeurs volontaires sera dénoté  $V^t$ . Une distribution de probabilités équivalente à celle des individus qui sont rattachés à une firme (constituée des équations 3.1, 3.2 et 3.3) s'applique aux chômeurs volontaires :

$$\begin{aligned} P_{cc} &= \frac{T^c}{T^c + \sum_j w_j^s} \\ P_{ck} &= \frac{w_k^s}{T^c + \sum_j w_j^s} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Il peut être vérifié que la condition suivante est également respectée :  $P_{cc} + \sum_{j=1}^m P_{cj} = 1$ .

### 3.2.3 Modélisation du gouvernement

Le gouvernement n'a que deux fonctions dans l'économie : taxer et verser des prestations de sécurité sociale aux chômeurs. Il prélève les trois taxes suivantes à chaque période :

1. Une taxe sur la masse salariale payée par les entreprises au taux  $\tau$  (où  $0 \leq \tau \leq 1$ ) sur la base de  $w_j^t e_j^t$ ;
2. Un impôt sur le revenu des individus au taux  $\rho$  sur la base de  $w_i^t$ ;
3. Un impôt sur les profits des entreprises au taux  $\varphi$  sur la base des profits nets de la taxe sur la masse salariale, soit  $[p^t q_j^t - (1 + \tau)w_j^t e_j^t]$ .

Le gouvernement verse à chaque chômeur (qu'il soit rattaché à une firme ou non) une prestation "quotidienne"  $T$ . Comme l'objectif visé par les simulations est l'étude des conséquences du système de taxation sur l'économie, les taux de taxation et la valeur du transfert  $T$  sont des variables exogènes du modèle. Le gouvernement n'a pas de contrainte budgétaire et on suppose qu'il peut enregistrer des surplus et des déficits sans restriction. L'absence de contrainte budgétaire est dictée par la perspective d'analyse des politiques publiques que nous avons adoptée.

### 3.2.4 Séquence des actions

À chaque période, à chaque "jour", les différentes actions des trois types d'agents du modèle se déroulent dans l'ordre chronologique suivant :

1. Chaque firme fixe son salaire et détermine son niveau d'emploi désiré pour la période selon l'algorithme d'apprentissage (les vecteurs  $\mathbf{w}^t$  et  $\hat{\mathbf{e}}^t$  sont construits) ;
2. Les individus choisissent leur firme d'attache (le vecteur  $\mathbf{N}^t$  est construit) ;
3. La production et le niveau d'emploi de chaque firme sont déterminés selon les équations  $e_j^t = \min \{ \hat{e}_j^t, N_j^t \}$  et  $q_j^t = \alpha e_j^t$  (les vecteurs  $\mathbf{e}^t$  et  $\mathbf{q}^t$  sont construits) ;
4. Le prix de marché est établi :  $p^t = (\alpha + 1)n - \sum_{j=1}^m q_j^t$  ;
5. Les profits nets sont calculés (le vecteur  $\boldsymbol{\pi}^t$  est construit) selon l'équation suivante :

$$\pi_j^t = (1 - \varphi) [p^t q_j^t - (1 + \tau)w_j^t e_j^t] \quad (3.5)$$

6. Le compte du gouvernement est mis à jour de la manière suivante :

$$G^t = G^{t-1} + (\rho + \tau)\mathbf{e}^t \mathbf{w}^t + \varphi \sum_{j=1}^m \pi_j^t - T^t (V^t + \sum_{j=1}^m U_j^t) \quad (3.6)$$

7. L'algorithme d'apprentissage est mis à jour selon les données de la période (c.f. chapitre 5).

La dynamique du modèle est le résultat de l'algorithme d'apprentissage des firmes. Grâce à cet algorithme, les firmes tiennent compte des événements passés dans leurs décisions courantes. Chaque firme dispose de son propre algorithme d'apprentissage. Ainsi, à un moment donné dans le temps, tous les agents ne sont pas nécessairement au même stade d'apprentissage. Il faut donc modéliser en parallèle un grand nombre d'agents. La prochaine section aborde les microsimulations, un outil d'analyse économique conçu pour tenir compte de l'hétérogénéité d'une population d'agents.

### **3.3 Les microsimulations et l'analyse des politiques publiques**

Comme nous le verrons au prochain chapitre, les récents développements en informatique permettent de modéliser de plus en plus précisément les processus grâce auxquels les êtres humains peuvent apprendre. Il s'agit d'une avancée des plus intéressantes vers une modélisation réaliste de l'agent économique. Ce gain en réalisme se fait toutefois aux dépens de la simplicité des calculs. Les modèles avec algorithmes d'apprentissage, même les plus modestes, sont complexes à résoudre analytiquement. Il devient souvent nécessaire de recourir à des simulations pour en caractériser l'équilibre. Les simulations ont également l'avantage de permettre l'analyse de la transition vers cet équilibre. L'objectif de cette section est de caractériser la technique de simulation que nous allons utiliser, les microsimulations, et de discuter de ses applications à l'analyse des politiques publiques.

#### **3.3.1 Définition et caractéristiques**

La microsimulation est l'un des nombreux outils d'analyse utilisés actuellement en sciences économiques. La définition suivante a été empruntée à la littérature sur l'analyse des politiques gouvernementales :

Defined very simply, the microsimulation approach to evaluating alternative legislative proposals involves modeling the impact of government programs at the level at which they are intended to operate. [Citro et al. (1991), p. 101]

Une microsimulation utilise une base de micro-données (par opposition à des données agrégées) au début du processus de simulation. Cette base de données est ensuite mise à jour tout au long d'une simulation. La réaction aux chocs économiques – provenant par exemple d'un changement dans les paramètres d'un programme gouvernemental – est décentralisée au niveau de chaque individu. Les variables agrégées sont tout simplement le résultat de la somme algébrique des variables individuelles (approche *bottom-up*).

Leur haut niveau de réalisme rend les microsimulations particulièrement séduisantes. Cette technique est toutefois sensiblement moins utilisée dans les milieux gouvernementaux et académiques que les modèles d'équilibre général calculables (*computable general equilibrium* ou CGE), les modèles économétriques en séries temporelles, les modèles économétriques du comportement individuel ou encore les modèles dits *cell-based* (utilisés pour modéliser les différents sous-groupes d'une population). Les microsimulations se distinguent de ces quatre autres catégories de modèles parce qu'elles tiennent explicitement compte de l'hétérogénéité des agents qui composent une économie.

Par opposition, les autres types d'engins de simulation disponibles mesurent tous l'effet des chocs économiques à l'aide d'une certaine dose de données agrégées. L'input des modèles économétriques en séries temporelles est généralement composé de données agrégées, tandis que les modèles CGE et autres modèles économétriques du comportement individuel font appel à des micro-données pour estimer des paramètres agrégés qui sont ensuite utilisés pour la prévision. Prise en considération au début du processus de simulation, l'hétérogénéité de la population est donc ignorée au moment de faire des prévisions. Les modèles *cell-based* incluent certes un certain degré d'hétérogénéité en modélisant séparément différents sous-groupes d'une population, mais ils font toujours l'hypothèse cruciale que tous les individus appartenant à un même sous-groupe sont homogènes.

### 3.3.2 Applications

Les premiers modèles de microsimulation sont apparus dans les années 1950 avec les travaux de l'économiste Guy Orcutt. Comme les engins de microsimulation sont complexes et exigeants sur le plan technologique, les premières applications à l'analyse économique des politiques gouvernementales n'ont cependant vu le jour qu'à la fin de la décennie 1960 grâce au développement de l'informatique. Depuis trois décennies, des modèles de microsimulation ont été utilisés par de nombreuses agences gouvernementales

pour prévoir l'impact économique de réformes fiscales, de politiques sociales, de politiques urbaines, de programmes d'employabilité, etc.

En 1988, un comité du gouvernement américain a été mis sur pieds pour étudier le potentiel des microsimulations pour améliorer le processus de décision public. Les conclusions de ce groupe dirigé par l'économiste Eric A. Hanushek sont très favorables aux microsimulations :

We conclude that no other type of model can match microsimulation in its potential for flexible, fine-grained analysis of proposed policy changes. [Citro et al. (1991), p. 115]

Le comité Hanushek a identifié trois grands avantages des modèles de microsimulation :

1. Ils peuvent simuler autant les effets de changements très précis dans les programmes gouvernementaux que les effets de réformes importantes ;
2. Ils peuvent simuler des changements qui impliquent des interactions complexes entre plusieurs programmes gouvernementaux ;
3. Ils peuvent simuler les effets de changements proposés sur des sous-groupes de la population en plus de produire des estimés agrégés.

Les membres du comité ont toutefois exprimé leur scepticisme face à une généralisation de l'usage de cette technique, étant donné les coûts importants qui peuvent être engendrés par leur complexité. Ils ont formulé la critique suivante au sujet des modèles existants :

Microsimulation models tend to be highly complex [...] and must usually meld together a variety of data and research results of varying quality (making many, often unsupported, assumptions in the process). [Citro et al. (1991), p. 9]

Ils étaient toutefois convaincus que les besoins pour le type d'analyse que peuvent fournir les microsimulations iraient en croissant dans les années à venir. Dans cette optique, ils ont appelé la communauté scientifique à développer une nouvelle génération de modèles qui améliorerait les aspects suivants :

1. La qualité des bases de données disponibles ;
2. Les techniques de validation des engins de simulation ;
3. Le développement des technologies informatiques ;
4. Le design et le développement des modèles :

- Nécessité de développer des engins de simulation génériques – donc plus flexibles – de manière à répondre à l'évolution constante des besoins et des connaissances ;
- Importance de modéliser adéquatement les réponses comportementales des agents aux chocs économiques ;
- Amélioration de la capacité des modèles à simuler les effets de long terme des politiques.

De récents développements en informatique permettent aujourd'hui la conception de modèles de microsimulation sensiblement plus réalistes et puissants. Les deux prochains chapitres décrivent respectivement le développement et l'application d'un modèle de microsimulation avec agents partiellement rationnels destiné à analyser la problématique du report des taxes sur la masse salariale.

# Chapitre 4

## Choix et validation de l'algorithme d'apprentissage

Grâce aux récents développements de l'informatique, la modélisation des processus d'apprentissage se présente comme une avenue prometteuse pour reproduire les épisodes transitoires vers la rationalité parfaite qui caractérisent le type de problématique qui nous intéresse. Dans ce chapitre, nous ferons d'abord une brève présentation du concept d'algorithme d'apprentissage. Une section sera ensuite consacrée à la question de la convergence des modèles avec agents partiellement rationnels. Puis, dans le cadre d'un premier modèle de microsimulation relativement simple (*Ecosim 1*), nous comparerons les performances de deux algorithmes d'apprentissage différents.

### 4.1 Les algorithmes d'apprentissage

Un algorithme d'apprentissage est un modèle des processus cognitifs auxquels un agent fait appel pour apprendre. Typiquement, un algorithme d'apprentissage permet à l'agent d'expérimenter les différentes stratégies qui sont à sa disposition et d'identifier celles qui constituent de meilleures réponses aux diverses situations auxquelles il est confronté. Il existe de nombreux types d'algorithmes d'apprentissage, chacun possédant ses caractéristiques propres.



### 4.1.1 Catégories d'algorithmes

Il existe plusieurs façons de classer les différents algorithmes d'apprentissage. En établir une classification exhaustive dépasse l'objectif de cette section. Cependant, il nous semble important situer dans cette littérature les deux algorithmes que nous allons présenter à la section 4.2. Nous diviserons d'abord les algorithmes d'apprentissage en deux catégories : les algorithmes adaptatifs et les algorithmes génétiques.

Un algorithme adaptatif expérimente les différentes stratégies d'une liste donnée de manière à associer à chacune une "cote de performance" relative (*fitness*). Ces cotes de performance déterminent si une stratégie sera utilisée plus ou moins fréquemment que les autres dans l'avenir. S'il existe une stratégie optimale dans la liste des stratégies, l'algorithme adaptatif identifiera qu'il est profitable de l'utiliser le plus souvent possible. À l'équilibre (s'il en existe un), les cotes de performance seront telles que seule la stratégie optimale sera utilisée. L'algorithme 1, présenté à la section 4.2.1.1, est un algorithme de type adaptatif. Il s'inspire directement de l'algorithme d'apprentissage d'*Aspen*, développé par Basu, Pryor, Quint et Arnold (1996). L'apprentissage par *rules of thumb* de Lettau et Uhlig (1999) appartient également à la catégorie des algorithmes adaptatifs.

La mise à jour des cotes de performance se fait généralement par le biais de renforcements. Le renforcement sera positif ou négatif selon que le recours à une stratégie a été profitable ou non. Pour juger de la profitabilité d'une action, la règle la plus simple consiste à accroître la probabilité d'utiliser une stratégie donnée (la renforcer positivement) lorsque celle-ci a accru la valeur de la fonction d'objectif de l'agent, i.e. le niveau des profits dans le cas des firmes d'*Ecosim*. Nos deux algorithmes utiliseront *grosso modo* cette règle simple. Il y existe toutefois une multitude d'alternatives<sup>1</sup>.

Les algorithmes génétiques diffèrent essentiellement des algorithmes adaptatifs parce qu'ils incluent des mécanismes de sélection et de mutation des stratégies. Typiquement, un algorithme génétique modifie périodiquement la liste des stratégies dont dispose l'agent. L'algorithme sélectionne les meilleures stratégies (mécanisme de sélection) et peut en créer de nouvelles (mécanisme de mutation). Dawid et Kopel (1998) décrivent ainsi les principales caractéristiques des algorithmes génétiques :

---

<sup>1</sup>Pour une introduction formelle à l'apprentissage par renforcement (*reinforcement learning*), le lecteur se référera à [Trussart (1999)].

The most valuable features of genetic algorithms from the viewpoint of economics are the explicit representation of every individual in a population of heterogeneous agents who (might) differ in strategies, the parallel processing of information, competition among alternative rules, selection of those that perform better and the possibility of creating new rules. [Dawid et al. (1998)]

Notre algorithme 2 (présenté à la section 4.2.1.2) appartient à la catégorie des algorithmes génétiques. L'input du mécanisme de sélection provient d'un processus d'exploration similaire à celui des algorithmes adaptatifs. Les stratégies ayant les meilleures cotes de performance sont conservées et soumises à la concurrence d'un nouvel ensemble de stratégies générées par le mécanisme de sélection. Dans l'algorithme 2, ces nouvelles stratégies sont créées en tenant compte des données du processus d'exploration adaptatif. Les nouvelles stratégies sont donc plus semblables aux meilleures stratégies qu'à celles que le mécanisme de sélection a rejetées de la liste.

#### 4.1.2 Représentation de la solution

La solution générée par un algorithme d'apprentissage, qu'il soit génétique ou adaptatif, peut être soit une fonction (continue ou discontinue), soit une valeur discrète. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour traiter et représenter cette solution. Lorsque la solution d'un algorithme d'apprentissage est une simple valeur discrète (par exemple un nombre), le problème ne se pose pas. Ce sera le cas de notre algorithme 2, où la solution du processus d'apprentissage sera, si elle existe, une valeur discrète : la stratégie optimale. Or, il arrive souvent que la solution d'un processus d'apprentissage ne soit pas une valeur discrète mais une fonction de certains paramètres de l'environnement économique de l'agent. Comment alors traiter ce type de solutions ? Les méthodes les plus courantes sont les réseaux de neurones et les systèmes de classement (*classifier systems*).

Comme nous n'utiliserons pas de réseau de neurones dans le présent rapport, nous nous contentons d'en donner une brève définition<sup>2</sup> :

They refer to approximations to cognitive processes where the stimuli (usually the input data or observations, quantitative as

---

<sup>2</sup>Pour une présentation détaillée des réseaux de neurones, le lecteur se référera notamment à [Sargent (1993), chap. 4].

well as qualitative) are being analyzed by a network of computational cells characterized by individual non-linear responses akin to neurons in the brain. When propagated through the network and after adding up, the stimuli result in combined values which can be measured at specific cells called output neurons/cells. [Pau et al. (1996), p. 414]

Les réseaux de neurones sont de plus en plus utilisés pour représenter des fonctions non linéaires complexes. Plus simple et plus intuitif, un système de classement peut être vu comme une version discrète d'un réseau de neurones. Basu, Pryor, Quint et Arnold (1996) de même que Lettau et Uhlig (1999) ont utilisé des systèmes de classement pour représenter les solutions de leurs algorithmes d'apprentissage adaptatifs. Ce sera également le cas de l'algorithme 1. Un système de classement est tout simplement un *mapping* d'états et d'actions. Le système de classement associe à une série d'états de la nature une action à entreprendre. Par exemple, si deux états ont été définis, la solution du processus d'apprentissage devra, si elle existe, identifier la meilleure action à entreprendre dans chacun de ces états.

### 4.1.3 Le problème de la convergence

Avant de passer à la description d'*Ecosim 1* et des deux algorithmes d'apprentissage, une remarque sur la convergence des processus d'apprentissage s'impose. L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage garantit-elle la convergence du modèle vers la stratégie optimale, celle qui serait choisie par un agent parfaitement rationnel? Rien n'est moins sûr. Conlisk (1996) aborde ainsi la délicate question de la convergence des modèles avec agents partiellement rationnels :

There has been great interest in whether adaptation might lead agents to rational expectations. The answer depends on exact conditions – on whether the context is simple enough, on whether agent's prior beliefs are compatible with the context, on how agents process new information, and so on. Overall, authors are quite cautious about claiming support for rational expectations on adaptive grounds. [Conlisk (1996), p. 679]

Il a été démontré que tous les algorithmes d'apprentissage ne garantissent pas l'atteinte de la rationalité parfaite. Cette question a été traitée récemment par plusieurs auteurs, notamment Lettau et Uhlig (1999) et Börgers

(1996). Mais elle avait été anticipée par Alchian (1950), qui s'était penché sur les conditions de convergence d'un processus d'apprentissage par essais et erreurs. Ses conclusions étaient relativement pessimistes, surtout en ce qui a trait à un environnement économique changeant :

Whether decisions and actions in economic life satisfy these two conditions cannot be proved or disproved here, but the available evidence seems overwhelmingly unfavorable. [Alchian (1950), p. 219]

À la lumière de ces mises en garde, une analyse formelle de la capacité à converger de l'algorithme d'apprentissage utilisé s'impose. La prochaine section décrit le modèle que nous avons développé (*Ecosim 1*) à cette fin.

## 4.2 Description d'*Ecosim 1*

*Ecosim 1* est essentiellement une adaptation et une simplification du modèle de développement du projet *Aspen* des laboratoires nationaux américains Sandia [Pryor et al. (1996)]. Il nous est apparu important de reproduire d'abord les travaux d'autres chercheurs avant de développer un modèle original (*Ecosim 2*, décrit au chapitre 2 et dont les résultats sont présentés au chapitre 5). Ce travail préliminaire nous a permis d'apprendre à utiliser ce nouvel outil de modélisation et, surtout, d'en identifier les possibilités et les limites. De plus, ce modèle simple constitue un cadre idéal pour comparer les performances de nos deux algorithmes d'apprentissage.

*Ecosim 1* reproduit une petite économie composée de  $m$  entreprises produisant un bien homogène, de  $n$  individus et d'un gouvernement. Seul le marché du bien est modélisé. Ceci peut paraître étonnant compte tenu que le but de nos recherches est d'analyser la taxation du travail. La raison de cette apparente contradiction est simple. Notre objectif est différent de celui des concepteurs d'*Aspen*, qui cherchent à modéliser l'économie américaine dans son ensemble. Ils ont choisi d'aborder le développement de leur modèle par le marché des biens. Comme nous tenions à reproduire un modèle simple existant, nous avons aussi choisi cet angle d'approche. Le modèle décrit dans le présent chapitre est donc sensiblement différent du modèle présenté au chapitre 2. Il est toutefois important de se souvenir que le salaire n'est en fait que le prix fixé sur le marché du travail. Malgré leurs apparentes différences, nos deux modèles reposent ainsi sur les mêmes bases.

*Ecosim 1* est un modèle économique d'équilibre partiel. Cette caractéristique simplifiera considérablement l'analyse théorique de l'équilibre et, par conséquent, les tests de validation. Il s'agit donc d'un véritable modèle microéconomique. Les variables macroéconomiques sont tout simplement générées en faisant la somme algébrique de toutes les quantités individuelles. Une simulation du modèle consiste en une série de répétitions d'un même ensemble d'actions. En termes de théorie des jeux, il s'agit d'un jeu répété un nombre infini de périodes. La fin d'une simulation est déterminée de façon arbitraire et ne fait pas partie de l'information détenue par les agents. Décrivons maintenant le comportement des trois types d'agents du modèle.

### 4.2.1 Modélisation du comportement des firmes

À chaque période, l'entreprise  $j$  fixe son prix selon un algorithme d'apprentissage (voir détails ci-après). C'est la seule décision qu'elle doit prendre. Chaque firme produit de manière à répondre à la totalité de la demande à laquelle elle fait face. Les firmes n'ont donc pas de contraintes de capacité. Elles produisent à un coût marginal  $c$ , constant pour les  $m$  firmes de l'industrie. Chaque entreprise emploie le même nombre d'individus ( $e$ ) au taux de salaire journalier  $w$ . La masse salariale  $we$  est donc un coût fixe pour une entreprise. L'entreprise  $j$  dégage des profits  $\pi_j = p_j x_j - C(x_j)$ , où  $x_j$  est la quantité vendue du bien,  $p_j$  est le prix demandé (selon l'algorithme d'apprentissage) et  $C(x_j) = we + cx_j$  est la fonction de coût des entreprises.

Chaque entreprise appartient à un propriétaire unique. Les profits et pertes nets lui sont imputés en entier sous forme de dividendes ( $d$ ). Les  $m$  propriétaires de cette économie ne font qu'épargner et désépargner selon la performance de leur entreprise. Pour faciliter le calcul de l'équilibre théorique du modèle, les propriétaires ne consomment et ne travaillent pas. Il s'agit d'une fuite du modèle, d'une discontinuité du flux circulaire de l'économie, puisque le solde des comptes des propriétaires ne sont ni dépensés, ni prêtés ou empruntés à l'intérieur de l'économie. En d'autres termes, le marché financier se trouve à l'extérieur du modèle, par exemple à l'étranger.

#### 4.2.1.1 Algorithme 1

Le premier algorithme d'apprentissage dont nous allons étudier la performance est emprunté directement au modèle de développement du projet

*Aspen*. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage adaptatif avec système de classement. Nous l'avons baptisé "algorithme 1"<sup>3</sup>.

Au début de chaque période, la firme  $j$  observe les trois informations (variables) suivantes :

1. La variation de ses profits,  $\pi_j$  (ils ont augmenté ou diminué au cours de la période précédente) ;
2. La variation du niveau de ses ventes,  $x_j$  (elles ont augmenté ou diminué au cours de la période précédente) ;
3. La variation du prix,  $p_j$ , qu'elle a demandé lors des deux dernières périodes (il a augmenté ou diminué).

Ces trois variables définissent 8 états de la nature possibles ( $2^3$ ), qui constituent le "système de classement" de la firme  $j$ . À chacun de ces états correspond un triplet de probabilités, associées aux trois événements "augmenter", "diminuer" et "garder constant" le prix du produit ( $p_j$ ). L'état initial dans lequel se trouve chaque firme est déterminé aléatoirement selon une distribution de probabilités uniforme bornée par le nombre d'états possibles. Les triplets de probabilités de chacun des états de la nature en vigueur à la première période d'une simulation sont également déterminés aléatoirement.

À chacune des périodes subséquentes, un tirage aléatoire est effectué sur la distribution (le triplet) de probabilités qui correspond à l'état de la nature qui est observé à ce moment-là. Selon l'action choisie par tirage, une firme ne peut faire varier son prix que de l'incrément  $\Delta p \in \{-1, 0, 1\}$ . Les probabilités sont révisées avant que la prochaine période soit entreprise, selon que les profits de la période sont supérieurs ou inférieurs à ceux de la période précédente. Seul le triplet de probabilités correspondant à l'état de la nature observé au début de la période est révisé. Ce "renforcement" est le moyen par lequel les firmes apprennent de leurs succès et de leurs erreurs.

Un "niveau de renforcement" ( $\delta$ ) doit être fixé avant le début d'une simulation. Il correspond à la valeur qui sera ajoutée (resp. retranchée) à la probabilité associée à la dernière action entreprise si les profits ont augmenté (diminué) par rapport à la période précédente. Nous avons fixé ce paramètre

---

<sup>3</sup>L'algorithme 1 est légèrement différent de l'algorithme d'*Aspen* ([Pryor et al. (1996)] et [Basu et al. (1996)]) puisque nous n'avons retenu que trois de leurs quatre variables observées. L'implantation de l'algorithme 1 est le résultat du travail de Vincent Trussart, étudiant à la maîtrise au Département d'Informatique et de Recherche opérationnelle de l'Université de Montréal (c.f. [Trussart (1999)]).

à  $\delta = 0, 1$ . En guise d'exemple, considérons le triplet de probabilités associé à l'un des huit états de la nature :

$$(p^a; p^d; p^c) = (0, 3; 0, 4; 0, 3)$$

où  $p^a$  est la probabilité d'augmenter le prix d'une unité,  $p^d$  est la probabilité de le diminuer d'une unité et  $p^c$  est la probabilité de le garder constant. Supposons qu'au début de la période la firme en question ait choisi (aléatoirement) d'augmenter son prix et que les profits de la période courante soient supérieurs à ceux de la période précédente. Un renforcement positif égal à 0,1 doit donc être donné à l'action "augmenter le prix". La transformation du triplet de probabilité se fait de la manière suivante :

$$(0, 3; 0, 4; 0, 3) \rightarrow (0, 4; 0, 35; 0, 25)$$

Si la probabilité  $p^a$  est augmentée de 0,1, la somme des deux autres probabilités doit diminuer de la même valeur pour maintenir le caractère exhaustif de la distribution, à savoir que  $p^a + p^d + p^c = 1$ . Nous avons choisi de réduire les deux autres probabilités d'une même valeur, soit 0,05. Formellement, les probabilités sont mises à jour (pour la période  $t+1$ ) de la manière suivante si le renforcement est positif et si l'action choisie à la période  $t$  est "augmenter le prix" :

$$\begin{aligned} p_{t+1}^a &= p_t^a + \delta \\ p_{t+1}^d &= p_t^d - \frac{\delta}{2} \\ p_{t+1}^c &= p_t^c - \frac{\delta}{2} \end{aligned}$$

De même, si le renforcement est négatif :

$$\begin{aligned} p_{t+1}^a &= p_t^a - \delta \\ p_{t+1}^d &= p_t^d + \frac{\delta}{2} \\ p_{t+1}^c &= p_t^c + \frac{\delta}{2} \end{aligned}$$

#### 4.2.1.2 Algorithme 2

À la prochaine section, nous comparerons la performance de l'algorithme 1 à celle de "l'algorithme 2"<sup>4</sup>, un algorithme génétique sans système de clas-

<sup>4</sup>L'algorithme 2 a été développé et implémenté par Marie Connolly et Natalie Guay au CIRANO, sous la direction de Jacques Robert. À la différence de l'algorithme 1, il a été

sement. Contrairement au précédent, l'algorithme 2 ne comporte pas de système de classement. Chacune des firmes possède plutôt une liste de  $h$  couples de la forme  $(p^l, P^l)$  où  $p^l$  est un prix compris dans l'intervalle  $[0, 350]$  et où  $P^l$  est une probabilité associée au prix  $p^l$  ( $l$  est un indice). Toutes ces probabilités sont initialement fixées à  $P^l = \frac{1}{h}$ . Dans le cadre des tests de convergence, nous utiliserons  $h = 20$ .

À chaque période, une firme choisit l'un des  $h$  prix de sa liste selon les probabilités qui leur sont associées. À la fin de la période, les profits courants sont comparés aux profits de la période précédente et, comme dans l'algorithme 1, un renforcement positif ou négatif est donné au prix utilisé. Le niveau de renforcement choisi dans le cadre de l'algorithme 2 est  $\delta = 0,5$ . Ce niveau de renforcement est ensuite pondéré par l'une ou l'autre des valeurs suivantes :

1. la probabilité associée au prix utilisé à la période précédente ( $P_t^{l(t-1)}$ ) si le renforcement est positif;
2. la probabilité associée au prix utilisé à la période courante ( $P_t^{l(t)}$ ) si le renforcement est négatif.

$l(t)$  dénote le couple choisi à la période  $t$ . L'utilisation de  $P_t^{l(t-1)}$  dans un cas et de  $P_t^{l(t)}$  dans l'autre sert tout simplement à assurer que chaque probabilité est toujours comprise dans l'intervalle  $]0, 1[$ . Un renforcement inversement proportionnel est également administré au prix utilisé à la période précédente de manière à ce que le caractère exhaustif de la distribution soit respecté, soit  $\sum_{l=1}^h P^l = 1$ . Considérons un exemple avec  $h = 3$  et les couples suivants, de la forme  $(p^l; P^l)$  :

- |   |   |             |
|---|---|-------------|
| 1 | : | (76; 0, 2)  |
| 2 | : | (127; 0, 6) |
| 3 | : | (221; 0, 2) |

Supposons que le couple 1 soit utilisé à la période courante et que les profits de la période courante soient supérieurs à ceux de la période précédente où le couple 2 avait été utilisé. Les probabilités sont mises à jour de la manière

---

implémenté dans l'environnement de simulation générique *SWARM*, développé au Santa Fe Institute.



suivante pour la période suivante ( $t + 1$ ) :

- 1 : (76; 0.2)  $\rightarrow$  (76; 0, 2 + 0, 5  $\times$  0, 6)  $\rightarrow$  (76; 0, 5)
- 2 : (127; 0.6)  $\rightarrow$  (127; 0, 6 - 0, 5  $\times$  0, 6)  $\rightarrow$  (76; 0, 3)
- 3 : (221; 0.2)  $\rightarrow$  (221; 0, 2)

Si les profits avaient diminué plutôt qu'augmenté, nous aurions eu :

- 1 : (76; 0.2)  $\rightarrow$  (76; 0, 2 - 0, 5  $\times$  0, 2)  $\rightarrow$  (76; 0, 1)
- 2 : (127; 0.6)  $\rightarrow$  (127; 0, 6 + 0, 5  $\times$  0, 2)  $\rightarrow$  (76; 0, 7)
- 3 : (221; 0.2)  $\rightarrow$  (221; 0, 2)

Formellement, les probabilités sont mises à jour de la manière suivante si le renforcement est positif :

$$\begin{aligned} P_{t+1}^{l(t)} &= P_t^{l(t)} + \delta P_t^{l(t-1)} \\ P_{t+1}^{l(t-1)} &= P_t^{l(t-1)} - \delta P_t^{l(t-1)} \end{aligned}$$

Si le renforcement est négatif, nous avons :

$$\begin{aligned} P_{t+1}^{l(t)} &= P_t^{l(t)} - \delta P_t^{l(t)} \\ P_{t+1}^{l(t-1)} &= P_t^{l(t-1)} + \delta P_t^{l(t)} \end{aligned}$$

La plus grande particularité de l'algorithme 2 par rapport à l'algorithme 1 est l'utilisation d'un algorithme génétique à toutes les  $A$  périodes pour renouveler la liste des prix de chaque firme. L'algorithme génétique tient compte de la performance passée de chacun des prix dans la détermination de la nouvelle liste, qui sera en vigueur pour les  $A$  prochaines périodes. Une fraction  $g$  des prix de la liste précédente est conservée dans la nouvelle liste. L'algorithme doit donc générer  $(1 - g)h$  nouveaux prix, qui viennent remplacer les moins performants de la liste précédente. Pour les tests de convergence, nous avons fixé ces paramètres aux valeurs suivantes :  $A = 500$  et  $g = 0, 5$ . Les nouvelles valeurs sont tirées d'une distribution normale  $X$  dont la moyenne et la variance sont celles des valeurs restantes (identifiées par un tilde), pondérées par leur probabilité :

$$X \sim N[\mu, \sigma^2] = N \left[ \sum_{l=1}^{gh} \frac{\tilde{P}^l}{\sum_{l=1}^{gh} \tilde{P}^l} \tilde{p}^l, \sum_{l=1}^{gh} \frac{\tilde{P}^l}{\sum_{l=1}^{gh} \tilde{P}^l} (\tilde{p}^l - \mu)^2 \right]$$

Toutes les probabilités de la nouvelle liste sont réinitialisées à  $P^l = \frac{1}{h}$ .

## 4.2.2 Modélisation du comportement des individus

Comme l'emphase de ce premier modèle est mise sur le marché du bien, les individus – à l'instar des firmes – sont actifs sur ce seul marché. Le marché du travail est simplifié à l'extrême : les  $n$  individus sont soit propriétaires d'une firme ( $m$  individus), soit employés par l'une des firmes ( $me$  individus) ou par le gouvernement ( $e$  individus). Ainsi,  $(m + 1)e + m = n$ . Rappelons que les  $m$  propriétaires ne sont pas actifs sur le marché du bien et qu'ils épargnent la totalité de leur revenu. Quant aux  $n - m$  autres individus (les travailleurs-consommateurs), ils ont la fonction de demande suivante à chaque période :

$$x_i = \frac{w}{\hat{p}_i} \quad (4.1)$$

où  $\hat{p}_i$  est le prix chargé par l'entreprise choisie par l'individu  $i$ . Chaque individu achète la production d'une seule entreprise à chaque période et y dépense la totalité de son revenu disponible. Un individu choisit l'entreprise où il achète selon la distribution de probabilités suivante :

$$P_j = P[\text{acheter de } j] = \frac{k}{(p_j)^q} \quad (4.2)$$

où  $k = \frac{1}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}}$  est une constante de normalisation telle que  $\sum_{j=1}^m P_j = 1$ .

## 4.2.3 Modélisation du gouvernement

La seule fonction du gouvernement est d'employer  $e$  individus au taux de salaire journalier  $w$ . Il n'y a pas de taxes dans ce premier modèle. L'agent "gouvernement" a été créé dans la perspective où il assumera d'importantes fonctions de taxation et de redistribution dans *Ecosim 2*. C'est également parce que l'analyse de la problématique des taxes sur la masse salariale est l'objectif ultime de ce travail qu'un marché du travail embryonnaire a été inclus, même à ce stade préliminaire de développement.

## 4.2.4 Séquence des actions

À chaque période, les différentes actions des trois types d'agents du modèle se déroulent dans l'ordre chronologique suivant :

1. Les salaires sont versés aux comptes des individus (les comptes des entreprises et du gouvernement sont ajustés en conséquence).
2. Les entreprises fixent leurs prix selon l'algorithme d'apprentissage.
3. Chaque individu choisit la firme où il va acheter et sa quantité demandée.
4. La réalisation des échanges se concrétise par un transfert d'argent des individus vers les firmes (les comptes sont ajustés en conséquence), chaque entreprise étant toujours en mesure de répondre à toute la demande.
5. Les profits (ou pertes) des entreprises sont calculés et imputés aux comptes des propriétaires.

Le seul élément dynamique de ce modèle est la détermination du prix par chacune des entreprises, où toute l'histoire du jeu est prise en considération par l'algorithme d'apprentissage.

#### 4.2.5 Paramétrisation

La paramétrisation d'un engin de simulation diffère selon l'objectif qui est visé par son utilisateur. S'il cherche à prévoir le comportement d'une économie réelle (par exemple, le Québec ou l'industrie de l'essence à Montréal), le modèle doit être *calibré* avec précision à l'aide de paramètres estimés économétriquement sur des données appropriées. Ce n'est pas notre cas puisque notre entreprise se veut essentiellement exploratoire et théorique. Des valeurs d'initialisation raisonnables sont donc utilisées. En particulier, elles seront déterminées dans le but d'assurer la cohérence interne du modèle.

*Ecosim 1* compte les six variables exogènes suivantes :  $n, e, m, w, q, c$ . Ces paramètres sont fixés avant le lancement d'une simulation. Il compte également quatre vecteurs de variables endogènes :  $\boldsymbol{\pi}, \mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{d}$ . La valeur de ces variables change à chaque période d'une simulation. Seulement avec l'algorithme 1, une valeur d'initialisation doit toutefois être déterminée pour le vecteur  $\mathbf{p}$ . La valeur initiale du prix de chaque firme est tirée d'une distribution de probabilité uniforme :  $p_j \sim U[130, 170]$ . Le tableau suivant répertorie les valeurs que nous avons choisies pour les paramètres exogènes du modèle.

Variable	Description	Valeur
$n$	Nombre d'individus	504
$e$	Nombre d'employés d'une firme ou du gouvernement	100
$m$	Nombre de firmes	4
$w$	Salaire journalier	100
$q$	Paramètre de la fonction de demande	Variable
$c$	Coût marginal	100

Le paramètre  $q$  prendra plusieurs valeurs au cours des tests de convergence. Cette variation permettra de tester la robustesse de chacun des algorithmes d'apprentissage. Ce paramètre est particulièrement intéressant car il peut être interprété comme un indice de la "férocité" de la concurrence sur le marché du bien. En effet, plus  $q$  est élevé, plus il est avantageux pour une firme de charger le prix le plus faible et plus la part de marché de cette firme sera grande. En d'autres termes, un marché avec un  $q$  élevé est plus "concurrentiel" qu'un autre avec un  $q$  faible. Pryor (1998) a construit le petit exemple suivant avec une fonction de demande identique à la nôtre.

Firme	Prix	$q = 8$	$q = 9$
1	16	61%	65%
2	18	23%	22%
3	20	11%	9%
4	22	5%	4%

Dans ce tableau, les prix ont été fixés arbitrairement et les deux dernières colonnes présentent les parts de marché. On y constate facilement que le fait d'augmenter  $q$  exacerbe la concurrence en accroissant l'avantage dont bénéficie la firme dont le prix est le plus faible.

### 4.3 Tests de convergence

L'objectif principal de ce modèle simple est de permettre la comparaison entre les résultats des simulations et les résultats prédits par la théorie. Les tests de convergence seront effectués pour les deux algorithmes présentés à la section précédente et pour plusieurs valeurs du paramètre  $q$ . Avant de passer aux tests de convergence proprement dits, une formule pour calculer les prix d'équilibre théoriques doit d'abord être dérivée.

### 4.3.1 Équilibre théorique

Compte tenu du nombre de firmes ( $m = 4$ ), nous faisons incontestablement face à un problème d'oligopole. Il faut donc calculer l'équilibre stratégique du marché. Le modèle présenté dans cette section est suffisamment simple pour que l'équilibre puisse en être calculé analytiquement. Rappelons l'expression des profits de l'entreprise  $j$  :

$$\pi_j = p_j x_j - C(x_j) = p_j x_j - we - cx_j \quad (4.3)$$

Comme l'entrée et la sortie du marché ne sont pas modélisées, les firmes ne maximisent que leurs coûts variables ( $cx_j$ ). Si l'on fait abstraction des coûts fixes ( $we$ ), le problème auquel une firme fait face est le suivant :

$$\max_{\{p_j\}} \pi_j = (p_j - c)x_j \quad (4.4)$$

La demande à laquelle la firme est contrainte dépend de la probabilité que les consommateurs achètent leur produit. Cette probabilité est, rappelons-le, calculée de la manière suivante (équation 4.2) :

$$P_j = P(\text{acheter de } j) = \frac{k}{(p_j)^q}$$

Soit  $Q = \sum_{i=1}^n x_i$ , la quantité totale demandée par les consommateurs, nous avons la fonction de demande à la firme suivante :

$$x_j = P_j Q(\mathbf{p}) = \frac{k}{(p_j)^q} Q(\mathbf{p}) \quad (4.5)$$

où  $k/(p_j)^q$  peut s'interpréter comme la part de marché de l'entreprise  $j$  à une période donnée. Il importe de noter que, compte tenu de l'expression de la fonction de demande des consommateurs que nous avons retenue (équation 4.1 :  $x_i = w/\hat{p}_i$ ),  $Q$  est une fonction du vecteur de prix  $\mathbf{p}$ , mais pas du paramètre  $q$ .

Exprimons maintenant la constante de normalisation  $k$  de manière explicite en fonction des prix. De l'équation 4.2 et du caractère exhaustif de la distribution, nous avons l'égalité suivante :

$$\sum_{j=1}^m P_j = \sum_{j=1}^m \frac{k}{(p_j)^q} = 1 \quad (4.6)$$

En isolant  $k$  dans cette équation, on obtient :

$$k = \frac{1}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}} \quad (4.7)$$

En remplaçant dans l'équation 4.5, nous avons :

$$x_j = \frac{(p_j)^{-q}}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}} Q(\mathbf{p}) \quad (4.8)$$

À l'équilibre stratégique, comme toutes les firmes sont identiques nous aurons  $p_j = p_k \forall j, k$ . Nous avons donc, pour les  $m$  travailleurs-consommateurs de l'économie :

$$Q = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{w}{\hat{p}_i} = \sum_{i=1}^n \frac{w}{p_j} = \frac{mew}{p_j} \quad (4.9)$$

L'équation 4.8 peut donc être réécrite de la manière suivante pour une entreprise à l'équilibre stratégique :

$$x_j^* = \frac{(p_j)^{-q}}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}} \cdot \frac{mew}{p_j} = \frac{(p_j)^{-q-1}}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}} \cdot mew \quad (4.10)$$

où  $mew$  est le revenu disponible de l'ensemble des consommateurs.

Remplaçons cette expression dans la fonction d'objectif (équation 4.4) :

$$\pi_j = (p_j - c) \frac{(p_j)^{-q-1}}{\sum_{j=1}^m p_j^{-q}} \cdot mew \quad (4.11)$$

La condition du premier ordre implique le prix d'équilibre suivant, identique pour toutes les entreprises :

$$p_j^* = \frac{c(m(-q-1) + q)}{q(1-m)} \quad (4.12)$$

En remplaçant dans cette expression les paramètres exogènes par leurs valeurs respectives (valeurs énumérées ci-haut et  $q = 5$  aux fins de cet exemple), nous obtenons :

$$p_j^* = \frac{100(4(-5-1) + 5)}{5(1-4)} = 100 \cdot \frac{19}{15} \approx 126,67$$

### 4.3.2 Choix de l'algorithme d'apprentissage

Dans cette section, nous testons la capacité d'*Ecosim 1* à se stabiliser plus ou moins rapidement dans le voisinage des valeurs prédites par la théorie (équation 4.12) avec les algorithmes 1 et 2.

#### 4.3.2.1 Performance de l'algorithme 1

Le test de convergence que nous avons fait subir à l'algorithme 1 se compose de huit séries de simulations correspondant à huit valeurs du paramètre  $q$ , soit  $q = 1, \dots, 8$ . Pour chacune de ces valeurs de  $q$ , une dizaine de simulations ont été effectuées (ce nombre varie selon la durée des simulations). Lors de chaque simulation, le prix d'équilibre a été calculé en faisant la moyenne des prix moyens de l'industrie entre les itérations 1000 et 5000. Les résultats qui sont présentés dans le tableau suivant sont tout simplement la moyenne des résultats de chacune des simulations d'une série. Les prix d'équilibres "simulés" apparaissent dans la deuxième colonne du tableau. Les prix qui se retrouvent dans la troisième colonne du tableau sont les valeurs d'équilibre théoriques (équilibre de Nash), calculés à l'aide de la formule 4.12. Le tableau rapporte enfin la marge d'erreur des simulations. Elle est calculée en divisant la différence entre les valeurs des deuxième et troisième colonnes par la valeur de la deuxième. Ces quotients sont exprimés en pourcentages.

valeur de $q$	simulations	théorie	marge d'erreur
1	149,0	233,3	36,1%
2	142,5	166,7	14,5%
3	134,9	144,4	6,6%
4	128,5	133,3	3,6%
5	126,8	126,7	0,1%
6	122,2	122,2	0,0%
7	119,0	119,0	0,0%
8	116,2	116,7	0,4%

À la lumière de ce test de convergence, on constate que le prix simulé se stabilise autour du prix d'équilibre théorique avec une marge d'erreur infime lorsque  $q \geq 5$ . Toutefois, pour des valeurs de  $q$  inférieures à 5, la précision des simulations diminue sensiblement jusqu'à atteindre une marge d'erreur de 36,1% lorsque  $q = 1$ . Un  $q$  faible implique une fonction de profit individuelle

faiblement concave puisque la concavité de la fonction de profit croît avec la valeur de  $q$ . Étant donné l'instabilité de leur environnement économique et le caractère rudimentaire de l'algorithme d'apprentissage, les firmes n'arrivent pas à en approximer correctement le maximum lorsque  $q$  est faible. Rappelons que dans l'algorithme 1, les variations de prix sont fixées à  $\Delta p = 1$ . Lorsque la pente de la fonction de profit est faible (c'est le cas avec une petite valeur de  $q$ ), hausser le prix demandé d'une unité a peu d'impact sur les profits d'une firme individuelle. Il est plausible que le "bruit" résultant des actions des autres sur le marché soit alors d'une amplitude suffisante pour brouiller la qualité du renforcement.

Ce test de convergence montre les limites de l'algorithme d'apprentissage d'*Aspen*, ce que ses concepteurs n'avaient pas cru bon de documenter formellement dans [Basu et al. (1996)]. La question de la robustesse de l'algorithme d'apprentissage y est réglée en quelques mots :

Under steady-state demand conditions, a unique equilibrium of the game occurs [...] In fact, when Sandia [Laboratories] ran a prototype version of Aspen (described in [Pryor et al. (1996)]) with two food firms, prices hovered near these values. Here, the genetic algorithms lead to prices dictated by the theory. [Basu et al. (1996), p. 19]

Or, nos tests de convergence révèlent que cette ascertainment n'est vérifiée que sur une certaine portion du domaine des paramètres du modèle, soit lorsque  $q \geq 5^5$ . Autrement, la complexité du système économique modélisé est trop grande par rapport à la puissance de l'algorithme d'apprentissage.

**Remarque sur les cycles économiques** La figure 4.1 montre le type de séries temporelles qu'une simulation avec l'algorithme 1 génère.

On remarque sur cette figure que les prix ne convergent pas asymptotiquement vers une valeur d'équilibre, mais qu'ils oscillent plutôt autour d'un niveau d'équilibre stationnaire. Quant à ce genre de comportement des variables de leur modèle de développement, les concepteurs d'*Aspen* prétendent :

[...] The results demonstrate the ability of the prototype model to predict business-like cycles in an economy where prices and

---

<sup>5</sup>Il importe de spécifier ici que les résultats d'*Aspen* ne peuvent être discrédités sur cette base puisque les simulations documentées utilisent  $q = 5$ . Voir [Basu et al. (1996), p. A-3].



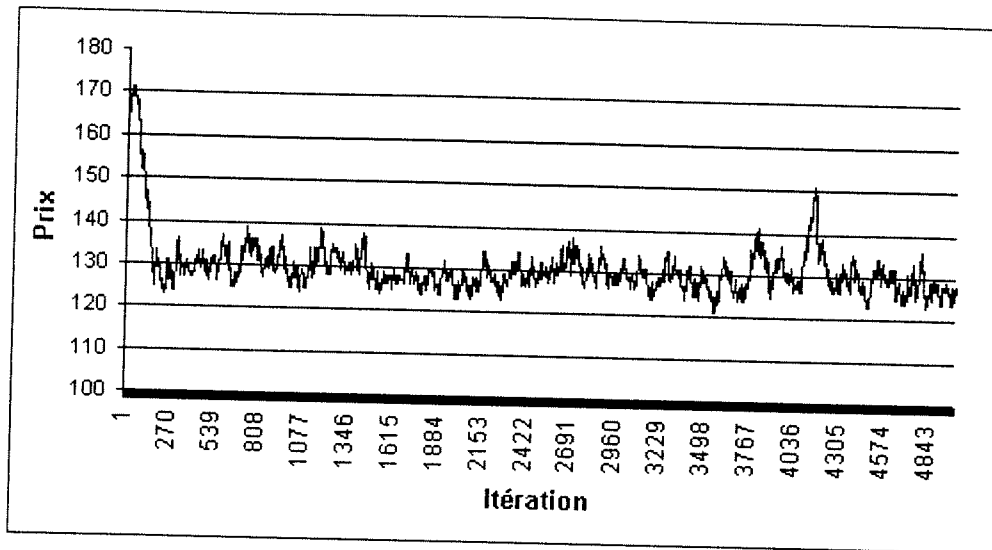


FIG. 4.1: Série temporelle générée par *Ecosim 1* avec l'algorithme 1

inventories are allowed to vary. Since most economic forecasting models have great difficulty predicting any kind of cyclic behavior, these results are highly encouraging. [Pryor et al. (1996), pp. 4-5]

Cette prétention commande une remarque de notre part. À l'exception des inventaires, que nous avons négligés, notre modèle est composé des mêmes objets économiques que le *prototype model* d'*Aspen*. Sur la figure 4.1, nous observons nous aussi que le prix moyen a un comportement cyclique. Il est toutefois important de réaliser que ces cycles ne peuvent être expliqués à l'aide de la théorie macroéconomique. Ils sont en fait la conséquence directe de l'architecture de l'algorithme 1. L'algorithme 1 est peu sophistiqué et l'apprentissage y est relativement lent. Pour illustrer notre propos, considérons l'exemple suivant. Supposons que son environnement économique dicte à une firme d'augmenter son prix pendant un certain nombre de périodes pour rattraper un retard par rapport au reste de l'industrie. Il existe un point de retournement – lorsqu'elle aura rattrapé son retard – où augmenter son prix n'est plus optimal et commence à affecter négativement ses profits. Comme la firme a appris pendant plusieurs périodes qu'augmenter son prix était une "bonne" stratégie, il lui prendra un certain temps pour réaliser que cette action, qui était bonne dans le passé, ne l'est plus désormais. Les déviations cycliques observées autour de l'équilibre sont le résultat de ce mécanisme,

conséquence du type d'algorithme d'apprentissage utilisé. Elles ont donc probablement bien peu à voir avec les fluctuations économiques observées dans la réalité.

#### 4.3.2.2 Performance de l'algorithme 2

La performance de l'algorithme 2 a été évaluée de manière similaire à celle de l'algorithme 1, à quelques différences près toutefois. D'abord, la liste de prix initiale n'est pas générée aléatoirement à chaque simulation. La même liste de prix est donc utilisée à chaque fois. L'algorithme 2 a été programmé de manière à permettre plusieurs répétitions de la même simulation en obtenant chaque fois des résultats exactement identiques. En fait, avec une même liste de prix initiale, toutes les simulations seront identiques. Les résultats présentés ici sont donc ceux de huit simulations seulement, soit une par valeur du paramètre  $q$ . De plus, les prix moyens sont calculés de manière légèrement différente. Après chaque application de l'algorithme génétique (à toutes les 500 périodes), une courte phase d'exploration a lieu. Afin d'exclure ces phases d'exploration du calcul des résultats, le prix moyen est d'abord calculé sur les cinq intervalles suivants : [2250,2500], [3250,3500], [4250,4500], [5250,5500] et [6250,6500]. On fait ensuite la moyenne de ces cinq intervalles. Les résultats des huit simulations sont présentés dans le tableau suivant.

valeur de $q$	simulations	théorie	marge d'erreur
1	231,8	233,3	0,6%
2	169,4	166,7	1,6%
3	146,7	144,4	1,6%
4	134,7	133,3	1,1%
5	126,3	126,7	0,3%
6	123,0	122,2	0,7%
7	119,0	119,0	0,0%
8	116,3	116,7	0,3%

Cet autre tableau permet de comparer directement la marge d'erreur des simulations avec les deux algorithmes.

valeur de $q$	algorithme 1	algorithme 2
1	36,1%	0,6%
2	14,5	1,6
3	6,6	1,6
4	3,6	1,1
5	0,1	0,3
6	0,0	0,7
7	0,0	0,0
8	0,4	0,3

Contrairement à l'algorithme 1, l'algorithme 2 est non seulement performant avec  $q \geq 5$ , mais aussi avec  $q < 5$ . L'apparente supériorité l'algorithme 1 sur l'algorithme 2 pour  $q \in [5, 8]$ , aussi légère soit-elle, mérite quelques commentaires. Deux facteurs jouent en "faveur" de l'algorithme 1 dans nos tests de convergence. En premier lieu, l'algorithme 1 tient compte de l'environnement économique avant de commander une action. L'observation se fait par le biais du système de classement, qui définit divers états de la nature qu'il reconnaît tout au long d'une simulation. Intuitivement, un tel algorithme devrait très bien performer lorsque les conditions de l'environnement économique sont claires et facilement identifiables. Par oppositon, l'algorithme 2 ne tient pas compte de l'état de l'environnement avant de choisir une action. Il apprend en quelque sorte à l'aveuglette, ce qui pourrait expliquer sa moins grande précision (relativement à l'algorithme 1) lorsque la concavité de la fonction de profit est grande (lorsque  $q$  est grand).

La petite différence que l'on observe entre la performance des deux algorithmes pour de grandes valeurs de  $q$  s'explique peut-être aussi tout simplement parce que beaucoup plus de simulations ont été effectuées pour calculer la marge d'erreur de l'algorithme 1. En effet, il s'agirait probablement de varier la liste de prix initiaux de l'algorithme 2 pour obtenir une meilleure précision. Toutefois, il nous semble clair que la puissance de l'algorithme 2 est globalement supérieure. C'est donc ce dernier algorithme que nous avons retenu pour *Ecosim 2*, qui est un modèle sensiblement plus complexe. Le chapitre suivant présente les résultats obtenus avec ce second modèle.

# Chapitre 5

## Facteurs influant sur le report du fardeau de la taxe

Suite aux résultats concluants des tests de convergence avec l'algorithme 2, nous avons entrepris le développement d'*Ecosim 2*. Ce second engin de simulation combine le modèle économique présenté au chapitre 3 et une adaptation de l'algorithme 2 (c.f. section 4.2.1.2). Cet algorithme d'apprentissage est décrit à la prochaine section. Le reste du chapitre est consacré aux résultats des simulations. De ces résultats, nous tirons des propositions concernant l'influence de certains facteurs sur le processus de report du fardeau des taxes sur la masse salariale. Les facteurs suivants sont analysés : la concurrence entre les firmes sur le marché du travail, la mobilité des travailleurs entre les firmes et le niveau des prestations de sécurité sociale.

### 5.1 Description d'*Ecosim 2*

Dans cette section, nous discuterons brièvement de l'algorithme d'apprentissage d'*Ecosim 2*, de la paramétrisation des simulations, des différentes données calculées par le système aux fins de l'analyse et du calcul du taux de report.

#### 5.1.1 Algorithme d'apprentissage

Tel qu'expliqué au chapitre 3, les firmes d'*Ecosim 2* prennent deux décisions simultanées sur le marché du travail à chaque période : leur nombre

d'employés ( $e_j$ ) et le salaire qu'elles offrent ( $w_j$ ). Ces deux décisions sont prises à l'aide d'un seul algorithme d'apprentissage, dérivé de l'algorithme 2 d'*Ecosim 1*. L'algorithme d'*Ecosim 2* diffère toutefois de l'algorithme 2 à quelques égards.

Comme deux variables doivent être déterminées, chaque firme dispose d'une liste de  $h$  triplets plutôt que d'une liste de couples. Chacun de ces triplets comprend une valeur pour les deux variables de décision ainsi qu'une probabilité. La liste initiale est constituée à partir des distributions de probabilités uniformes suivantes :

$$w^l \sim U[500, n]$$

$$e^l \sim U\left[\frac{\left(\frac{n}{m+1} + 100\right)}{2}, \frac{n}{m+1} + \frac{n}{2}\right]$$

La probabilité initiale associée à chacun des triplets est la même que dans l'algorithme 2 ( $P^l = \frac{1}{h}$ ). Les probabilités de la liste sont également mises à jour de la même manière. Rappelons que les profits nets d'une firme, qui interviennent dans la mise à jour des probabilités, sont calculés selon l'équation 3.5 :

$$\pi_j^t = (1 - \varphi) [p^t q_j^t - (1 + \tau) w_j^t e_j^t]$$

À chaque  $A$  périodes, un algorithme génétique d'apprentissage intervient. Ses fonctions sont exactement les mêmes que dans l'algorithme 2. Les nouvelles valeurs  $e^l$  et  $w^l$  sont tirées de la distribution normale  $Y$  suivante :

$$Y \sim N[\mu, \sigma^2] = N\left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{gh} \frac{\tilde{P}_j^l}{\sum_{l=1}^{gh} \tilde{P}_j^l} \tilde{y}_j^l, \frac{100}{1 + \frac{t}{100}} \sum_{l=1}^{gh} \frac{\tilde{P}^l}{\sum_{l=1}^{gh} \tilde{P}^l} (\tilde{y}^l - \mu)^2\right]$$

où  $\tilde{y}^l$  désigne les valeurs restantes du nombre d'employés ou du salaire et  $t$  est la période courante. Il y a deux différences entre la distribution  $Y$  et la distribution  $X$  de l'algorithme 2. D'abord, la moyenne est calculée sur toutes les firmes alors que ce n'était pas le cas pour l'algorithme 2. Ensuite, la variance de la distribution est multipliée par un facteur qui décroît dans le temps. Ces modifications mineures sont toutes deux destinées à faciliter la convergence du système, étant donné sa plus grande complexité. Tous les autres paramètres de l'algorithme d'apprentissage ( $h = 20$ ,  $A = 500$ ,  $g = 0, 5$  et  $\delta = 0, 5$ ) sont conservés.

### 5.1.2 Paramétrisation

Le tableau suivant répertorie les valeurs d'initialisation qu'il est nécessaire de fixer.

Variable	Description	Valeur
$m$	Nombre de firmes	Variable
$n$	Nombre d'individus	1000
$c$	Paramètre de l'offre de travail (chômage)	5
$r$	Paramètre de l'offre de travail (firme d'origine)	Variable
$s$	Paramètre de l'offre de travail (autres firmes)	5
$T$	Prestation de sécurité sociale	Variable
$\alpha$	Productivité du travail	1
$\varphi$	Taux de l'impôt sur les profits	0,1
$\rho$	Taux de l'impôt sur le revenu des particuliers	0,5
$\tau$	Taux de la taxe sur la masse salariale	Variable

Lorsque la mention "variable" apparaît dans la colonne "valeur", des valeurs différentes seront utilisées selon les simulations. Toutes les variables prennent une valeur fixe pour la durée d'une simulation ; à l'exception du taux de la taxe sur la masse salariale, qui peut changer (de façon exogène et pré-déterminée) au cours d'une simulation.

### 5.1.3 Données agrégées

Les données agrégées suivantes peuvent être calculées à chaque période  $t$  :

1. Le salaire moyen de l'industrie :  $W^t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j^t$
2. Les profits moyens de l'industrie :  $\bar{\pi}^t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \pi_j^t$
3. Le nombre de chômeurs volontaires ( $V^t$ )
4. Le nombre de chômeurs involontaires :  $U^t = \sum_{j=1}^m U_j^t = \sum_{j=1}^m (N_j^t - e_j^t)$
5. Les recettes de la taxe sur la masse salariale :  $R_\tau^t = \tau^t e^t \mathbf{w}^t$
6. Les recettes de l'impôt sur le revenu :  $R_\rho^t = \rho e^t \mathbf{w}^t$
7. Les recettes de l'impôt sur les profits :  $R_\varphi^t = \varphi \sum_{j=1}^m \pi_j^t$
8. Le surplus/déficit du gouvernement (selon l'équation 3.6) :

$$S^t = G^t - G^{t-1} = \underbrace{R_\tau^t + R_\rho^t + R_\phi^t}_{\text{revenus}} - \underbrace{T^t(V^t + U^t)}_{\text{dépenses}}$$

Nous disposons de ces huit séries de données pour analyser les résultats de chaque simulation.

### 5.1.4 Calcul du taux de report

Pour analyser quantitativement les données des simulations, nous calculons le taux de report de la taxe vers les employés ( $s$ , pour respecter la notation de [Brittain (1971)]). Dans ce rapport, nous négligerons l'impact de la taxe sur le prix du bien  $p^t$  pour nous concentrer uniquement sur la variation des salaires. Dans les simulations qui sont présentées à la prochaine section, l'impact de la variation de la taxe sur la production des firmes, et par conséquent sur le prix du bien, est faible et de très courte durée pour le scénario 1 et quasi inexistant pour le scénario 2. À l'équilibre, le report sur les salaires est toujours le seul effet durable. Cette simplification n'entraîne donc pas à notre avis de perte de généralité.

Soit  $\tau^0$  le taux initial et  $\tau^1$  le nouveau taux de la taxe sur la masse salariale. Si le report de la taxe sur les salaires est complet, nous devons avoir :

$$\begin{aligned} (1 + \tau^1)W^t &= (1 + \tau^0)W^0 \\ \text{ou } W^t &= \frac{(1 + \tau^0)}{(1 + \tau^1)}W^0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

où  $W^0$  et  $W^t$  sont les salaires moyens de l'industrie respectivement à l'équilibre *ex ante* et à la période à laquelle le taux de report est calculé. Si le taux de report est nul, nous aurons plutôt :

$$W^t = W^0 \quad (5.2)$$

Comme à la section 4.3.2.2, les salaires moyens sont calculés sur les intervalles précédant immédiatement l'application d'un algorithme génétique d'apprentissage, de manière à obtenir les résultats les plus précis possibles. Rappelons que l'application de l'algorithme génétique est généralement suivi d'une période d'exploration où la variance des données est plus grande. Pour

toutes les simulations présentées dans ce chapitre, le changement du taux de la taxe survient à la période 2,000. Par conséquent,  $W^0$  est calculé sur l'intervalle [1750, 2000] et  $W^t$  est calculé pour chacun des huit intervalles suivants : [2250, 2500], [2750, 3000], [3250, 3500], [3750, 4000], [4250, 4500], [4750, 5000], [5250, 5500] et [5750, 6000].

En supposant que  $W^t$  peut être exprimé comme une combinaison linéaire de ses deux valeurs extrêmes (équations 5.1 et 5.2), le taux de report  $s$  solutionne l'équation suivante :

$$W^t = s \frac{(1 + \tau^0)}{(1 + \tau^1)} W^0 + (1 - s) W^0 \quad (5.3)$$

Après quelques manipulations algébriques, nous obtenons la formule suivante, que nous utiliserons pour calculer le taux de report :

$$s = \frac{W^t - W^0}{W^0} \cdot \frac{(1 + \tau^1)}{(1 + \tau^0)} \quad (5.4)$$

## 5.2 Résultats des simulations

La présentation des résultats des simulations effectuées avec *Ecosim 2* s'articule autour de deux scénarios : (i) une hausse du taux de la taxe et (ii) une baisse du taux de la taxe. Trois facteurs pouvant potentiellement influencer les conditions de la transition entre les équilibres *ex ante* et *ex post* sont étudiés : la concurrence entre les firmes sur le marché du travail, le niveau des prestations de sécurité sociale et la mobilité des travailleurs. Cinq propositions sont tirées des résultats de ces simulations.

### 5.2.1 Scénario 1 : hausse du taux de la taxe

Dans ce premier scénario, le taux de la taxe sur la masse salariale passe de  $\tau = 0$  à  $\tau = 0,15$  à la période 2,000. L'objectif de ce scénario est de reproduire *grosso modo* une évolution de l'ordre de celle que le Québec a connue au cours des trois dernières décennies. Dans un premier temps, les variables du modèle qui n'avaient pas été paramétrisées à la section précédente seront fixées aux valeurs suivantes.



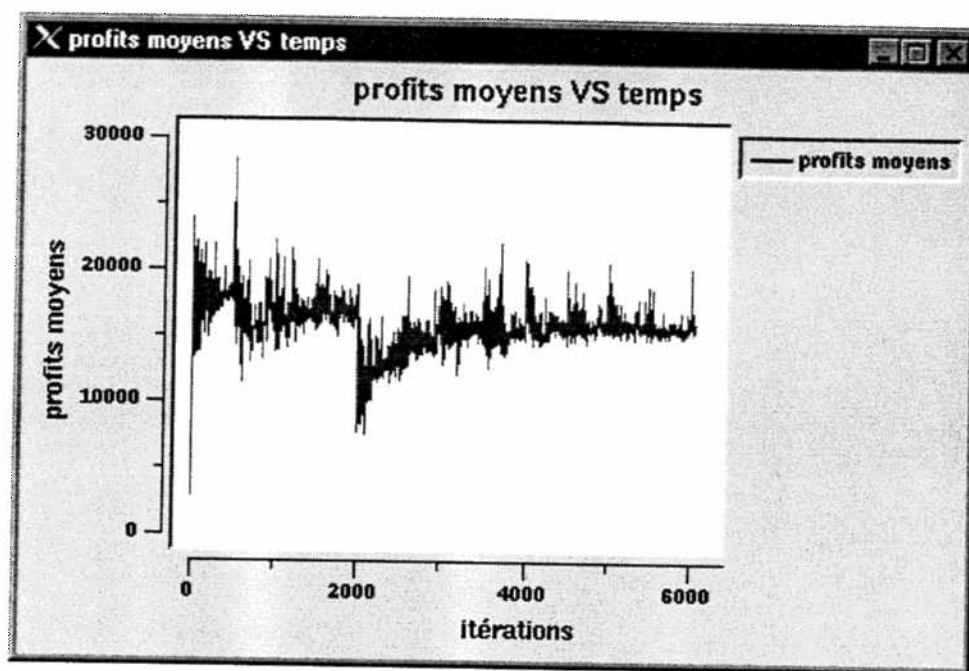


FIG. 5.1: Scénario 1 : profits moyens de l'industrie

Variable	Description	Valeur
$m$	Nombre de firmes	10
$r$	Paramètre de l'offre de travail (firme d'origine)	5
$T$	Prestation de sécurité sociale	500

Il en résulte un marché du travail où la concurrence entre les firmes est élevée ( $m = 10$ ) et où les individus sont *a priori* indifférents entre travailler pour l'une ou l'autre des firmes ou encore recevoir des prestations de sécurité sociale ( $r = s = c = 5$ ). Les figures 5.1 et 5.2 illustrent les résultats de cette première simulation<sup>1</sup>.

Sur le graphique des profits moyens, l'impact immédiat de la nouvelle taxe est très visible à la 2,000<sup>e</sup> période (itération). En comparant les deux graphiques, il est clair qu'un transfert du fardeau de la taxe s'est opéré des employeurs vers les employés. C'est justement ce phénomène, prédit par la

<sup>1</sup>Ces deux graphiques et tous ceux qui suivent sont des *screenshots* tirés du logiciel *SWARM*, la plate-forme générique de microsimulation que nous avons utilisée pour implémenter *Ecosim 2*.

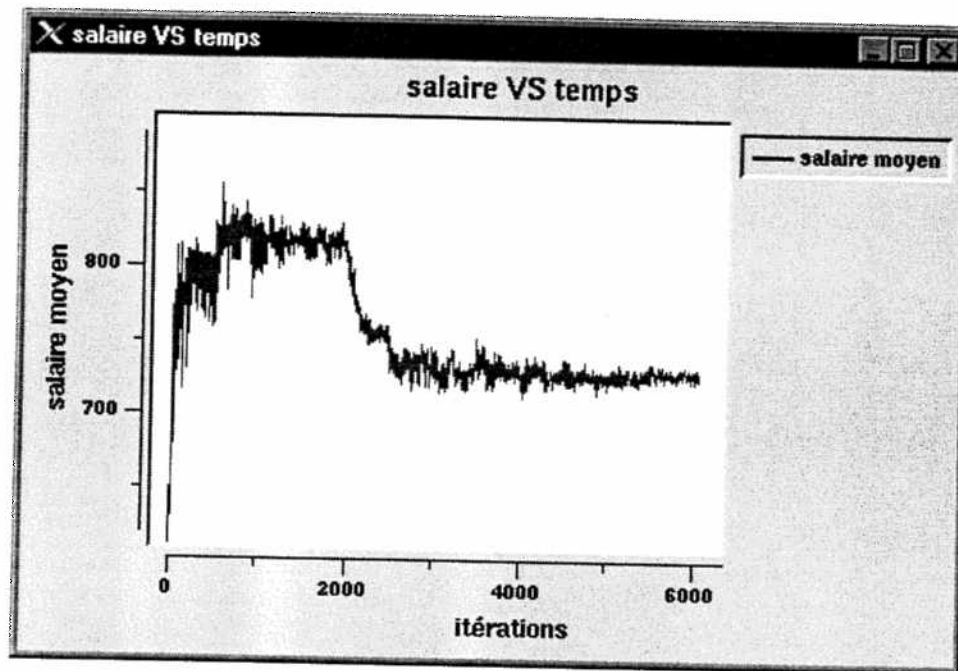


FIG. 5.2: Scénario 1 : salaire moyen de l'industrie

théorie néoclassique, que nous voulions représenter sous la forme d'un processus progressif. Le tableau suivant présente les résultats de cette première simulation. Les taux de report ( $s$ ) sont calculés selon la formule 5.4.

Intervalle	Taux de report (%)
2250-2500	58
2750-3000	77
3250-3500	82
3750-4000	79
4250-4500	79
4750-5000	83
5250-5500	82
5750-6000	82

Le nouvel équilibre est atteint dès l'intervalle [3250, 3500] et il diffère de l'équilibre prédit par la théorie néoclassique, à savoir un taux de report de

100%. Nous verrons avec le scénario 2 que le taux de report de 82% obtenu ici n'est pas le résultat d'une incapacité de l'algorithme d'apprentissage à reproduire les prévisions de la théorie. Dans le cas d'une hausse du taux de la taxe, deux forces agissent en sens contraire sur les salaires : le report progressif du fardeau de la taxe réduit les salaires, mais la concurrence entre les firmes pour attirer les travailleurs pousse les salaires à la hausse.

### 5.2.1.1 Concurrence entre les firmes sur le marché du travail

Pour illustrer l'impact du degré de concurrence entre les firmes sur le marché du travail, réduisons le nombre de firmes à  $m = 8$ . Le tableau suivant permet de comparer directement les résultats de cette simulation à ceux de la précédente.

Intervalle	$s$ (%) avec 10 firmes	$s$ (%) avec 8 firmes
2250–2500	58	54
2750–3000	77	76
3250–3500	82	90
3750–4000	79	89
4250–4500	79	89
4750–5000	83	95
5250–5500	82	93
5750–6000	82	91

Avec 8 firmes sur le marché plutôt que 10, le taux de report est supérieur d'environ 10%. Il semble donc qu'une forte concurrence limite la capacité des firmes à reporter le fardeau de la taxe aux travailleurs. La logique de cette proposition est intuitive : moins le nombre de firmes est grand, moins la concurrence est importante et plus grande est la marge de manœuvre des firmes pour reporter le fardeau de la taxe vers leurs employés. Comparons maintenant les résultats obtenus avec 8, 6 et 1 firmes.

Intervalle	8 firmes	6 firmes	1 firme
2250–2500	54	58	8
2750–3000	76	69	12
3250–3500	90	81	18
3750–4000	89	91	15
4250–4500	89	92	12
4750–5000	95	92	10
5250–5500	93	94	10
5750–6000	91	90	9

Paradoxalement, la réduction du nombre de firmes de 8 à 6 ne semble pas avoir d'impact significatif sur le taux de report. Quant à la réduction du nombre de firmes de 6 à une seule, il atténue presque complètement le processus de report plutôt que de l'accroître. D'autres facteurs agissent donc en sens inverse. L'un d'entre eux est le niveau des prestations de sécurité sociale, auxquelles est consacrée la prochaine sous-section. Un second facteur est la manière dont les firmes fixent leur salaire dans un marché très peu concurrentiel. Lorsqu'il y a très peu de concurrence entre les firmes, la stratégie optimale consiste à offrir un salaire tout juste suffisant pour que les individus acceptent de travailler. Si une hausse de taxes survient sur un tel marché, les firmes ne peuvent refiler leur fardeau en baissant les salaires puisque ceux-ci sont déjà à leur minimum. C'est principalement ce mécanisme qui agit lorsque la structure de marché s'approche du monopsonne (cas à une firme). Considérant cette remarque, nous pouvons maintenant formuler une première proposition :

**Proposition 1.** *Toutes autres choses étant égales par ailleurs et sur un marché du travail suffisamment concurrentiel, la capacité des employeurs à transférer le fardeau d'une hausse de la taxe générale sur la masse salariale est d'autant plus limitée que la concurrence entre les firmes sur le marché du travail est élevée.*

### 5.2.1.2 Niveau des prestations de sécurité sociale

On affirme souvent que les salaires nominaux sont rigides à la baisse, à cause notamment d'institutions comme le salaire minimum ou les négociations collectives. Notre modèle n'inclut pas cette hypothèse, mais un mécanisme semblable y opère par le biais des prestations de sécurité sociale. Sur le

marché du travail, même un monopsonne subit une certaine forme de concurrence implicite : celle du salaire d'option. Le salaire d'option est le "salaire" que reçoit un individu qui ne travaille pas. Il est composé en bonne partie de ce que nous appelons ici les prestations de sécurité sociale ( $T$ ). L'existence d'un tel salaire agit jusqu'à un certain point comme une borne inférieure au salaire qu'une firme peut offrir. Au fur et à mesure que le salaire de marché diminue, des travailleurs quittent volontairement le marché du travail pour se prévaloir de leur salaire d'option. Dans notre modèle, ce mécanisme opère parce qu'un individu a toujours une probabilité non nulle de quitter le marché du travail. Cette probabilité dépend du niveau des prestations de sécurité sociale (c.f. équation 3.3). C'est exactement ce qui se passe lorsque nous réduisons le nombre de firmes de 8 à 6 puis à 1.

Pour illustrer notre propos, comparons les taux de report d'un marché à 10 firmes avec et sans prestations de sécurité sociale.

Intervalle	$s$ (%) avec $T = 500$	$s$ (%) avec $T = 0$
2250–2500	58	62
2750–3000	77	82
3250–3500	82	91
3750–4000	79	95
4250–4500	79	90
4750–5000	83	97
5250–5500	82	100
5750–6000	82	93

Le fait de ramener les prestations de sécurité sociale à zéro a accru le taux de report à l'équilibre d'environ 15%. Notre seconde proposition découle de cette observation :

**Proposition 2.** *Toutes autres choses étant égales par ailleurs et sur un marché du travail suffisamment concurrentiel, la capacité des employeurs à transférer le fardeau d'une hausse de la taxe générale sur la masse salariale est d'autant plus limitée que le niveau du salaire d'option est élevé.*

La mention "sur un marché du travail suffisamment concurrentiel" fait référence aux remarques de la sous-section précédente concernant l'absence de marge de manœuvre des firmes agissant sur un marché du travail monopsonique. Les salaires y étant théoriquement déjà très bas, le processus de

report du fardeau de la taxe par le biais de salaires plus faibles ne peut avoir lieu.

### 5.2.1.3 Mobilité des travailleurs entre les firmes

Le modèle incorpore la mobilité des travailleurs entre les firmes par le biais des exposants  $r$  et  $s$ , qui interviennent dans le calcul de la probabilité qu'un individu change de firme, quitte le marché du travail ou continue à travailler pour la même firme qu'à la période précédente (c.f. équations 3.1, 3.2 et 3.3). Les travailleurs sont de moins en moins susceptibles de changer de firme – sont de moins en moins mobiles – au fur et à mesure que la différence ( $r - s$ ) s'accroît. Le tableau suivant présente les résultats de deux simulations où la valeur du paramètre  $r$  (firme d'origine) diffère, mais où la valeur de  $s$  (autres firmes) reste la même. Les valeurs  $m = 10$  et  $T = 500$  sont communes aux deux simulations.

Intervalle	$s$ (%) avec $r = 5$	$s$ (%) avec $r = 5, 7$
2250–2500	58	37
2750–3000	77	58
3250–3500	82	69
3750–4000	79	79
4250–4500	79	90
4750–5000	83	100
5250–5500	82	99
5750–6000	82	100

Avec  $r = 5, 7$ , la mobilité des travailleurs entre les firmes est plus faible qu'avec  $r = 5$ . À chaque période, chaque individu a en effet plus de chances de continuer à travailler pour sa firme d'origine. L'observation de ces résultats nous permet de formuler une troisième proposition :

**Proposition 3.** *Toutes autres choses étant égales par ailleurs et sur un marché du travail suffisamment concurrentiel, la capacité des employeurs à transférer le fardeau d'une hausse de la taxe générale sur la masse salariale est d'autant plus limitée que la mobilité des travailleurs entre les firmes est grande.*

Cette proposition est en quelque sorte un corollaire de la proposition 1. Lorsque les travailleurs sont plus mobiles, la concurrence entre les firmes sur

le marché du travail est plus grande. Il en découle une moins grande marge de manœuvre pour refile le fardeau de la taxe aux travailleurs.

### 5.2.2 Scénario 2 : baisse du taux de la taxe

Il est intuitif de parler du report du fardeau dans le cas d'une hausse de taxes. Étant donné l'histoire politique récente, la majorité des données dont disposent les économistes proviennent de cas de hausses de taxes. C'est par conséquent le cas des quatre études mentionnées au chapitre 2. Les conclusions obtenues pour une hausse de la taxe valent-elles également pour une baisse de la taxe? La présente section cherche à répondre à cette question. Dans le scénario 2, le taux de la taxe sur la masse salariale passe de  $\tau = 0,15$  à  $\tau = 0$  à la période 2,000, soit exactement l'inverse du scénario 1. Comme ce second scénario est clairement plus d'actualité que le précédent, nous tenterons d'en tirer quelques implications pour la politique fiscale.

Dans un premier temps, reprenons la première simulation de la section précédente ( $m = 10$ ,  $r = 5$  et  $T = 500$ ) avec une baisse de taxes et comparons les deux séries de résultats. Cette première simulation du scénario 2 est illustrée aux figures 5.3 et 5.4. Qualitativement, on observe des résultats symétriques à ceux du scénario 1. Le tableau suivant permet de comparer quantitativement les deux scénarios.

Intervalle	Scénario 1	Scénario 2
2250–2500	58%	38%
2750–3000	77	58
3250–3500	82	78
3750–4000	79	84
4250–4500	79	93
4750–5000	83	93
5250–5500	82	97
5750–6000	82	101

Pour le scénario 2, la transition vers le second équilibre est plus lente, mais le taux de report  $y$  est de 100%. Ce résultat démontre la capacité d'*Ecosim 2* à reproduire une transition complète vers l'équilibre néoclassique. Ce résultat va également dans le sens des explications fournies à la section précédente quant au taux de 82% observé à l'équilibre pour le scénario 1. En effet, les

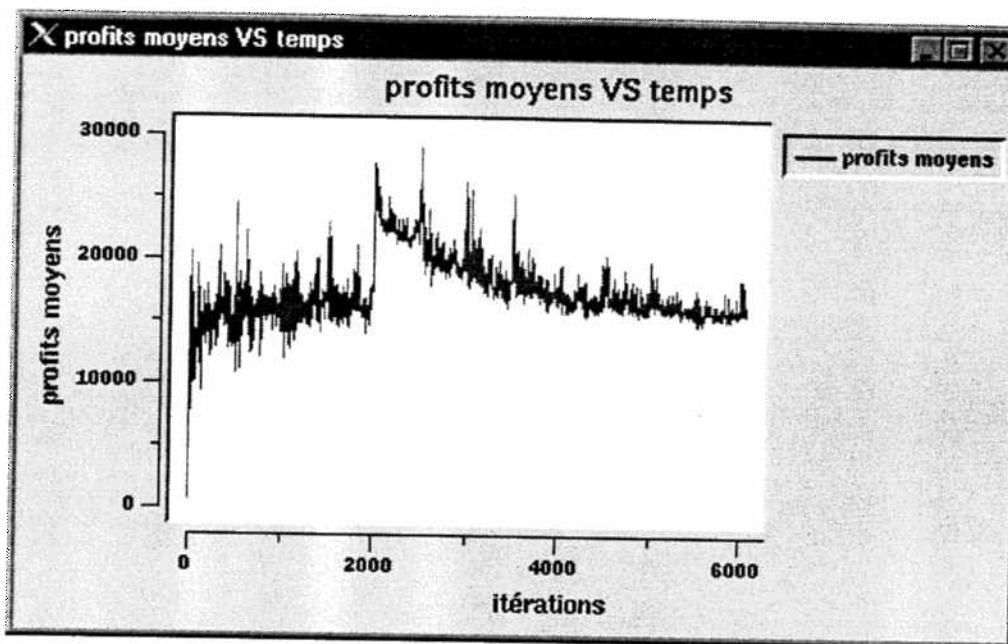


FIG. 5.3: Scénario 2 : profits moyens de l'industrie

remarques sur le salaire d'option ne sont pas pertinentes dans le cas d'une hausse du salaire. Si influence il y a, elle ne peut être que positive. Il n'est donc pas surprenant de retrouver un taux de report de 100%.

Comme le rôle des prestations de sécurité sociale dans le processus de report n'est pertinent que lors d'une hausse de la taxe, la proposition 2 ne s'applique pas de façon symétrique à une baisse de la taxe. Il importe toutefois de vérifier la symétrie des propositions 1 et 3.

#### 5.2.2.1 Concurrence entre les firmes sur le marché du travail

La figure 5.5 représente graphiquement la relation entre le nombre de firmes sur le marché et l'évolution du taux de report au cours d'une simulation. Il en ressort clairement que le transfert de la baisse de taxes des employeurs vers les employés est de plus en plus faible au fur et à mesure que le nombre de firmes diminue. Nous avons donc l'inverse de la proposition 1 pour une réduction de la taxe :

**Proposition 4.** *Toutes autres choses étant égales par ailleurs, le taux de report d'une baisse de la taxe générale sur la masse sala-*



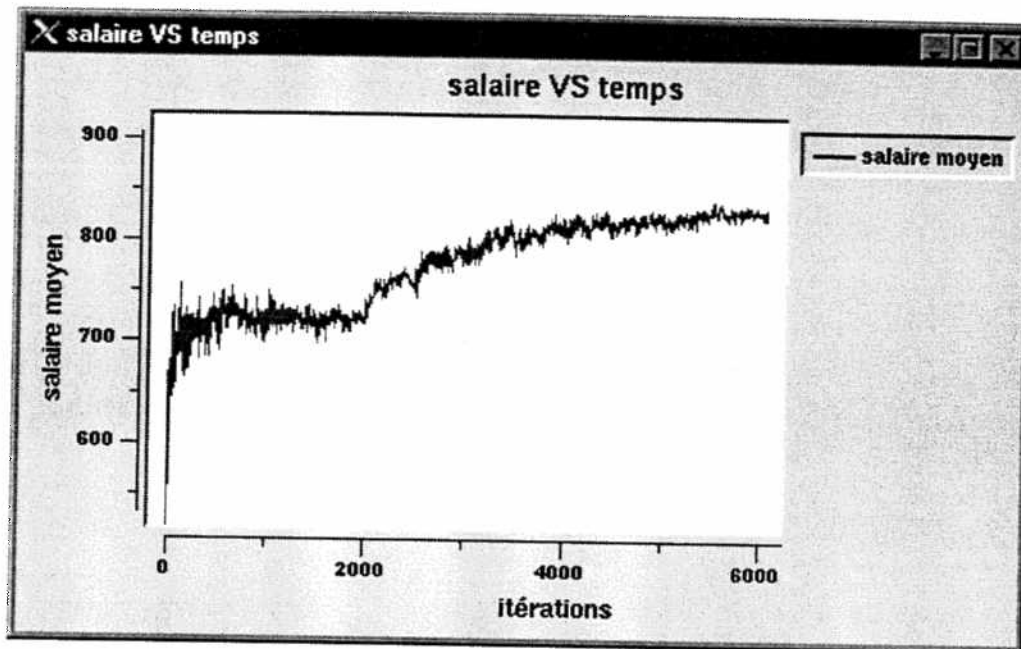


FIG. 5.4: Scénario 2 : salaire moyen de l'industrie

*riale est d'autant plus faible que la concurrence entre les firmes sur le marché du travail est faible.*

Il importe de remarquer que la proposition 4 ne comporte pas la mention "sur un marché du travail suffisamment concurrentiel" de la proposition 1, et ce, pour les raisons sus-mentionnées. L'apparente différence entre les propositions 1 et 4 n'est pas étonnante. Lors d'une baisse de taxes, il n'est pas *a priori* profitable pour une firme d'augmenter le salaire de ses employés. Dans le cadre de notre modèle, seule la présence d'autres firmes sur le marché du travail peut l'amener à faire profiter ses employés de la réduction de la taxe.

À l'inverse, lors d'une hausse de taxes, les entreprises profitent plutôt d'une faible concurrence pour maximiser la part du fardeau payée par les employés (nonobstant la question du salaire d'option). Dans le cas du monopsonne, comme le salaire d'équilibre *ex ante* est faible, l'unique firme subit en quelque sorte la concurrence du chômage volontaire. Il lui est donc profitable de céder une partie de son gain fiscal aux employés et de produire plus. Sa position de monopsonne lui permet toutefois de conserver plus de 80% de l'allègement fiscal.

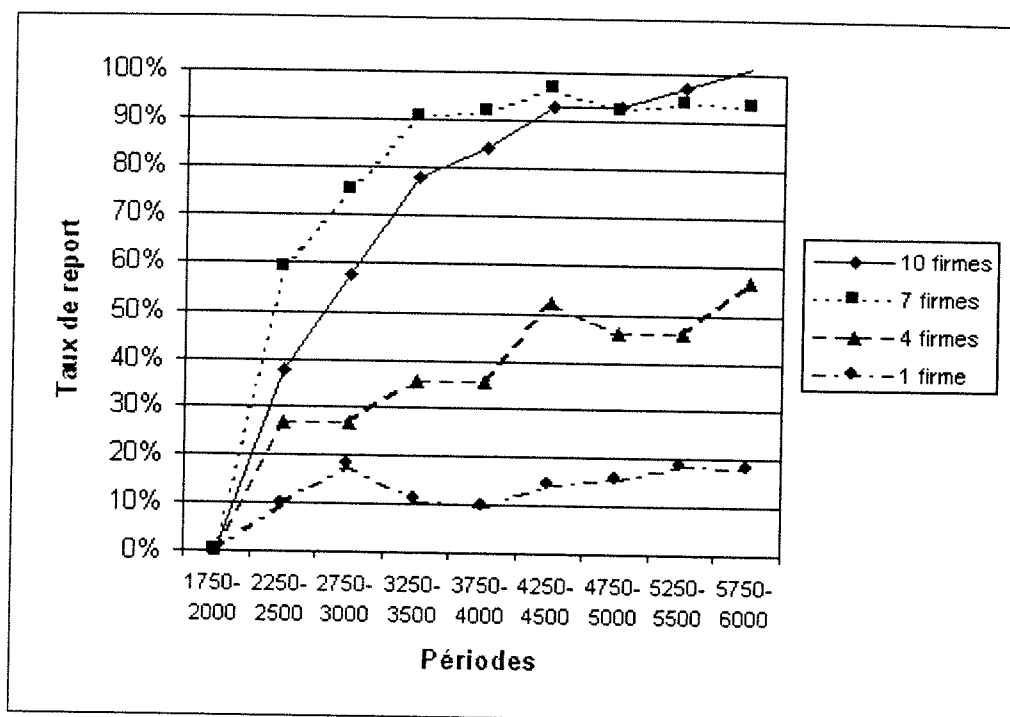


FIG. 5.5: Scénario 2 : taux de report selon le nombre de firmes

La réduction des taxes générales sur la masse salariale est régulièrement prônée comme un moyen d'améliorer la compétitivité des coûts de main-d'œuvre locaux. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le transfert du gain fiscal aux employés par des hausses de salaires soit le plus faible possible. La proposition 4 suggère que cette solution devrait être privilégiée dans les économies ou les secteurs où il y a une faible concurrence du côté de la demande de travail. Dans des secteurs où la concurrence est forte, cette politique risque de se traduire essentiellement en hausses de salaires, dont la désirabilité ouvre un tout autre débat.

### 5.2.2.2 Mobilité des travailleurs entre les firmes

S'il est vrai que la proposition 4 est l'inverse de la proposition 1, l'inverse de la proposition 3 devrait également se vérifier dans le cas d'une baisse de taxes. Nous avons en effet remarqué plus haut qu'il existe une forte similitude entre une plus grande mobilité des travailleurs et une plus forte concurrence

entre les firmes. Formulons donc cette dernière proposition :

**Proposition 5.** *Toutes autres choses étant égales par ailleurs, le taux de report d'une baisse de la taxe générale sur la masse salariale est d'autant plus faible que la mobilité des travailleurs entre les firmes est faible.*

Les trois simulations représentées à la figure 5.6 démontrent bien cette proposition. Plus  $r$  est grand, i.e. moins les travailleurs sont mobiles, moins le taux de report à l'équilibre est élevé. Ainsi, dans une économie où les travailleurs sont peu mobiles d'une firme à l'autre (ou, par extension, d'un secteur à l'autre), une réduction de la taxe sur la masse salariale est susceptible d'accroître la profitabilité des entreprises. À l'inverse, si les travailleurs peuvent facilement changer de firme (c'est souvent le cas dans les emplois peu spécialisés), le taux de report peut être élevé et, par conséquent, l'allègement fiscal peut ne bénéficier aux entreprises que pour une courte période seulement. Si cette proposition se vérifie dans la réalité, les investisseurs étrangers seront peu attirés par une politique de réduction de la taxe générale sur la masse salariale, sachant qu'elle s'accompagnera éventuellement d'une hausse de salaires.

### 5.3 Recherches futures

La proposition 5 conclut ce chapitre sur les prévisions théoriques effectuées à l'aide d'*Ecosim 2*. Pour des raisons d'espace et de temps nécessaire pour parfaire l'engin de simulation, nous nous sommes limités à mesurer l'impact de certains facteurs sur le taux de report du fardeau de la taxe, i.e. sur les profits et les salaires. Par contre, *Ecosim 2* permet également l'analyse de l'évolution du chômage (volontaire et involontaire), de même que du budget de l'État.

Par exemple, nous avons pu remarquer que l'implantation d'une nouvelle taxe (scénario 1) s'accompagnait de chômage involontaire durant la transition vers l'équilibre *ex post*, donc de chômage frictionnel. La figure 5.7 montre le comportement du nombre de chômeurs après l'instauration d'une taxe de 50% sur la masse salariale (variante du scénario 1 destinée à illustrer clairement le phénomène). On y constate que le taux de chômage atteint 30% (300/1,000) immédiatement après le choc et qu'il est essentiellement expliqué par le chômage involontaire. À la période 4,000, le nombre de chômeurs

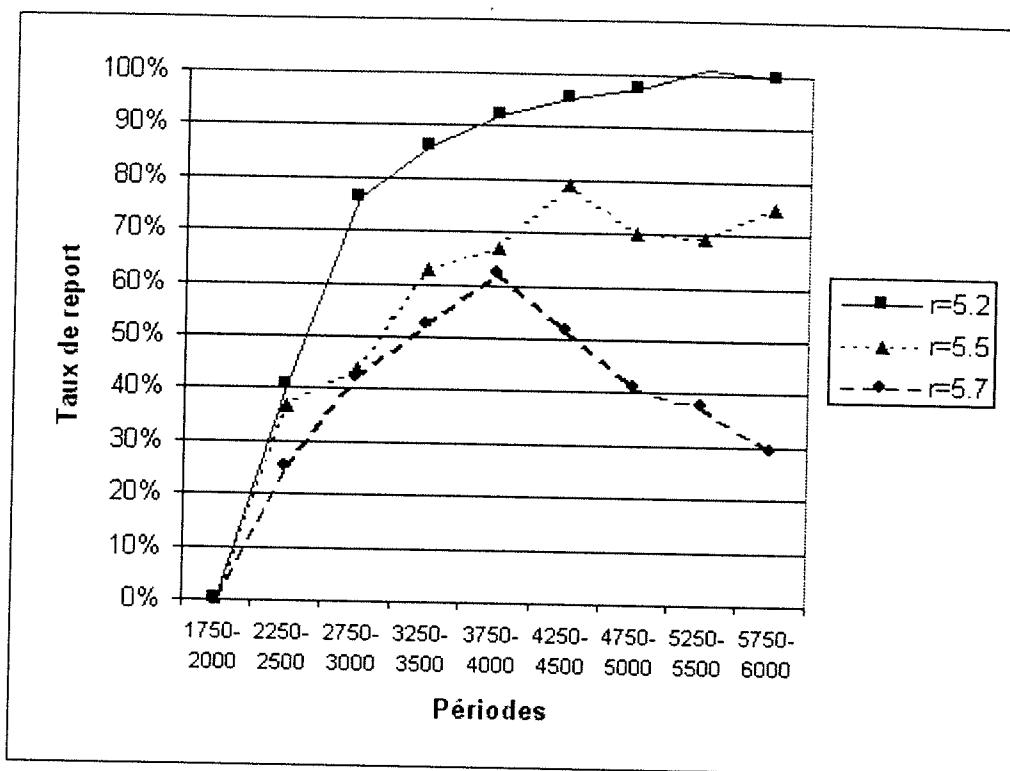


FIG. 5.6: Scénario 2 : taux de report selon la mobilité des travailleurs

involontaires tend de nouveau vers zéro, comme avant le choc. Étant donné les difficultés généralement rencontrées par les économistes pour modéliser le chômage involontaire, des recherches dans cette direction seraient particulièrement intéressantes.

Pour les mêmes raisons, nous n'avons pas discuté de l'impact des scénarios 1 et 2 sur le surplus ou le déficit du gouvernement. La figure 5.8 donne un avant goût de l'utilisation possible d'un modèle de microsimulation comme le nôtre par les autorités budgétaires. On y remarque, à la 2,000<sup>e</sup> période, la diminution du surplus due à l'abolition de la taxe sur la masse salariale. Dans ce cas-ci (monopsonne), la hausse des salaires et des profits n'est pas suffisante pour que le surplus du gouvernement retrouve son niveau d'avant la baisse de taxes. Une autre piste intéressante pourrait donc être le développement d'un engin de microsimulation avec agents partiellement rationnels applicable à la prévision des impacts budgétaires des politiques fiscales.

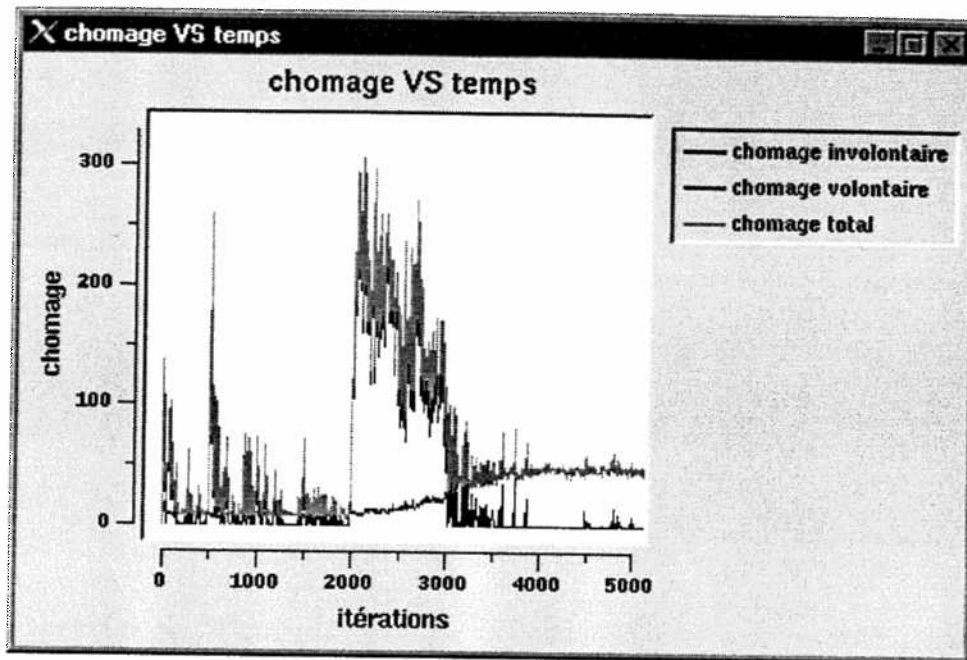


FIG. 5.7: Scénario 1 ( $\tau = 0,5$ ) : chômage

Pour qu'un tel modèle de microsimulation puisse être utilisé à des fins de prévision économique, il faudra aussi développer des moyens satisfaisants d'estimer économétriquement les paramètres de l'algorithme d'apprentissage. À quoi correspondent dans la réalité les paramètres  $h$ ,  $g$ ,  $A$  et  $\delta$ ? La réponse à cette question dépasse le mandat que nous nous étions donné, soit de développer une application théorique aux microsimulations avec agents partiellement rationnels.

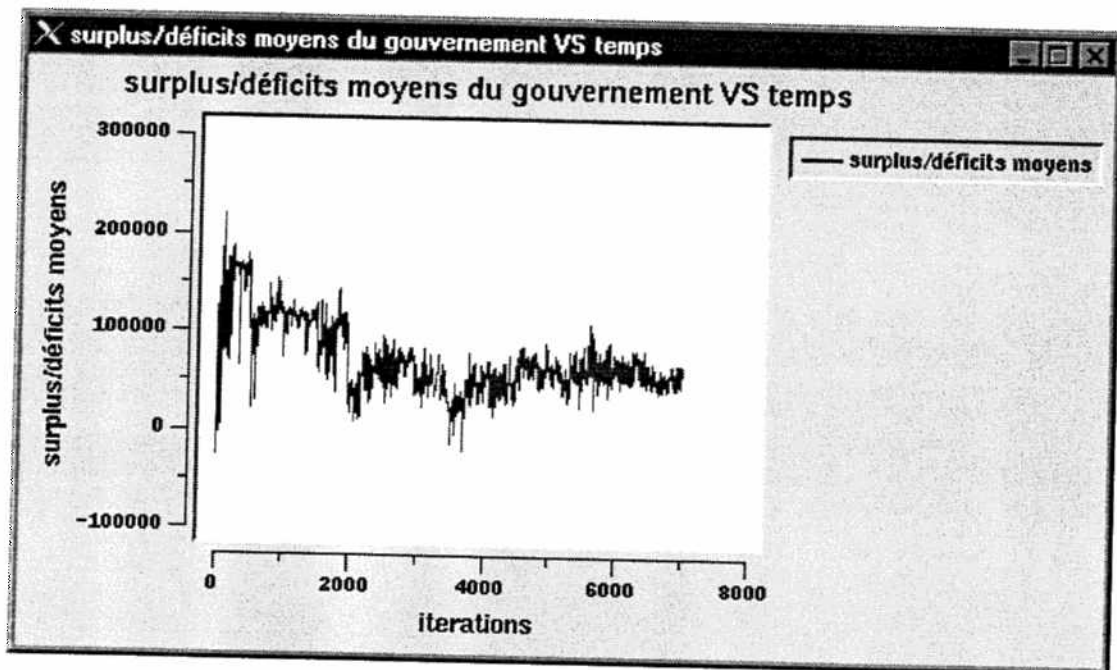


FIG. 5.8: Scénario 2 (1 firme) : budget du gouvernement

# Chapitre 6

## Conclusion

S'ils réussissent à décrire adéquatement plusieurs aspects de la réalité, les modèles avec agents complètement rationnels sont peu utiles pour expliquer certains phénomènes – le volume des transactions sur les marchés financiers, par exemple. C'est pourquoi de plus en plus d'économistes ont recours à des hypothèses alternatives à la rationalité parfaite. Relativement récente en économie, la littérature sur la rationalité partielle est porteuse de beaucoup de promesses. En particulier, plusieurs auteurs y voient une façon intéressante de modéliser les épisodes transitoires, que la théorie néoclassique peine à expliquer.

Dans le cadre de ce rapport, nous avons cherché à appliquer la modélisation avec agents partiellement rationnels à une problématique où les processus transitoires jouent un rôle central : le report du fardeau des taxes sur la masse salariale. Les économistes comprennent depuis longtemps que les entreprises réussissent généralement à transférer une partie de leur fardeau fiscal aux individus, principalement en leur versant des salaires plus faibles. Des études empiriques sur les taxes sur la masse salariale ont confirmé l'existence du phénomène, mais plusieurs d'entre elles ont soulevé le fait que le transfert aux individus du fardeau d'une nouvelle taxe se fait progressivement. Certains auteurs ont estimé des transitions de plusieurs années, alors que d'autres n'ont relevé qu'un report partiel. Or, la théorie néoclassique prévoit un report rapide et complet.

L'hypothèse de la rationalité partielle nous a-t-elle aidés à modéliser plus adéquatement le report des taxes sur la masse salariale ? Il serait prématuré de l'affirmer. Cependant, *Ecosim 2* parvient à reproduire une transition progressive vers l'équilibre néoclassique sans recourir à une hypothèse de rigidité

des prix. Nous disposions donc d'un outil approprié pour tenter de répondre à la question qui nous intéressait : quels facteurs influencent le taux de report vers les employés du fardeau des taxes générales sur la masse salariale payées par les employeurs ? Les simulations effectuées avec *Ecosim 2* nous ont permis de formuler cinq propositions qu'il sera ultérieurement nécessaire de confronter à des données du monde réel. Parmi les facteurs qui devraient influencer le taux de report, nous avons relevé la concurrence sur le marché du travail, la mobilité des travailleurs et le niveau des prestations de sécurité sociale.

Nonobstant ces considérations théoriques, la principale contribution de nos travaux est probablement une meilleure connaissance pratique des microsimulations avec agents partiellement rationnels. Nos résultats sont prometteurs et nous en sommes très enthousiastes. Cependant, il faut demeurer conscients que les transitions et les cycles générés par des environnements peuplés d'agents partiellement rationnels sont directement causés par le type d'algorithme d'apprentissage utilisé. Sommes-nous prêts à affirmer que les caractéristiques des processus d'apprentissage humains sont à la source des cycles économiques et de la rigidité que l'on observe sur plusieurs marchés ? Il y a certainement là un pas à ne pas franchir. Dans l'état actuel des connaissances, nous émettons donc de sérieuses réserves sur l'utilisation de tels outils à des fins de prévision économique. Comme nous l'indiquions en guise de conclusion au chapitre précédent, beaucoup de progrès restent encore à faire avant que nous disposions d'algorithmes d'apprentissage qui puissent être paramétrisés pour reproduire adéquatement les véritables processus cognitifs des êtres humains. À cet égard, Lettau et Uhlig (1999), qui combinent la recherche en économie expérimentale et le développement d'algorithmes d'apprentissage, nous indiquent une voie des plus intéressantes.

Il reste que des travaux comme les nôtres – qui demeurent très théoriques – aident à mieux comprendre comment la psychologie humaine peut être un déterminant important des phénomènes économiques. Si, à notre avis, l'utilisation des microsimulations avec agents partiellement rationnels pour la prévision économique est encore très hasardeuse, leurs applications théoriques et pédagogiques sont certainement appelées à se développer dans un avenir rapproché.



# Bibliographie

- [Alchian (1950)] ALCHIAN, Armen A., "Uncertainty, Evolution, and Economic Theory", *American Economic Review*, vol. 58, 1950, 211-221.
- [Basu et al. (1996)] BASU, N., R. J. Pryor, T. Quint et T. Arnold, *Aspen : A Microsimulation Model of the Economy*, cahier de recherche SAND96-2458, Program Development Department, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1996.
- [Berk et al. (1996)] BERK, Jonathan B., Eric HUGHSON et Kirk VANDEZANDE, "The Price is Right, But Are the Bids ? An Investigation of Rational Decision Theory", *American Economic Review*, vol. 86, no. 4, sept. 1996, 954-970.
- [Borgers (1996)] BÖRGERS, Tilman, "On the Relevance of Learning and Evolution to Economic Theory", *The Economic Journal*, vol. 106, 1996, 1374-1385.
- [Brittain (1971)] BRITTAİN, John A., "The Incidence of Social Security Payroll Taxes", *American Economic Review*, vol. 61, 1971, 110-125.
- [Citro et al. (1991)] CITRO, Constance F. et Eric A. Hanushek, *Improving Information for Social Policy Decisions. The Uses of Microsimulation Modeling*, Panel to Evaluate Microsimulation Models for Social Welfare Programs, National Research Council, Washington, 1991.
- [Conlisk (1996)] CONLISK, John, "Why Bounded Rationality", *Journal of Economic Literature*, vol. 34, juin 1996, 669-700.

- [Dahlby (1993)] DAHLBY, Bev, "Payroll Taxes", dans *Business Taxation in Ontario*, sous la direction de A. M. Maslove, University of Toronto Press, Toronto, 1993, 80-170.
- [Dawid et al. (1998)] DAWID, Herbert et Michael Kopel, "On economic applications of the genetic algorithm : a model of the cobweb type", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 8, 1998, 297-315.
- [Day (1998)] DAY, Richard H., "Bounded Rationality and Firm Performance in the Experimental Economy", dans *Microfoundations of Economic Growth*, sous la direction de G. Eliasson et al., University of Michigan Press, Ann Arbor, 1998, 119-130.
- [Hamermesh (1980)] HAMERMESH, Daniel S., "Factor Market Dynamics and the Incidence of Taxes and Subsidies", *Quarterly Journal of Economics*, vol.95, 1980, 751-764.
- [Holmlund (1983)] HOLMLUND, Bertil, "Payroll Taxes and Wage Inflation : The Swedish Experience", *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 85, 1983, 1-15.
- [Lettau et al. (1999)] LETTAU, Martin et Harald Uhlig, "Rules of Thumb versus Dynamic Programming", *American Economic Review*, vol. 89, no. 1, 1999, 148-174.
- [MFQ (1998)] MINISTÈRE DES FINANCES DU QUÉBEC, Réforme de la fiscalité des entreprises, 1998.
- [Pau et al. (1996)] PAU, L. F. et Pan Yong Tan, "Artificial Intelligence in Economics and Finance : A State of the Art - 1994. The Real Estate Price and Assets and Liability Analysis Case", dans *Handbook of Computational Economics, Volume I*, sous la direction de H. M. Amman et al., Elsevier, Amsterdam, 1996, 405-439.
- [Pissarides (1991)] PISSARIDES, Christopher A., "Real Wages and Unemployment in Australia", *Economica*, vol. 58 (février), 1991, 35-55.
- [Pryor (1998)] PRYOR, Rich, *Modeling Economies using Smart Agents*, présentation aux William Brinkman Briefings, Lucent Technologies, 29 mai 1998.

- [Pryor et al. (1996)] PRYOR, R. J., N. Basu et T. Quint, *Development of Aspen : A Microanalytic Simulation Model of the U.S. Economy*, cahier de recherche SAND96-0434, Program Development Department, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1996.
- [Sargent (1993)] SARGENT, Thomas J., *Bounded Rationality in Macroeconomics*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- [Treff et al. (1997)] TREFF, Karin et David B. Perry, *Finances of the Nation*, L'Association canadienne d'études fiscales, Toronto, 1997.
- [Trussart (1999)] TRUSSART, Vincent, *Ecosim : un environnement de simulation économique microanalytique adaptative*, mémoire de maîtrise en informatique, Faculté des études supérieures, Université de Montréal, 1999.
- [Wilton et al. (1993)] WILTON, David et David Prescott, "The Effects of Tax Increases on Wage and Labour Costs", cahier de recherche 93-29, Government and Competitiveness Project, School of Policy Studies, Queen's University, Kingston, 1993.