

## Thèse de doctorat en science économique

Benoît Desmarchelier

**La croissance tertiaire face à la problématique  
environnementale  
une approche par les systèmes multi-agents**

présentée et soutenue publiquement le 25 Octobre 2012

### Membres du jury :

Cristiano ANTONELLI  
Professeur à l'Université de Turin

Faïz GALLOUJ  
Professeur à l'Université Lille 1, Directeur de thèse

Pascal PETIT  
Directeur de recherche au C.N.R.S., Université Paris 13

Lionel RAGOT  
Professeur à l'Université d'Evry-Val-d'Essonne, Rapporteur

Pier Paolo SAVIOTTI  
Professeur à l'Université Grenoble 2, Rapporteur

## Thèse de doctorat en science économique

Benoît Desmarchelier

**La croissance tertiaire face à la problématique  
environnementale  
une approche par les systèmes multi-agents**

### Membres du jury :

Cristiano ANTONELLI  
Professeur à l'Université de Turin

Faïz GALLOUJ  
Professeur à l'Université Lille 1, Directeur de thèse

Pascal PETIT  
Directeur de recherche au C.N.R.S., Université Paris 13

Lionel RAGOT  
Professeur à l'Université d'Evry-Val-d'Essonne, Rapporteur

Pier Paolo SAVIOTTI  
Professeur à l'Université Grenoble 2, Rapporteur

# Remerciements

Mes premiers remerciements vont sans hésitation à Faïz Gallouj, mon directeur de thèse. Notre rencontre, durant mon année de master 2, a bouleversé mon univers intellectuel. À son contact, j'ai découvert l'économie des services et la pensée évolutionniste en économie. C'est également sur ses conseils que j'ai commencé à lier, dès cette époque, ces deux domaines d'étude avec la problématique environnementale. De cette démarche à mon sujet de thèse, il n'y a qu'un pas. Ma dette intellectuelle envers lui est immense et ne pourra jamais être remboursée.

Je remercie également Faridah Djellal, avec qui j'ai eu le privilège de travailler et de discuter tout au long de mes trois années de thèse.

Je remercie les membres du jury, Cristiano Antonelli, Pascal Petit, Lionel Rago et Pier Paolo Saviotti, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail.

Je remercie mes amis doctorants : Jean Finez, Benjamin Huver, Maoulana Sharif, Rabih Zoti et Thomas Delclite. Leur voisinage, aussi bien géographique qu'intellectuel, a été une grande source de motivation.

David, mon frère jumeau, lui-même doctorant en économie, occupe une place spéciale parmi les personnes à remercier. Durant ces trois ans, la co-évolution de nos idées a été pour moi une source d'inspiration considérable. Je lui souhaite le meilleurs pour sa thèse.

Enfin, je dédie cette thèse à mes parents, qui m'ont appris la valeur du travail,

ainsi qu'à Gao Jiayang, qui m'a déjà tant apporté et avec qui mon chemin ne fait que commencer.

# Résumé

Cette thèse part d'un constat paradoxal, celui d'une correspondance temporelle dans la naissance de trois phénomènes : la pollution à un niveau problématique et croissant, la tertiarisation des économies et la consommation matérielle de masse. Il s'agit d'un paradoxe, car les activités de services sont souvent décrites comme immatérielles et peu polluantes, et la société tertiaire comme composée d'individus préférant consommer des produits supérieurs, surtout tertiaires et de qualité, plutôt qu'une grande quantité de biens standardisés et de médiocre qualité.

Nous expliquons cette correspondance par le comportement évolutif des agents. La tertiarisation signifie une demande de biens qui parvient à satiété. Nous explorons l'hypothèse selon laquelle les firmes industrielles ont répondu à cette satiété par la mise en place de stratégies d'obsolescence planifiée de leurs produits. Il semble que ces stratégies soient à l'origine de la naissance de la société de consommation, qui apparaît dès lors comme une conséquence de la tertiarisation des économies.

Pour autant, croissance et environnement ne sont pas des objectifs contradictoires pour les économies tertiaires. En effet, leur croissance repose de plus en plus sur l'accumulation de capitaux immatériels. Cette nouvelle source d'accumulation autorise des transformations importantes en faveur de l'environnement au sein des processus productifs industriels sans remettre en cause la poursuite de la croissance économique. Il apparaît également qu'une politique de taxe environnementale semble en mesure de pouvoir induire de telles transformations.

Mots clés : croissance et environnement, tertiarisation, modèles de simulation.

# Abstract

This thesis starts from a paradoxical observation, that of a temporal correspondence in the birth of three phenomena : problematic and growing pollution levels, tertiarization of economic activities and mass material consumption. This correspondence constitutes a paradox, because it is given that services are rather non-material activities, and also because tertiarised economies have often been described as composed by individuals searching to consume qualitative and tertiary products rather than searching to consume massively material goods.

We explain this correspondence by the adaptive behavior of the economic agents. Tertiarization implies that the demand of goods reaches progressively its level of repletion. We explore the hypothesis that industrial firms have responded to this repletion by implementing planned obsolescence strategies. It seems that these strategies are behind the birth of the consumption society. In this context, the consumption society appears as a consequence of the tertiarization process.

For all that, growth and the environment are not conflicting objectives for tertiary economies. Indeed, their growth is increasingly based on the accumulation of intangible capitals. This new source of accumulation permits to undertake major transformations within industrial production processes without challenging the general process of economic growth. Furthermore, an environmental tax policy seems to be able to induce such desirable transformations.

key words : environment and growth, tertiarization, simulation modelling.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>14</b>
<b>1 La relation entre la tertiarisation et la pollution : paradoxe ou causalité ?</b>	<b>22</b>
1.1 Introduction . . . . .	22
1.2 Caractéristiques des services et environnement : une relecture de l'économie des services. . . . .	24
1.2.1 L'immatérialité est-elle un critère de durabilité? . . . . .	25
1.2.2 L'improductivité, un facteur de matérialité au niveau agrégé . . . . .	29
1.3 Tertiarisation et découplage écologique, une relation devenue ambiguë	34
1.3.1 Les services, moteur de la phase décroissante des CKE . . . . .	34
1.3.2 Remise en cause des CKE et services polluants . . . . .	39
1.4 Un cadre analytique pour aborder la pollution des économies tertiaires	42
1.4.1 Les implications environnementales d'une re-définition des services . . . . .	43
1.4.2 Appréhender la pollution des économies tertiaires par les systèmes complexes adaptatifs . . . . .	47
1.5 Conclusion . . . . .	51

<b>2</b>	<b>La société de consommation : un produit de l'adaptation des agents à la tertiarisation du système économique ?</b>	<b>53</b>
	53	
2.2	La consommation, moteur de la pollution des économies tertiaires . . .	57
2.3	Tertiarisation, comportements adaptatifs et émergence du consumé- risme . . . . .	63
	67	
2.4.1	Règles de comportement des agents industriels . . . . .	69
2.4.2	Règles de comportement des agents tertiaires . . . . .	72
2.4.3	Règles de comportement des consommateurs . . . . .	73
2.5	Dynamiques émergentes : confrontation avec les faits stylisés des émis- sions de déchets . . . . .	77
2.5.1	Les conclusions de Baumol . . . . .	77
2.5.2	Reproduction des faits stylisés . . . . .	80
2.6	Proposition de politique environnementale . . . . .	87
2.7	Conclusion . . . . .	91
<b>3</b>	<b>La croissance de long terme dans une économie de services</b>	<b>95</b>
	95	
3.2	La relation services-croissance : une relation paradoxale à deux niveaux	99
3.2.1	Vers une redéfinition du capital accumulable . . . . .	99
3.2.2	Les services aux entreprises intensifs en connaissances (KIBS) : diffuseurs de connaissances et générateurs d'innovations . . . .	106
3.3	Un modèle multi-agents de croissance tertiaire . . . . .	111
3.3.1	Le moteur de croissance à générations de capital de Dosi et al.	112
3.3.2	Un modèle de changement structurel endogène . . . . .	113
3.4	La dynamique de croissance tertiaire : résultats des simulations . . .	122
3.4.1	La qualité du modèle . . . . .	123
3.4.2	Vers l'émergence d'un moteur de croissance tertiaire . . . . .	134
3.5	Conclusion . . . . .	138

<b>4 Les opportunités de découplage dans une économie de services progressive</b>	<b>144</b>
144	
4.2 La dimension environnementale du modèle de croissance tertiaire . . .	150
4.3 Résultats du scénario de référence . . . . .	154
4.4 Scénarios alternatifs . . . . .	163
4.5 Conclusion . . . . .	167
<b>5 Les stratégies d'éco-innovation face au verrouillage consumériste.</b>	
<b>Vers la recherche d'une solution de politique publique</b>	<b>169</b>
5.1 Introduction . . . . .	169
5.2 Retours sur les deux verrouillages et leur liaison . . . . .	172
5.2.1 Les modèles d'adaptation : de la biologie évolutionniste à l'économie évolutionniste . . . . .	172
5.2.2 Influences interpersonnelles et dynamiques des préférences . . .	178
5.3 Un modèle d'éco-innovation interactif et intégrateur . . . . .	182
5.3.1 Espace d'adaptation et hypersurface de fitness . . . . .	182
5.3.2 Heuristique de recherche et règle d'entrées et sorties . . . . .	187
5.3.3 Évaluation des dynamiques émergentes . . . . .	189
5.4 Politiques environnementales et éco-innovations des entreprises de services . . . . .	191
5.4.1 Mise en œuvre des politiques environnementales . . . . .	192
194	
5.5 Conclusion . . . . .	201
<b>Conclusion générale</b>	<b>204</b>

# Table des figures

1	Articulation des chapitres de la thèse. . . . .	18
1.1	Les courbes de Kuznets environnementales obtenues par Grossman et Krueger (1991 [70]) . . . . .	36
1.2	Décomposition de la courbe de Kuznets environnementale réalisée par Panayotou (1997 [109]) . . . . .	38
1.3	Émissions de CO2 par secteurs en millions de tonnes en France métropolitaine (CITEPA, 2011 [27] p. 38) . . . . .	45
1.4	Réaffectation des émissions de CO2 du secteur des transports vers les secteurs initiateurs (IFEN, 2004 [79]) . . . . .	46
2.1	Évolution de la masse (en millions de tonnes) de l'économie américaine entre 1900 et 1998(a) par unité de PIB, (b) par tête. <u>Source</u> :Ayres et al. (2004 [4]). . . . .	58
2.2	Flux de déchets municipaux (a) annuels en Union Européenne, (b) journaliers aux États-Unis. . . . .	60
2.3	relation entre tertiarisation de la production (PIB en valeur) et flux annuels de déchets municipaux pour un panel de pays de l'Union Européenne entre 2001 et 2006. . . . .	62
2.4	Algorithme d'achat des consommateurs avant saturation du secteur industriel . . . . .	74
2.5	Algorithme d'achat des consommateurs compulsifs . . . . .	76
2.6	(a) Part des secteurs dans l'emploi total, (b) évolution du PIB à long terme. . . . .	79
2.7	Maladie des coûts dans le secteur tertiaire . . . . .	80

2.8	Dynamiques de diffusion : (a) évolution du taux d'équipement, (b) norme de consommation émergente. . . . .	83
2.9	Dynamique des flux de déchets . . . . .	84
2.10	Relation entre la part des services dans le PIB et les émissions de déchets : (a) pour le PIB nominal, (b) pour le PIB réel. . . . .	86
2.11	Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) sur les émissions de déchets . . . . .	89
2.12	Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) : (a) sur le nombre d'achats par nécessité, (b) sur le nombre d'achats pour motif de style. . . . .	90
2.13	Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) sur le profit moyen des firmes du secteur industriel. . . . .	91
3.1	Logarithme du PIB pour le scénario de référence . . . . .	124
3.2	Évolution du taux de chômage . . . . .	125
3.3	Composantes cycliques du PIB et de l'investissement matériel . . . .	126
3.4	Co-mouvement des variables agrégées du modèle avec le PIB ( $lag = 0$ ) et comparaison avec les résultats de Stock et Watson (1999 [137]) pour l'économie américaine. (a) PIB, (b) taux de chômage, (c) emploi industriel, (d) emploi tertiaire, (e) investissements en équipements matériels, (f) consommation de services. . . . .	127
3.5	Processus général de tertiarisation des emplois (a) avec $\Theta = 0.5$ , (b) avec $\Theta = 0.1$ . . . . .	129
3.6	Évolution des niveaux sectoriels de productivité. . . . .	130
3.7	Investissements en capitaux matériels et niveau du PIB réel, (a) pour $t \in [0; 250]$ , (b) pour $t \in [251; 1000]$ . . . . .	132
3.8	Relation entre le niveau moyen de connaissances, $H$ , et celui du PIB réel . . . . .	133
3.9	Impact de $\kappa_{Industrie}$ et de $\kappa_{Services}$ pour $t = 100$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi . . . . .	135

3.10	Impact de $\kappa_{Industrie}$ et de $\kappa_{Services}$ pour $t = 250$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi . . . . .	136
3.11	Impact de $\kappa_{Industrie}$ et de $\kappa_{Services}$ pour $t = 1000$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi . . . . .	137
3.12	Fonctionnement général du modèle . . . . .	141
4.1	Croissance simultanée des productivité environnementale et du travail dans l'UE-15 depuis 1970 (UNEP, 2011 [140] p. 37). . . . .	149
4.2	(a) Dynamique des émissions de GES dans le modèle sans éco-taxe, (b) corrélation du cycle des émissions avec le cycle du PIB. . . . .	156
4.3	Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur le PIB en logarithme. . .	157
4.4	Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur la productivité agrégée. .	158
4.5	Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur le taux de chômage. . . .	159
4.6	(a) Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur la répartition des emplois entre biens et services, (b) effet de $T = 5$ sur la répartition des emplois entre les quatre secteurs du modèle. . . . .	161
4.7	Évolution des émissions de GES pour les différents niveaux d'éco-taxe	162
4.8	Évolution des émissions de GES des différents secteurs dans le scénario de référence et pour $T = 5$ . . . . .	163
4.9	Évolution du logarithme du PIB dans les différents scénarios (avec $T = 5$ ). . . . .	165
4.10	Évolution du taux de chômage dans les différents scénarios (avec $T = 5$ ).166	
4.11	Évolution de la répartition sectorielle des emploi (a) avec adaptation des agents mais sans éco-taxe, (b) lorsque $T = 5$ mais sans réponse des agents. . . . .	166
4.12	Évolution des émissions de GES dans les différents scénarios (avec $T = 5$ ). . . . .	167
5.1	Cas extrêmes de surfaces d'adaptation parfaitement covariantes ( $K = 0$ ) et aléatoire ( $K = N - 1$ ) (Chang et Harrington, 2006 [25] p.1291) .	174

5.2	Voisinage de Von Neumann . . . . .	185
5.3	Fonctionnement général du modèle . . . . .	187
5.4	Évolution de la fitness/ performance des designs proposés par les firmes du modèle . . . . .	190
5.5	(a) Dynamique des parts de marché, (b) évolution de l'indice HHI, (c) homogénéisation du degré de mobilité $z_{kt}$ , (d) homogénéisation des prix $x_{kt}$ . . . . .	191
5.6	Politiques sur la matérialité $v_{kt}$ . Évolution de l'indice de pollution $\bar{y}_t$ (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information. . . . .	196
5.7	Politiques sur la mobilité $f(m_{kt})$ . Évolution de l'indice de pollution $\bar{y}_t$ (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information. . . . .	198
5.8	Politiques sur toutes les externalités $y_{kt}$ . Évolution de l'indice de pollu- tion $\bar{y}_t$ (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information. . . . .	200
5.9	Évolution de l'indice de pollution $\bar{y}_t$ avec seulement l'éco-taxe appli- quée sur $v_{kt}$ (courbe verte), sur $z_{kt}$ (courbe rouge) et sur $y_{kt}$ (courbe noire). . . . .	201

# Liste des tableaux

1.1	Schémas de l'évolution sociale de Daniel Bell (1976 [18] p. 156) . . . .	28
1.2	Taux de croissance du PIB au-delà duquel les émissions nationales de CO <sub>2</sub> , de NO <sub>x</sub> et de SO <sub>2</sub> augmentent (tiré de De Bruyn et al., 1998 [30]) . . . . .	41
1.3	Émissions de CO <sub>2</sub> par secteurs en millions de tonnes en France métropolitaine (CITEPA, 2011 [27]) . . . . .	44
2.1	récapitulatif des scénarios simulés . . . . .	81
2.2	Conditions initiales et valeur des paramètres du modèle . . . . .	94
3.1	Décomposition de Corrado et al. (2009 [28]) p. 679) (en %). . . . .	104
3.2	Taux de croissance (en %)de la part des KIBS dans l'emploi des pays de l'UE-15 entre 1998 et 2008 (données EUROSTAT). . . . .	109
3.3	Détermination de la demande de travail par les agents $j$ . . . . .	116
3.4	Cycle général du système multi-agents . . . . .	142
3.5	Conditions initiales et valeur des paramètres du modèle . . . . .	143
4.1	Pseudo-code de la R&D d'un producteur de machines-outils $i$ . . . . .	153
5.1	Heuristique de recherche d'une firme $k$ . . . . .	188
5.2	Effet de l'éco-taxe sur l'échelle des prix . . . . .	193
5.3	Récapitulatif des scénarios simulés pour chacun des trois niveaux d'information possibles des pouvoirs publics sur les externalités des designs de produits . . . . .	194

# Introduction générale

L'environnement naturel a toujours constitué un obstacle à la poursuite des activités humaines. Selon Diamond (2006 [35]), il s'agit même de l'un des facteurs majeurs de disparition des civilisations au cours de l'histoire. Dans le cas des sociétés occidentales, cet obstacle écologique a pris différentes formes selon le niveau de développement économique. Ainsi, avant la première Révolution Industrielle, c'est la quantité limitée de terres cultivables qui freinait la croissance démographique, qui elle-même empêchait la croissance des niveaux de vie. Galor (2011 [66]) qualifie cette période de "régime de croissance malthusien", en référence au mécanisme de la trappe malthusienne qui régit l'évolution des niveaux de vie à cette époque : en période de bonnes récoltes, liées à l'amélioration des techniques agricoles ou à une expansion des terres mises en culture, le revenu individuel peut progresser, mais cette progression est rapidement érodée par une expansion démographique plus forte, si bien que le revenu par tête est sans cesse ramené au minimum vital. À cette époque, un pays disposant d'une avance technique se distinguait donc des autres moins par un niveau de vie supérieur que par une densité de population plus élevée (Galor, 2011 [66]).

Dans son ouvrage intitulé *les Étapes de la Croissance*, Rostow (1960 [124]) identifie l'apparition de pré-conditions à la croissance des niveaux de vie à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle en Angleterre. Ces pré-conditions consistent en la diffusion de l'esprit rationnel et expérimental, notamment grâce à la conception newtonienne du monde, selon laquelle la nature est régie par des lois simples, que l'on peut découvrir et utiliser (Prigogine et Stengers, 1980 [116]). Cette conception du monde va favoriser une première accélération du progrès technique, notamment grâce au développement et

à la diffusion de nombreux types de machines à vapeur tout au long du 18<sup>ème</sup> siècle (Frenken, 2006 [54]). La caractéristique essentielle de cette poussée du progrès technique est qu'elle est suffisante pour absorber la croissance démographique et pour reculer la limite imposée à la taille de la population par la surface des terres cultivables.

Une nouvelle accélération du rythme des gains de productivité, couplée à une baisse de la natalité, fait entrer les sociétés occidentales dans le "régime de croissance moderne" (Galor, 2011 [66]) à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. La limitation des ressources naturelles (agricoles mais aussi en matières premières, notamment en hydrocarbures) est alors encore parfois citée comme un obstacle à la poursuite de la croissance des niveaux de vie (Meadows et al., 1972 [96]). Mais cette contrainte potentielle est peu à peu remplacée par une autre : la croissance des rejets polluants (Brock et Taylor, 2005 [20]). Cette pollution touche tous les écosystèmes de la planète (Vitousek et al., 1997 [146]). Elle se traduit par des extinctions d'espèces animales, tandis que d'autres deviennent envahissantes. La quantité de terres cultivables et les réserves en eau potable se réduisent rapidement et le réchauffement climatique devient de plus en plus menaçant.

Certains auteurs (Ayres et al., 2004 [4]; Panayotou, 2003 [110]), soulignent la responsabilité de la consommation de masse dans cette aggravation des problèmes environnementaux, qui sont désormais systémiques et globaux. Cette propension des individus à dépenser l'intégralité de leur budget et à consommer au-delà leurs besoins fondamentaux (nourriture, logement, habillement) est une attitude apprise et non pas innée (Witt, 2001 [151]). Cet apprentissage particulier semble avoir vu le jour pour la première fois aux États-Unis durant les années 1920 (Rostow, 1960 [124]; Meikle, 2001 [97]), au moment où l'emploi tertiaire dépassait pour la première fois l'emploi industriel et agricole (Fourastié, 1963 [50]). Cette correspondance temporelle est, à certains égards, paradoxale. Les services sont en effet considérés depuis les travaux des économistes classiques comme des activités immatérielles (Delaunay et Gadrey, 1992 [31]). Ainsi, étant donné la forte connexion entre la consommation de

ressources matérielles et le rejet de substances polluantes, la tertiarisation aurait dû s'accompagner d'une réduction des niveaux de pollution et non de leur amplification. De même, la société tertiaire a été envisagée comme orientée vers la recherche de la qualité (Bell, 1976 [18]) plutôt que vers la consommation de masse qui la caractérise aujourd'hui.

L'objectif de cette thèse est d'essayer d'apporter une explication à ce paradoxe de la tertiarisation polluante ainsi que d'envisager des moyens (théoriques) pour en sortir. En particulier, nous cherchons à répondre aux questions suivantes : comment expliquer la consommation matérielle de masse des sociétés tertiaires ? Pourquoi la tertiarisation s'est-elle accompagnée d'une amplification des rejets polluants ? Y a-t-il un lien entre la naissance du consumérisme et la tertiarisation de la production ? Peut-on envisager une économie de services où la croissance s'accompagne d'une réduction des émissions de pollution ? À quelles conditions une telle situation pourrait-elle être atteinte ?

L'élément déterminant dans la compréhension de ce paradoxe de la tertiarisation polluante semble être l'apprentissage de la consommation par les individus et sa correspondance avec le processus de tertiarisation des emplois. Nous nous intéressons donc au comportement adaptatif des consommateurs. Une façon commode de modéliser de tels comportements individuels est l'usage de la simulation multi-agents. Appliquée à l'économie, la simulation multi-agents peut être définie comme *"l'étude computationnelle des processus économiques modélisés comme des systèmes dynamiques d'agents en interaction. [Le terme] 'Agent' fait référence, de façon générale, à des ensembles de données et à des méthodes comportementales représentant une entité constituant une partie d'un monde informatique construit"*<sup>1</sup> (Tsfatsion, 2006 [138], p. 835). Les agents peuvent représenter des entités variées (individus, entreprises, voire des objets inanimés comme des biens de capital) et disposant de capacités cognitives plus ou moins élaborées.

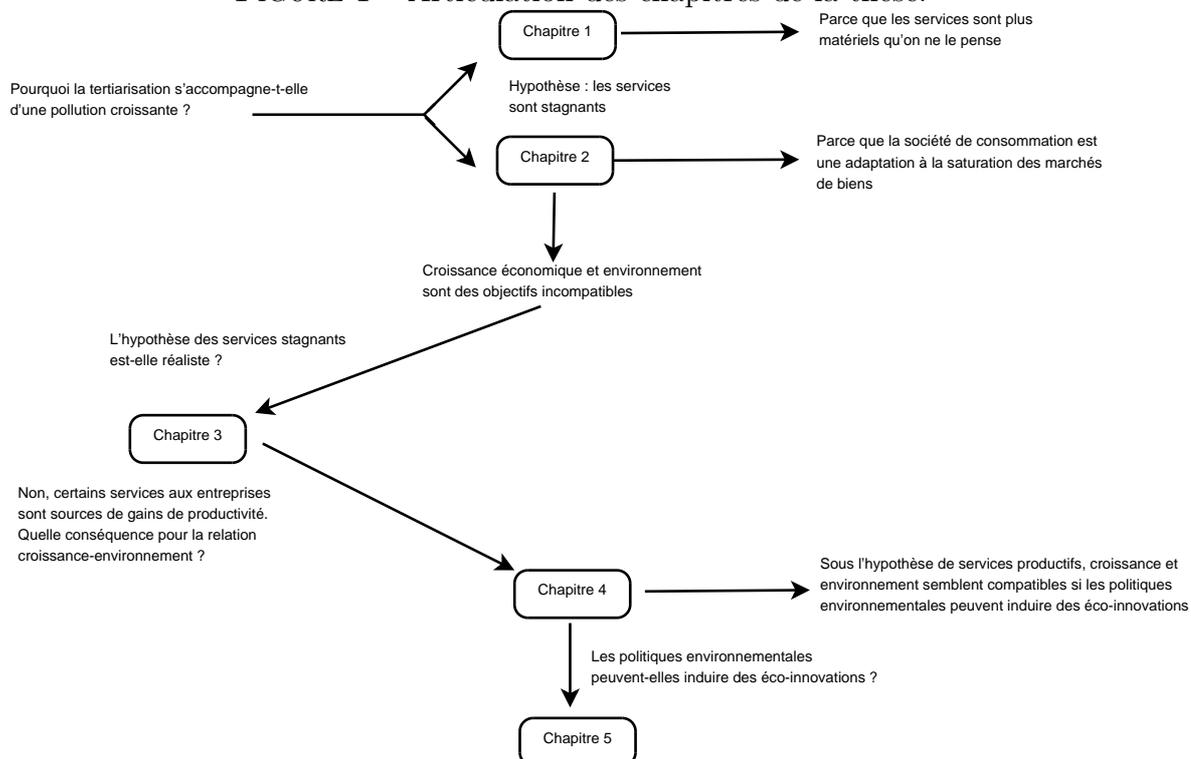
---

1. Traduction personnelle.

L'intérêt de telles simulations est double. Il est d'abord pratique, car il s'agit d'une méthode permettant de concilier la flexibilité d'un raisonnement littéraire avec la rigueur logique et formelle qui découle de l'usage d'un langage de programmation informatique (Holland et Miller, 1991 [78]). Ensuite, ce type de simulation offre l'intérêt théorique de permettre d'observer les résultats agrégés d'interactions individuelles nombreuses, répétées et complexes entre les agents modélisés. Les variables agrégées peuvent en effet se comporter de manière inattendue, qui ne pouvait pas être anticipée au regard des comportements des agents individuels. Cette propriété agrégée des systèmes multi-agents, souvent nommée "émergence" (Tesfatsion, 2006 [138]), peut permettre de tester si un comportement donné est suffisant pour expliquer/générer une réalité agrégée observée. Ainsi, la modélisation multi-agents est en mesure de nous aider à comprendre quels comportements individuels, à l'œuvre durant le processus de tertiarisation, peuvent permettre d'expliquer la dynamique (observée) des variables environnementales du monde réel. La notion d'émergence, qui est au cœur de la modélisation multi-agents, est, il faut le noter, bien ancrée dans la pensée économique. Hayek, auteur parmi d'autres, définit ainsi le capitalisme comme un "ordre étendu de coopération humaine" (Hayek, 1993 [147]), c'est-à-dire un mode de coordination des activités humaines qui a émergé de manière "spontanée"/non-intentionnelle.

Cette thèse comprend cinq chapitres, dont l'articulation est illustrée par la figure 1.

FIGURE 1 – Articulation des chapitres de la thèse.



Dans le premier chapitre, nous dressons un bilan de la littérature sur les activités de services et les économies de services dans leur relation à la pollution. Bien que l'économie des services ait peu abordé la question environnementale, on peut poser la question du caractère plus ou moins vert des sociétés tertiaires telles qu'elles sont envisagées par certains précurseurs de l'économie des services (Bell, 1976 [18] ; Fourastié, 1963 [50] ; Baumol, 1967 [7] ; Gershuny, 1978 [68]). Les recherches empiriques sur l'impact environnemental de la croissance remettent également peu à peu en question le caractère écologique des services (Stern, 2002 [135]). Nous analyserons de quelle manière une redéfinition systémique du service (Gadrey, 1992 [58]) permet de concevoir ces activités comme étant des sources importantes d'externalités environnementales. Cette redéfinition conduit certains auteurs (Fourcroy et al., 2012 [51]) à proposer une ré-affectation des émissions polluantes de certains secteurs vers ceux de services.

Dans le chapitre 2, nous soulignons l'incapacité de l'approche par la réaffectation des émissions à expliquer le phénomène de tertiarisation polluante. En nous ap-

puyant sur une littérature évolutionniste récente, qui suggère des fondements micro-économiques au phénomène de changement structurel<sup>2</sup> (Saviotti et Pyka, 2004 [127] ; Witt, 2010 [152]), nous formulons l'hypothèse que le consumérisme est né d'une réaction défensive (comportement adaptatif) des firmes industrielles au tarissement de leurs débouchés. Cette réaction consiste à développer des stratégies d'obsolescence planifiée, c'est-à-dire de valorisation esthétique des produits et de baisse de leur durée de vie, afin d'inciter les consommateurs à renouveler de plus en plus fréquemment leurs achats. Selon cette hypothèse, la tertiarisation serait un vecteur de croissance de la pollution, non pas parce que les services sont particulièrement polluants par rapport à l'industrie, mais parce qu'il s'agit d'un changement structurel majeur, qui a forcément dû rencontrer une forte résistance de la part des secteurs industriels en difficulté. Sous cet angle, croissance et environnement semblent des objectifs opposés.

Dans le chapitre 3, nous montrons que la conclusion précédente sur l'incompatibilité croissance-environnement dans une économie tertiaire repose sur l'hypothèse des services improductifs. Dans ce nouveau chapitre nous remettons en question la pertinence de cette hypothèse. La croissance tertiaire apparaît bien souvent comme un phénomène paradoxal, dans la mesure où le progrès technique observé dans le monde réel semble absent des statistiques sur l'évolution de la productivité (Solow, 1987 [132]). Une littérature récente sur les capitaux intangibles (Nakamura, 2001 [100] ; Corrado et al., 2009 [28]) propose de considérer un certain nombre de dépenses en actifs immatériels (dépenses de formation, en logiciels, en marketing...) comme des investissements productifs. Tout en suggérant une interprétation du paradoxe de Solow, la notion de capital intangible permet d'envisager certains services - les services aux entreprises intensifs en connaissances (KIBS<sup>3</sup>) - comme des activités productives. Bien qu'ils puissent appartenir à la catégorie des services improductifs (puisque leur productivité est relativement faible lorsqu'elle est mesurée par les indicateurs

---

2. Tout au long de cette thèse, nous employons le terme "changement structurel" pour signifier le phénomène de modification au cours du temps de la part des différents secteurs dans l'emploi et dans la production nationale.

3. Knowledge Intensive Business Services. L'acronyme anglais KIBS étant très fréquent dans la littérature, nous choisissons de l'utiliser tout au long de cette thèse.

traditionnels) (Wolff, 2002 [153]), ces services favorisent en effet la croissance de la productivité de leurs clients. Ainsi, ils permettent de remettre en cause l'hypothèse des services improductifs. Afin d'analyser la relation croissance-environnement dans les économies tertiaires, nous construisons un modèle multi-agents de croissance tertiaire tenant compte de l'activité des KIBS. La pertinence du modèle est évaluée à sa capacité de reproduire un grand nombre de fait stylisés (cycles d'affaires, investissement matériel pro-cyclique, tertiarisation des emplois...).

Dans le chapitre 4, nous utilisons ce nouveau modèle de croissance tertiaire pour explorer les incidences d'une politique de taxe environnementale sur la croissance, la répartition sectorielle des emplois et la dynamique des émissions polluantes. Nous testons en particulier la plausibilité d'une hypothèse avancée par Gadrey (2008 [59]), selon laquelle une politique d'éco-taxe, portant à la fois sur l'industrie et sur les services, pourrait s'accompagner d'un vaste mouvement de dé-tertiarisation des emplois et de décroissance du PIB. Nous simulons différents scénarios plausibles de réponse des agents à la mise en place d'une telle taxe. Il en ressort qu'une politique de taxe environnementale semble plutôt favoriser l'emploi dans le secteur des KIBS, et transitoirement dans le secteur des machines-outils, au détriment de l'emploi dans les secteurs de consommation finale. Cette éco-taxe ne produit une décroissance dans aucun scénario et elle ne permet d'atteindre un découplage croissance-pollution que dans le cas où elle s'accompagne d'un changement de trajectoire technologique des entreprises en faveur de processus productifs plus écologiques.

Dans le chapitre 5, on se demande si une politique environnementale peut inciter à un tel changement de trajectoire technologique. Remarquant par ailleurs le faible intérêt des études sur les innovations environnementales (ou éco-innovations) pour les firmes de services, nous concentrons plus spécifiquement notre propos sur l'éco-innovation dans les services. Tout en nous inscrivant dans la perspective de la définition des produits sous la forme d'un ensemble de caractéristiques techniques et de services (Saviotti et Metcalfe, 1984 [126] ; Gallouj et Weinstein, 1997 [65]), nous nous inspirons des modèles d'adaptation issus de la biologie évolutionniste pour

construire un modèle d'éco-innovation dans les services. Dans ce modèle, certaines caractéristiques propres aux services (matérialité, mobilité) servent à définir un espace des designs de services possible, dans lequel évoluent des agents-entreprises. Nous attribuons des valeurs de performance à chacun de ces designs à l'aide des préférences dynamiques d'un ensemble de consommateurs situés dans un réseau social. Nous testons l'effet de deux politiques sur l'évolution du design proposé par les entreprises : une politique d'éco-taxe et une politique d'information des consommateurs. Nos simulations nous permettent de conclure à la plus grande efficacité de l'éco-taxe et à sa capacité à pousser les entreprises à modifier leur trajectoire technologique.

# Chapitre 1

## La relation entre la tertiarisation et la pollution : paradoxe ou causalité ?

### 1.1 Introduction

L'économie des services s'intéresse peu à la problématique environnementale. Plusieurs éléments d'explication peuvent être avancés. D'abord on peut souligner que les questions environnementales sont surtout abordées par la littérature économique sous un angle technologique (Djellal et Gallouj, 2009 [38]). En effet, la technologie est reconnue comme la principale responsable des problèmes environnementaux, mais aussi comme leur principale solution [33]. C'est ainsi l'approche technologique qui domine les travaux consacrés aux éco-innovations. Selon Rennings (2000 [120]), *"Eco-innovations are all measures of relevant actors (firms, politicians, unions, associations, churches, private households) which develop new ideas, behavior, products and processes, apply or introduce them and which contribute to a reduction of environmental burdens or to ecologically specified sustainability targets"* (p. 322). Cette définition est très large et elle offre de nombreuses possibilités de prise en compte de formes d'innovation particulières aux services. Pourtant la typologie que l'auteur en tire se focalise sur les solutions technologiques et industrielles.

Elle distingue les technologies intégrées de celles qui sont additives, c'est-à-dire d'une part l'adoption d'une technologie propre et, d'autre part, l'ajout d'un procédé de dépollution à une technologie existante. Rennings décompose ensuite les technologies intégrées en trois sous-ensembles, à savoir les technologies qui agissent sur la nature et l'usage des inputs naturels, celles qui modifient le processus de production et enfin les technologies qui transforment le produit des entreprises. De même, la plupart des études empiriques sur les éco-innovations se concentrent sur le choix opéré par les firmes industrielles entre des innovations de processus intégrées et des innovations de bout de chaîne (ou additives) (Oltra et Saint Jean, 2005[105] ; Frondel et al. [57]).

Une autre explication du désintérêt de l'économie pour l'étude de l'impact environnemental des services réside dans le présupposé écologique favorable dont ils font l'objet (Gallouj et Djellal, 2010 [64]). Ils sont en effet considérés comme immatériels et donc non-polluants, si bien que la question de la pollution des services ne se pose pas. Ainsi, l'idée répandue est que la problématique environnementale se situerait hors du champ de l'analyse économique des services. Il s'agirait d'un problème industriel auquel il faut apporter une réponse technologique et industrielle. Cette appréciation des problèmes écologiques dans leurs relations aux services est remise en cause par un certain nombre de travaux récents. Ainsi, Gadrey (2008 [59]) souligne que les économies qui présentent les plus fortes émissions de CO<sub>2</sub> et la plus forte empreinte écologique sont les économies les plus tertiairisées. Peut-on considérer cette constatation comme un paradoxe ? Ou doit-on au contraire en conclure que les services sont responsables de la pollution croissante ? Par quels canaux les services influencent-ils les variables écologiques du système économique ? Ce chapitre tente d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Dans la première section, nous proposons de relire un certain nombre d'auteurs fondateurs de l'économie des services en adoptant une perspective écologique. L'argument tertiaire est souvent avancé pour expliquer les observations statistiques d'un découplage entre la croissance du PIB et celle des émissions polluantes. Nous rendons compte de ces travaux dans la seconde section, avec pour objectif d'évaluer la pertinence de l'hypothèse des services par nature écologiques ("environment-friendly"). Ces deux

sections convergent vers l'idée que les services sont, eux aussi, une source de pollution. Nous montrons dans la troisième section que l'analyse théorique de cette pollution nécessite une définition systémique des services et que parmi les multiples approches systémiques, les systèmes complexes adaptatifs s'avèrent particulièrement intéressants pour mener cette analyse.

## 1.2 Caractéristiques des services et environnement : une relecture de l'économie des services.

*"Le mot 'services' est un terme générique qui s'applique à bien des choses très différentes"* (Bell, 1976 [18] p. 167). Cette observation, partagée par d'autres auteurs (Gadrey, 1992 [58]), souligne la difficulté à surmonter pour proposer une définition du service. Delaunay et Gadrey (1992 [31]) considèrent que l'histoire des services dans la pensée économique est surtout celle de la recherche d'une définition. L'option la plus fréquemment choisie est celle de ne retenir qu'un nombre limité de caractéristiques englobantes. Cette option est initiée par Adam Smith dans *La Richesse des Nations*. Smith décrit en effet les services dans les termes suivants qui traduisent deux caractéristiques distinctives :

- *"The labour of a menial servant [...] adds to the value of nothing"* (cité par Delaunay et Gadrey (1992 [31] p. 12).
- Le travail du prestataire de services *"does not fix or realise itself in any particular subject or vendable commodity. His services generally perish in the very instant of their performance, and seldom leave any trace of value behind them"* (op.cit. p. 12).

Traduits en termes contemporains, ces extraits énoncent respectivement les caractéristiques d'improductivité et d'immatérialité des services. Dans une théorie classique qui considère l'accumulation du capital physique comme le mécanisme fondamental de la croissance, ces activités sont perçues comme un obstacle à l'augmenta-

tion indéfinie des richesses nationales. En revanche, dans une perspective écologique, ces deux attributs peuvent constituer un atout dans l'amélioration des variables environnementales des économies. Les problèmes environnementaux sont traditionnellement classés en deux catégories, à savoir l'épuisement des ressources et la pollution croissante (Van den Bergh et Janssen, 2004 [143]; Brock et Taylor, 2005 [20]). La littérature économique, et en particulier celle consacrée aux services, s'interroge sur les conséquences de l'immatérialité sur la limitation des ressources. C'est cette question que nous abordons dans le paragraphe suivant. Nous examinerons ensuite dans quelle mesure la caractéristique d'improductivité peut conduire à remettre en cause la notion d'immatérialité, du moins à l'échelle de la société.

### **1.2.1 L'immatérialité est-elle un critère de durabilité ?**

La problématique de la limitation des ressources est au cœur du Rapport Meadows (1972, [96]) qui pointe l'impossibilité logique à long terme de la poursuite d'une croissance matérielle infinie dans un monde caractérisé par des ressources naturelles limitées. Le modèle du "*système monde*", initialement élaboré par Jay Forrester et autour duquel est construit le Rapport, prédit une chute brutale et irréversible des niveaux de PIB dès le début des années 2000. Bien qu'il se focalise sur des relations industrielles, le modèle accorde un rôle à certains services au travers des activités d'éducation et de santé. L'éducation y est à l'origine d'une boucle de rétroaction positive pour les ressources, car elle est envisagée comme un moyen de limiter la croissance de la population via son rôle de diffusion des techniques contraceptives. À l'inverse, les services de santé initient une boucle négative en favorisant la hausse de la durée de vie et une baisse de la mortalité infantile. L'impact final de ces services sur les ressources est donc a priori indéterminé.

On retiendra pour notre propos que l'impact de ces services sur les ressources ne repose pas forcément sur leur nature matérielle, mais plutôt sur l'influence qu'ils peuvent avoir sur la dynamique de la population qui, quant à elle, influence fortement le niveau de la consommation des ressources. En d'autres termes, l'immatérialité des

activités elles-mêmes n'implique pas qu'elles n'ont aucune conséquence en termes de consommation matérielle.

Les critiques et commentaires adressés au Rapport Meadows vont ignorer ce point et se concentrer sur le traitement de la technologie par le modèle. Dans une critique à la seconde édition du rapport, Nordhaus (1992 [104]) estime ainsi que la prise en compte du progrès technique dans l'utilisation des ressources et l'inclusion de possibilités de substitution entre capital naturel et capital technique permettent de conclure en la possibilité d'une croissance indéfinie du PIB, du moins à l'échelle temporelle de l'Humanité<sup>1</sup>. Baumol (2010 [9]), parmi d'autres, s'inscrit dans cette perspective technologiste. Il constate que dans la mesure où le progrès technique dans l'usage de l'essence par les voitures est supérieur au rythme de croissance de la consommation des ressources en pétrole, ces dernières progressent au rythme constant de 2 % par an en termes de potentiel de déplacement<sup>2</sup>. En d'autres termes, la prise en compte du progrès technique rendrait caduque la peur de l'épuisement des ressources.

Pour les économistes classiques, l'immatérialité des services remet en cause les notions mêmes d'accumulation et de croissance. Ainsi par exemple, pour Jean Baptiste Say, *"by their very nature, immaterial products cannot be accumulated, and they do not contribute to the increase of the national capital stock"* (cité par Delaunay et Gadrey, 1992 [31] p. 18). Cette idée semble être redécouverte aujourd'hui et sous un angle écologique positif par ceux qui voient, dans l'avènement d'une économie de services, l'émergence d'une nouvelle demande qui cherche plus à satisfaire un besoin que la nécessité de possession d'un bien. Le système que forme cette nouvelle de-

---

1. En suivant Gastaldo et Ragot (2000 [67]), on peut reprocher à Nordhaus d'inclure les conditions de la durabilité de la croissance dans la construction même de son modèle, notamment en permettant à la productivité dans l'usage des ressources de croître à un rythme supérieur à la croissance de la demande de ressources.

2. Une telle vision est néanmoins contestable dans la mesure où le progrès technique n'évolue pas de façon linéaire. Los et Verspagen (2009 [93]) montrent ainsi que le rythme de réduction des émissions de CO2 des voitures diminue au début des années 2000.

mande avec l'offre qui l'accompagne est souvent résumé par l'expression *économie de la fonctionnalité* (Stahel, 1997 [134]; Faucheux et al., 2006 [48]; Vaileanu-Paun et Boutillier, 2012 [141]). Pour Van den Bergh et Janssen (2004, [143]), ce changement de motivation des consommateurs est le résultat de l'immatérialité des services. Dans une telle perspective, la dimension quantitative de la croissance serait remplacée par la recherche de la qualité. Cette idée est largement développée par Bell (1976 [18]) dans sa description de la société post-industrielle.

Bell propose une théorie déterministe de l'*"évolution sociale"* en trois étapes successives : la société préindustrielle, la société industrielle et la société post-industrielle. Le tableau 1.1 en résume les caractéristiques distinctives. D'un point de vue écologique, on remarque que, selon Bell, cette évolution traduit une émancipation progressive des sociétés vis-à-vis des dimensions matérielles. Ainsi par exemple, on passe de l'extraction de ressources dans la société pré-industrielle à la fourniture de services dans la société post-industrielle. Dans le secteur des services lui-même, Bell opère une distinction entre le quaternaire et le quinaire, selon le degré de connexion du service avec la matérialité. De même, la technologie caractéristique de chacun des stades de développement de la société est de moins en moins dépendante de la matière et des ressources naturelles. Cette observation permet de relativiser la critique technologiste adressée par Nordhaus au Rapport Meadows. Nordhaus considère en effet la technologie comme un moyen de dépasser la limitation des ressources, mais le monde post-industriel décrit par Bell n'aurait pas besoin de cette technologie puisque l'idée même de croissance quantitative y serait remise en cause. En effet selon-lui ([18] p.167), *"si la société industrielle se définit par un niveau de vie déterminé par une certaine quantité de biens matériels, la société post-industrielle se reconnaît à la qualité de la vie qu'y assurent les commodités et les satisfactions (santé, enseignement, loisirs, activités culturelles)"*. D'ailleurs, le principe axial de la société post-industrielle n'est plus, selon Bell, ni la limitation des ressources, ni la recherche de la croissance.

TABLE 1.1 – Schémas de l'évolution sociale de Daniel Bell (1976 [18] p. 156)

	<b>Société pré-industrielle</b>	<b>Société industrielle</b>	<b>Société post-industrielle</b>
<b>Zones</b>	Asie, Afrique, Amérique Latine	Europe Occidentale, Union Soviétique, Japon	États-Unis
<b>Secteur économique dominant</b>	Primaire (extraction)	Secondaire (Production de marchandises)	Tertiaire quaternaire (transports, commerce, finance, immobilier), Tertiaire Quinaire (santé, enseignement, recherche, administration)
<b>Structure professionnelle</b>	paysan, mineur, pêcheur, ouvrier non-qualifié	ouvrier semi-qualifié, ingénieur	professionnels, techniciens, scientifiques
<b>Technologie</b>	matières premières	énergie	information
<b>Projet</b>	jeu contre la nature	jeu contre la nature fabriquée (technonature)	jeu entre personnes
<b>Méthodologie</b>	expérience immédiate (bonsens)	empirisme, expérimentation	théorie abstraite : modèles, simulations, théorie de la décision, analyse de systèmes
<b>Relation au temps</b>	orientation vers le passé, réactions coups par coups	adaptation aux nécessités, projections	orientation vers l'avenir, prospective
<b>Principe axial</b>	traditionalisme, limitation des ressources (la terre nourricière)	croissance économique, investissements soumis aux décisions de l'État ou du secteur privé	centralité et codification du savoir théorique

En résumé, l'immatérialité des services peut avoir un impact positif sur les ressources. Cet impact peut dépasser largement le simple cadre de la production. En effet, dans la perspective de l'économie de la fonctionnalité, les services peuvent être un facteur qui permet de détacher les consommateurs de la recherche de la possession matérielle. En revanche, le Rapport Meadows nous permet de souligner que l'immatérialité n'est pas un critère suffisant pour mesurer l'impact environnemental d'une activité. L'une des grandes leçons du Rapport est que chaque activité économique fait partie d'un système plus large dans lequel toutes les activités sont reliées entre-elles par des phénomènes de rétroactions positives et négatives (Forester, 1980 [49]). Il apparaît ainsi que l'influence de la croissance conjointe des services de santé et d'éducation sur les ressources naturelles est indéterminée.

## 1.2.2 L'improductivité, un facteur de matérialité au niveau agrégé

Bell (1976 [18]) ne décrit pas seulement une société post-industrielle dans laquelle la production immatérielle se substitue à la production matérielle, il indique que cette société va émerger nécessairement. Il s'agit d'une conséquence du constat d'improductivité des services.

Fourastié (1963 [50]) est l'un des précurseurs de cette conception déterministe de la tertiarisation. Le point de départ de son analyse est l'élaboration d'une taxonomie des activités économiques. Celles-ci sont classées en trois catégories ou secteurs selon le dynamisme de leur productivité. Les activités du secteur agricole connaissent globalement un "*progrès technique moyen*", celles du secteur industriel un "*progrès technique considérable*" et les activités de services, classées dans le secteur tertiaire, un "*progrès technique faible ou nul*" (Fourastié, 1963 [50] p. 81-82). La croissance du secteur tertiaire est le fruit du couplage des différences de productivité et de la loi d'Engel. Selon cette dernière, l'élasticité-revenu de la demande pour les biens inférieurs (les produits du secteur primaire) est plus faible que l'unité, tandis que celle des produits supérieurs (biens industriels, mais surtout services) dépasse l'unité.

Initialement, la majorité de la population active et de la production se concentrent dans le secteur primaire. Fourastié qualifie cette période d'"*équilibre antérieur*" (p.136). Il s'agit d'un équilibre car, durant cette période, les niveaux de vie sont relativement stagnants. Sans vraiment apporter d'explication sur l'origine du progrès technique<sup>3</sup>,

---

3. Cette explication est au cœur de la *Théorie Unifiée de la Croissance* récemment proposée par Oded Galor (2011 [66]). Il s'agit pour cette théorie de construire des modèles de croissance formels fondés sur l'hypothèse d'effets de seuils pour expliquer la transition démographique et l'accumulation du capital humain. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 3 consacré au rôle des services aux entreprises dans la croissance. Citons également l'observation particulièrement stimulante de Richardson (1999 [121]), qui remarque une explosion des inventions de machines reposant sur des mécanismes systémiques, c'est-à-dire incluant des mécanismes rétroactifs (imbriation d'engrenages divers dont les actions et rétroactions produisent du mouvement), en Europe dans la période précédant la Révolution Industrielle. Étant donné l'importance de la machine à

Fourastié indique que ce dernier permet inmanquablement d'entrer dans une *"période transitoire"*, caractérisée par un déversement de la main-d'œuvre dans les différentes activités des secteurs secondaires et tertiaires. En effet, en raison de la faible élasticité-revenu de la demande de produits agricoles, la croissance de la demande pour ces produits sera inférieure à celle du progrès technique dans le secteur primaire. Ce décalage entre les dynamiques productives et de demande entraîne une baisse du niveau d'emploi dans le secteur primaire. Les personnes sans emplois vont donc devoir chercher à s'employer dans les secteurs à demande croissante : ceux de l'industrie et des services. Ces déversements sont à l'origine *"des crises plus ou moins cycliques, qui ont été si durement ressenties de 1830 à 1945"*(p. 140).

Cette période instable et de forte croissance de la productivité est, selon Fourastié, une étape violente et transitoire. En effet, le différentiel de productivité entre les secteurs secondaire et tertiaire, combiné avec la loi d'Engel qui prédit une satiété de la demande de produits industriels, entraîne le système économique vers un *"équilibre économique futur et inéluctable"* (p. 136) dans lequel la grande majorité des emplois seront concentrés dans les activités tertiaires peu productives. Cette croissance nulle à long terme représente pour l'auteur un espoir à deux niveaux. D'abord parce qu'en l'absence de nouveaux mouvements sectoriels d'emplois, les cycles économiques seront apaisés. Ensuite parce que, dans une perspective plus philosophique, il considère que l'instabilité de la période transitoire prive l'Homme de *"règles générales de vie"* (p. 142) et le précipite dans la guerre. Il décrit ainsi une société de services idéale dépourvue de conflits et dans laquelle la production matérielle serait surtout assurée par des machines.

Du point de vue environnemental, la société tertiaire de Fourastié est beaucoup moins enviable que celle proposée par Bell. En effet, loin de prédire une dématérialisation de la production, Fourastié indique que la production matérielle de la phase tertiaire de l'économie sera *"formidable"*(p. 363), bien que plus ou moins constante.

---

vapeur dans l'émergence de cette Révolution, nous considérons que cette observation constitue une piste féconde pour étudier et expliquer la sortie de la stagnation pré-industrielle.

La raison de cette production industrielle importante est que la loi d'Engel ne permet d'envisager que des phénomènes de satiété relative dans le sens où la demande de biens parvenue à satiété cesse de croître mais ne se réduit pas. Gadrey (2008 [59]) ajoute que les techniques productives utilisées dans la phase tertiaire sont très différentes de celles mises en œuvre dans la société agricole. Ainsi par exemple, les gains de productivité dans l'agriculture sont la contrepartie de l'usage intensif d'engrais et de pesticides, si bien qu'une tonne de blé "tertiaire" est beaucoup plus polluante qu'une tonne de blé "pré-industrielle".

Baumol (1967 [7]) construit son célèbre modèle de croissance déséquilibré à partir du livre de Fourastié<sup>4</sup>. Afin de simplifier la formalisation, il propose une économie composée d'un secteur tertiaire, dont la production est notée  $Y_{1t}$ , et d'un secteur industriel, de production  $Y_{2t}$ . Le secteur industriel est caractérisé par une croissance de la productivité du travail à taux constant et exogène  $r$ . En omettant les constantes du modèle, les productions des deux secteurs à chaque période sont données par  $Y_{1t} = L_{1t}$  et  $Y_{2t} = L_{2t}e^{rt}$ . Baumol ajoute l'hypothèse selon laquelle le salaire macroéconomique croît au rythme de la productivité du secteur progressif, soit  $w_t = We^{rt}$ . On comprend dès lors que le coût unitaire du secteur progressif sera constant, tandis que celui du secteur stagnant va croître au taux  $r$ , c'est ce que Baumol appelle la **maladie des coûts**. Les coûts unitaires des deux secteurs, notés respectivement  $c_{1t}$  et  $c_{2t}$  pour le secteur stagnant et pour le secteur progressif, sont en effet donnés par les équations 1.1 et 1.2, avec  $W$  le niveau de salaire non nul à la période initiale, soit lorsque  $t = 0$ .

$$c_{1t} = \frac{W_t L_{1t}}{Y_{1t}} = \frac{We^{rt} L_{1t}}{L_{1t}} = We^{rt} \quad (1.1)$$

$$c_{2t} = \frac{W_t L_{2t}}{Y_{2t}} = \frac{We^{rt} L_{2t}}{L_{2t}e^{rt}} = W \quad (1.2)$$

Une version plus réaliste du modèle consisterait à indexer  $w_t$  sur l'évolution de la productivité moyenne du travail dans l'économie. De cette façon, le coût unitaire,

---

4. La bibliographie de l'article de Baumol comprend en effet 3 sources bibliographiques, dont l'ouvrage de Fourastié.

et par là même le prix du produit du secteur stagnant, augmenterait un peu moins rapidement que dans l'équation 1.1, et le prix du produit du secteur progressif diminuerait au cours du temps. Baumol indique que, si le produit du secteur stagnant est un bien normal ou inférieur au sens de la loi d'Engel, alors nécessairement, la demande pour ce produit serait inhibée par la maladie des coûts. Cependant, si l'on en croit Fourastié, les services sont un "bien" supérieur, de sorte que la demande de services est suffisamment inélastique par rapport au prix pour maintenir constantes les quantités demandées. Ainsi les services, en raison de leur improductivité et de la maladie des coût, empêchent asymptotiquement toute croissance quantitative de la production.

Ce modèle est compatible avec l'idée d'une production matérielle considérable mais constante à long terme. Il introduit par ailleurs un nouveau concept fondamental, celui de maladie des coûts. Baumol indique que cette maladie a de nombreuses conséquences inattendues. Dans son article de 1967, il considère par exemple qu'elle rend les recettes publiques insuffisantes pour lutter contre les problèmes de pollution. Plus précisément, de nombreux services publics se trouvent dans la catégorie des activités improductives (éducation, santé, police...), leur coût progresse donc à un rythme exponentiel. La loi d'Engel induit une forte demande pour ces services, mais dans le même temps, il est difficile pour les pouvoirs publics de faire progresser les impôts à vitesse exponentielle. En conséquence, les pouvoirs publics vont devoir réduire certaines activités, comme les services d'assainissement de l'environnement ou d'entretien des centres villes. Il est par ailleurs fort possible que l'État doive s'endetter massivement pour maintenir sa prestation de services publics sans hausse d'impôt, réduisant d'autant ses moyens d'actions dans la lutte contre les problèmes environnementaux.

Dans une contribution récente, Baumol (2010 [10]) invoque la maladie des coûts pour expliquer la croissance des rejets de déchets et de la consommation matérielle dans les économies tertiaires. En effet, les services de réparation étant des activités stagnantes, leur prix progresse à un rythme exponentiel tandis que celui des produits

manufacturés diminue régulièrement en raison de gains de productivité supérieurs à la moyenne (en supposant que le salaire est indexé sur la productivité moyenne). Il en résulte qu'il devient peu à peu moins coûteux de jeter un bien défectueux pour en racheter un nouveau plutôt que de le faire réparer.

L'improductivité des services impliquerait donc, selon Baumol, une société tertiaire caractérisée par un environnement et des infrastructures dégradés et des rejets de déchets importants. Prenant appui sur la maladie des coûts de Baumol, Gershuny (1978 [68]) propose de remettre en cause l'idée de société post-industrielle au profit du concept de **société de self-service**. Il reproche à Bell sa conception exclusivement immatérielle du service. Pour Gershuny, biens et services sont en fait deux moyens substituables qui permettent de satisfaire des besoins donnés. Le choix entre ces moyens se fait principalement sur la base d'une comparaison rationnelle de prix. Il en conclut qu'en raison de la maladie des coûts, contrairement aux prédictions de Bell et de Fourastié, la demande de biens est supérieure à celle des services. La constatation d'une augmentation de la consommation de services serait en fait une illusion liée à la croissance particulièrement rapide de leurs prix. Gershuny justifie son analyse en montrant que, si la loi d'Engel est vérifiée à un instant donné, elle semble infondée en dynamique. Autrement dit, la consommation globale suivrait une trajectoire temporelle plutôt favorable à la consommation de biens<sup>5</sup>. Gershuny considère par ailleurs que la tertiarisation des emplois, moteur de l'émergence de la société post-industrielle chez Daniel Bell, peut provenir d'un vaste mouvement d'externalisation. En d'autres termes, la croissance de l'emploi tertiaire serait principalement induite par une réorganisation de l'appareil productif interne à l'industrie et orientée vers la production industrielle plutôt que vers la production de services.

Dans cette section nous n'avons pas encore remis en cause (comme nous le ferons dans la section 3) la définition du service comme une activité économique improduc-

---

5. Remarquons cependant que Gershuny appuie cette affirmation sur la comparaison de lois d'Engel obtenues pour 1954 et pour 1974 et non pas sur des statistiques couvrant toute cette période. La conclusion est alors extrêmement dépendante des années considérées.

tive et dont le produit est immatériel. Malgré tout, nous avons vu que la tertiarisation des emplois et de la production peut très bien s'accompagner d'une croissance de la production matérielle, d'une augmentation de consommation de ressources naturelles, de l'accroissement des rejets de déchets et d'une dégradation de la qualité de l'ensemble des variables environnementales. Dès lors, le constat d'une tertiarisation polluante ne constitue pas, en soi, un paradoxe.

### **1.3 Tertiarisation et découplage écologique, une relation devenue ambiguë**

La question de la relation qu'entretiennent les services avec la pollution (en particulier atmosphérique) a été abordée dans le cadre des travaux empiriques sur la relation croissance-environnement. Ces travaux essaient de vérifier statistiquement l'hypothèse de l'existence d'une relation de Kuznets appliquée à l'environnement. Par analogie aux travaux de Kuznets sur l'évolution des inégalités de revenu le long du processus de développement, il s'agit ici d'étudier l'évolution des émissions polluantes en fonction de l'évolution du niveau de revenu par tête. Stern (2004 [136]) classe ces études en deux groupes, qui se succèdent dans le temps en adoptant des points de vue opposés. Ainsi, si durant la majeure partie des années 1990, le point de vue dominant était celui de l'existence d'une relation quadratique entre le niveau de vie et les émissions, cette conception est aujourd'hui largement remise en cause. Cette remise en cause implique aussi un changement de point de vue sur le signe de la relation services-pollution. Nous présentons successivement ces deux groupes de travaux, en mettant l'accent sur le traitement de la relation services-pollution.

#### **1.3.1 Les services, moteur de la phase décroissante des CKE**

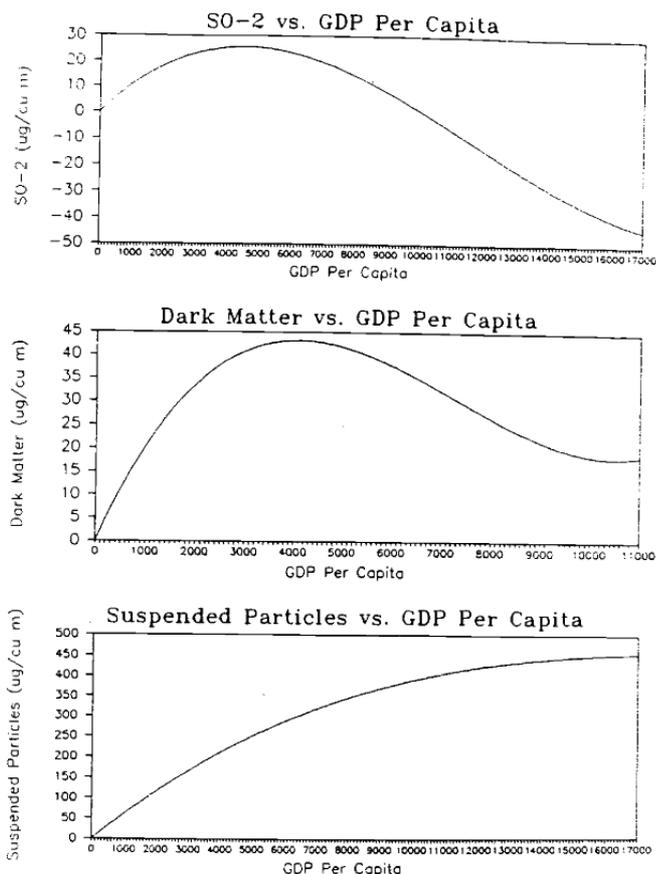
La première étude sur l'existence des courbes de Kuznets environnementales (CKE) est le document de travail de Gene Grossman et Alan Krueger (1991 [70]).

L'ambition initiale de ces auteurs était de répondre aux arguments des opposants à la signature de l'Accord de Libre Échange Nord-Américain. Ces derniers défendaient en particulier l'idée qu'un tel accord pourrait stimuler la croissance économique, et donc accroître les niveaux de pollution. L'autre argument était que le libre-échange favorise la spécialisation des pays dans les secteurs pour lesquels ils ont un avantage comparatif. En raison d'un déficit réglementaire du Mexique en matière de protection de l'environnement, l'opinion publique américaine redoutait une délocalisation massive de l'industrie vers ce pays, qui se spécialiserait donc dans les secteurs polluants. Les préoccupations écologiques étaient par conséquent couplées de motivations protectionnistes. Face à ces arguments, Grossman et Krueger défendent l'idée qu'il est aussi tout à fait possible que le libre-échange favorise le transfert de technologies américaines plus propres vers le Mexique. La présence d'arguments analytiques contradictoires appelle le besoin d'exercices de vérification empirique.

Grossman et Krueger concentrent leur analyse sur les niveaux d'émissions en termes de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), de particules en suspension et en termes de fumées noires mesurés par le Global Environmental Monitoring System entre 1977 et 1988 dans un large panel de villes réparties sur tous les continents. Ils estiment une relation cubique entre chaque polluant et le niveau du PIB par habitant, estimations qui sont illustrées par la figure 1.1. Les émissions de SO<sub>2</sub> et de fumées noires croissent d'abord avec l'augmentation du niveau de vie, pour ensuite décroître au-delà de 5000 \$ par an et par habitant. En revanche, le flux de particules en suspension continue de croître avec le revenu, même si le niveau d'émission tend peu à peu à se stabiliser. Sachant que le revenu par habitant du Mexique est estimé en 1991 à 4996 \$ (constants de 1985), les auteurs concluent que les conséquences environnementales de l'accord devraient être positives. En préparation du Rapport sur le Développement Humain de 1992, Shafik et Bandyopadhyay (1992, [130]) reproduisent une étude similaire pour 10 indicateurs de pollution : le manque d'accès à l'eau potable, le manque d'assainissement urbain, la déforestation annuelle, la déforestation totale, l'oxygène dissout dans les rivières, la présence de coliformes fécaux dans les rivières, les particules en suspension, les émissions de SO<sub>2</sub>, les émissions de déchets municipaux.

poux par habitant et les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par habitant. Tous les polluants finissent par connaître une phase décroissante avec l'augmentation du niveau de vie, à l'exception notable des déchets municipaux et du CO<sub>2</sub>.

FIGURE 1.1 – Les courbes de Kuznets environnementales obtenues par Grossman et Krueger (1991 [70])



L'influence de ces études a été considérable, car elles permettent de sortir d'un cadre de pensée dans lequel la croissance se fait inmanquablement au prix d'une dégradation de l'environnement. Il faut cependant remarquer que les résultats obtenus ne permettent pas de conclusion définitive puisque certaines pollutions s'aggravent avec le niveau de vie. Il n'en reste pas moins que certains auteurs les ont considérés comme des résultats systématiques. Ainsi Beckerman, qui s'était fortement opposé aux conclusions pessimistes du Rapport Meadows (Beckerman, 1972, [16]), déclare en 1992 : *there is clear evidence that, although economic growth usually leads to environmental deterioration in the early stages of the process, in the end the best -*

*and probably the only - way to attain a decent environment in most countries is to become rich"* (Beckerman, 1992 [17] p.482).

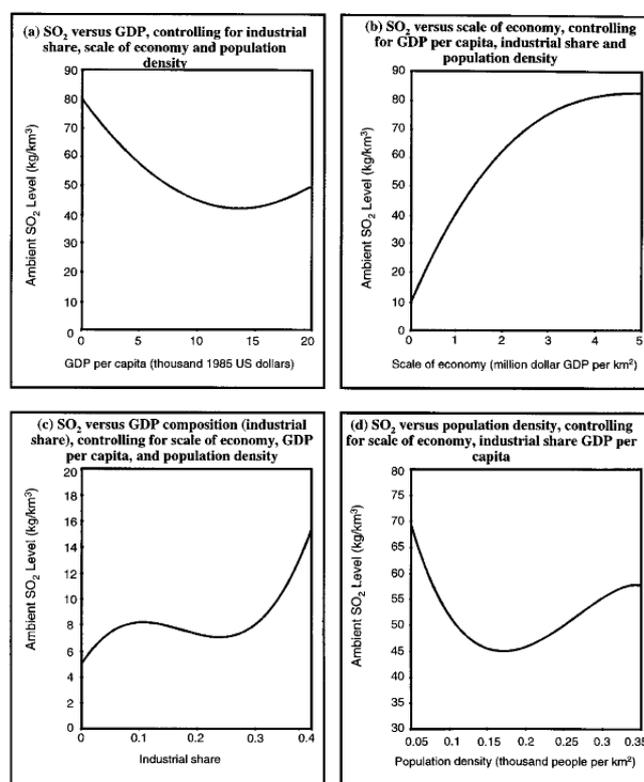
Les interprétations trop optimistes des premières CKE sont remises en cause par Arrow et al. (1995 [89]). La critique de ces auteurs s'articule en quatre points :

1. Seuls les polluants à effet local et impliquant des coûts à court terme admettent une phase décroissante par rapport au niveau de vie.
2. Les courbes CKE représentent l'évolution des flux et non pas des stocks. Ainsi, les niveaux cumulés de pollution peuvent excéder les capacités d'absorption de l'environnement, même dans la phase décroissante de la courbe. Arrow et al. mettent également en garde contre l'existence d'effets de seuil. En effet rien n'indique qu'au-delà d'un certain stock de pollution, des relations systémiques n'entreront pas en jeu, empêchant toute tentative d'assainissement de l'environnement.
3. Aucune relation entre polluants n'est prise en compte.
4. La phase décroissante n'apparaît pas de façon automatique. En effet, *"in most cases where emissions have declined with rising income, the reductions have been due to local institutional reforms, such as environmental legislation and market-based incentives to reduce environmental impacts"* (Arrow et al. 1995 [89]).

Ces remarques soulignent le manque de fondements théoriques des travaux portant sur les CKE. En particulier, l'observation de l'importance des politiques publiques pour expliquer la survenue d'un retournement dans la relation croissance-pollution s'oppose à toute interprétation automatique des travaux de Grossman et Kruger et de Shafik et Bandyopadhyay. Or, c'est justement par un argument automatique que Panayotou (1997 [109]) théorise la forme des CKE. Selon-lui, trois éléments expliquent leur forme en cloche : (1) l'échelle de la production (PIB par  $km^2$ ), (2) l'organisation sectorielle des activités et (3) la demande de la population pour un environnement plus propre. L'échelle de la production induit une hausse

des émissions polluantes au début du processus de développement, puis le passage à une économie tertiaire rendrait la production plus propre, et enfin, du fait de la loi d'Engel, la hausse du revenu pousse les individus à demander des produits de plus en plus écologiques et à engager des dépenses de dé-pollution. Panayotou (1997 [109]) teste la pertinence explicative de ces trois facteurs pour le SO<sub>2</sub> au moyen d'une équation cubique, les résultats qu'il obtient sont illustrés par la figure 1.2.

FIGURE 1.2 – Décomposition de la courbe de Kuznets environnementale réalisée par Panayotou (1997 [109])



On observe une relation globalement croissante entre la part de l'industrie dans le PIB et les émissions de SO<sub>2</sub> sur la partie (c) de la figure<sup>6</sup>. Cette observation apporte une justification statistique à l'idée des services peu polluants, mais elle est contraire à ce que certains travaux en économie des services permettaient de conjec-

6. Cependant, la relation entre la part de l'industrie dans la production et les émissions de SO<sub>2</sub> semble négative pour une production industrielle comprise entre 10 % et 20 % du PIB. Panayotou explique ce phénomène par les interactions complexes entre le niveau de la production industrielle et le niveau du revenu.

turer (Fourastié, 1963 [50]). Par ailleurs, bien qu'il n'ait observé l'impact positif de la tertiarisation que sur les émissions d'un polluant, Panayotou généralise la relation en considérant que : *"At higher levels of development, structural change towards information-based industries and services, more efficient technologies, and increased demand for environmental quality result in levelling-off and a steady decline of environmental degradation"* (Panayotou, 2003 [110] p. 46). Cette justification théorique du point de retournement des courbes de Kuznets environnementales par la tertiarisation est aussi avancée par d'autres auteurs. Ainsi, Kahn (2006 [85]) assimile la production tertiaire à une production écologique et utilise l'argument de la tertiarisation pour expliquer la forme quadratique des CKE pour le SO<sub>2</sub> observées dans les villes majeures de États-Unis.

### 1.3.2 Remise en cause des CKE et services polluants

Arrow et al. (1995 [89]) ont identifié un certain nombre de limites théoriques des études sur les CKE. La prise en compte des composantes de la croissance, notamment de la tertiarisation de la production, a permis de fournir un mécanisme automatique, mais néanmoins biaisé, de l'émergence d'un découplage entre la croissance du niveau de vie et les flux de pollution. Un certain nombre de travaux plus récents (De Bruyn et al., 1998 [30] ; Stern, 2002 [135] ; Stern, 2004 [136]) soulignent quant à eux la faiblesse économétrique de la première vague de travaux sur les CKE. En particulier, De Bruyn et al. (1998 [30]) remettent en cause l'usage des données de panel. En effet, en raison de trajectoires technologiques différentes, mais aussi des variables politiques déjà soulignées par Arrow et al., rien ne permet d'affirmer que la trajectoire moyenne décrite par les CKE sera celle suivie individuellement par tous les pays. Par ailleurs, il semble que la prise en compte de données venant de périodes différentes dans une même étude (cf. par exemple le panel de Grossman et Krueger) conditionne l'obtention d'une courbe en cloche puisque le progrès technologique implique que les données d'émissions les plus récentes, qui correspondent aussi à des niveaux de revenus plus élevés, sont plus faibles. Ainsi, pour Stern (2002 [135]), *"there is evidence that this [le phénomène de découplage] is a time-related*

*effect rather than an income related effect"* (p.201).

Ces critiques invitent à remplacer les données de panel par des données chronologiques dans l'étude de la relation croissance-pollution. Cette relation dynamique doit aussi être estimée pays par pays. De Bruyn et al. (1998 [30]) réalisent une telle étude pour les émissions de SO<sub>2</sub>, de CO<sub>2</sub> et d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) de certains pays développés : les Pays-Bas, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'Allemagne de l'Ouest. La relation estimée pour un pays  $j$  prend alors la forme du processus auto-régressif de l'équation (1.3), tirée de De Bruyn et al.

$$\ln(E_{jt}/E_{jt-1}) = \beta_{0j}\ln(Y_{jt}/Y_{jt-1}) + \beta_{1j} + \beta_{2j}\ln(Y_{jt-1}) + \beta_{3j}\ln(P_{jt}/P_{jt-1}) + e_j \quad (1.3)$$

$E$  représente le flux de pollution,  $Y$  est le niveau du PIB et  $P$  représente un indice du prix de l'énergie.  $\beta_{1j}$  est négatif pour tous les pays, il représente l'effet du temps, en fait du progrès technologique, sur les émissions polluantes. Le paramètre  $\beta_{0j}$  permet quant à lui d'isoler l'effet du taux de croissance du PIB sur celui des émissions polluantes. Les auteurs obtiennent une valeur positive pour  $\beta_{0j}$  dans tous les pays, à l'exception des Pays-Bas. Les signes opposés des coefficients  $\beta_{1j}$  et  $\beta_{0j}$  suggèrent ainsi que la croissance économique devient source d'accroissement de la pollution au-delà d'un certain taux de croissance du PIB. Les estimations de ce taux figurent dans le tableau 1.2. Ainsi, par exemple, une croissance annuelle de l'activité économique supérieure à 0.3 % aux États-Unis implique une hausse des émissions de CO<sub>2</sub> du pays.

TABLE 1.2 – Taux de croissance du PIB au-delà duquel les émissions nationales de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de SO<sub>2</sub> augmentent (tiré de De Bruyn et al., 1998 [30])

Pays	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (%)
Pays-Bas	1,8	2,1	11,2
Royaume-Uni	1,8	1,2	2,4
États-Unis	0,3	2,6	3,8
Allemagne de l'Ouest	2,9	4,5	5,2

Ces résultats contrastent avec les conclusions des premières études sur les CKE, qui suggéraient qu'une croissance forte pouvait permettre de réduire les niveaux d'émissions pour les pays riches. On observe également que la réduction des émissions de SO<sub>2</sub> des pays riches, qui était même considérée comme un fait stylisé par les premières études sur les CKE, n'est plus garantie. Enfin, les situations nationales sont très différentes, ce qui suggère l'existence de trajectoires spécifiques à chaque pays et remet donc en cause l'idée d'une trajectoire générale et universelle.

Dans un article de 2002, Stern [135] réutilise des données de panel sur les émissions de SO<sub>2</sub>, mais pour estimer cette fois une relation dynamique et avec des variables binaires permettant de capter l'effet de chaque pays dans l'évolution des émissions. L'intérêt de ce travail pour notre réflexion sur les services est qu'il identifie l'effet du secteur des services sur la dynamique des émissions. On note alors qu'il met en évidence un impact positif de la production tertiaire sur les émissions de SO<sub>2</sub>. Plus précisément, les résultats de Stern (2002 [135]) indiquent qu'une augmentation de 1 % de la production de services produit une croissance de 0.033 % des émissions de SO<sub>2</sub>. La relation est faible, mais significative. En parallèle, l'auteur observe qu'une hausse de la production industrielle réduit les émissions de SO<sub>2</sub>. Selon lui, une explication envisageable de ces résultats surprenants est la suivante : *"Service sector expansion occurs alongside expansion of consumer use of energy in homes and road transport. Technical change in the consumer sector tends to increase energy use, while in the manufacturing sector technical change tends to reduce energy use"* (p. 212).

En résumé, la nouvelle vague d'études sur la relation croissance-pollution re-

jettes en partie l'idée d'existence de la relation quadratique (ou cubique selon les études) décrite par les premières courbes de Kuznets environnementales. Tandis que les services avaient fourni le principal argument, à la fois sur le plan théorique et statistique, pour expliquer le point de retournement des flux d'émissions, il semble désormais, au contraire que la croissance de la production tertiaire s'accompagne d'une hausse des émissions polluantes. Ce constat vaut même pour le dioxyde de soufre, dont la décroissance des rejets était jusqu'alors considérée comme un fait stylisé. Ce résultat peut paraître surprenant, dans la mesure où ce sont les processus de combustion qui sont l'origine principale des émissions de SO<sub>2</sub>. Il suggère en tout cas de réviser la façon dont on envisage le processus productif des services. Pour le dire autrement, ce processus est peut-être plus matériel et polluant que ne le suggèrent les caractéristiques d'immatérialité et d'improductivité identifiées par Adam Smith, caractéristiques qui continuent d'être au cœur de la définition des services dans les travaux contemporains. Par ailleurs, on peut souligner la pertinence de certains travaux précurseurs en économie des services (Fourastié, Gadrey, Gershuny et Baumol) qui ont identifié le caractère polluant des économies tertiaires et parfois mis en garde contre l'illusion d'économies tertiaires par nature écologiques.

## **1.4 Un cadre analytique pour aborder la pollution des économies tertiaires**

Stern (2002 [135]) justifie la corrélation positive entre la croissance des émissions polluantes et celle de la production tertiaire par deux arguments : tout d'abord parce que les services consomment de l'énergie, notamment pour les bâtiments, et ensuite parce que la croissance du secteur des transports est très polluante. Cette analyse nous invite à sortir du cadre retenu jusqu'ici pour définir un service, à savoir celui d'une activité immatérielle. Il s'agit de mettre en évidence les différents éléments qui, dans le processus de production d'un service, sont source de pollution. Cette perspective est au cœur d'un certain nombre de travaux récents (Gadrey, 2008 [59] ;

Fourcroy et al., 2011 [51]) dont nous rendons compte dans le premier paragraphe. Nous introduisons ensuite le cadre systémique que nous privilégions. Celui-ci est au cœur de la conception environnementale des services chez Baumol (2010 [10]) et Gadrey (2008 [59]).

### 1.4.1 Les implications environnementales d'une re-définition des services

Gadrey (1992 [58]) souligne l'insuffisance de la définition traditionnelle des services par leurs caractéristiques techniques distinctives. En effet, les services sont hétérogènes. Certains d'entre-eux ne sont pas concernés par les caractéristiques d'immatérialité et d'improductivité. Le transport routier et la distribution d'électricité, par exemple, reposent sur des investissements matériels importants. De même, en dépit des difficultés de mesure de la productivité, notamment en raison d'un produit souvent difficile à identifier (Djellal et Gallouj, 2008 [37]), certains services sortent du cadre des activités stagnantes. Wolff (2002 [153]) classe ainsi les services de transport, de communication et ceux de fourniture d'électricité et de gaz parmi les activités productives.

En poursuivant l'effort de re-définition entrepris par Peter Hill (1977 [76]), Gadrey (1992 [58]) définit un service comme *"une opération visant une transformation d'état d'une réalité C, possédée ou utilisée par un consommateur (ou client ou usager) B, et souvent en relation avec lui, mais n'aboutissant pas à la production d'un bien susceptible de circuler économiquement indépendamment du support C"* (p. 17). Cette définition laisse transparaître différentes sources de matérialité et d'externalités. Il y a d'abord la nécessité d'un déplacement, qu'il s'agisse de celui du prestataire A, de l'utilisateur B ou bien du support C. Stern (2002 [135]) souligne en effet la croissance du secteur des transports qui accompagne la tertiarisation de la production. Ainsi, entre 1960 et 2009, la part du transport routier dans les émissions françaises de CO<sub>2</sub> est passée de 7 % à 32 % (tableau 1.3 et figure 1.3). Cette croissance s'explique

en partie par la forte réduction d'émissions observée dans l'industrie manufacturière et dans le secteur de l'énergie, dont les émissions de CO<sub>2</sub> passent respectivement de 128 et 80 millions de tonnes en 1960 à 82 et 59 millions de tonnes en 2009. La croissance de la part du transport routier s'explique aussi par une forte croissance de ses propres émissions, qui passent de 21 à 117 millions de tonnes sur la période. La figure 1.3 nous révèle par ailleurs que les émissions du secteur résidentiel/ tertiaire sont plutôt stables depuis 1985, même si globalement, elles ont progressé depuis 1960 (tableau 1.3).

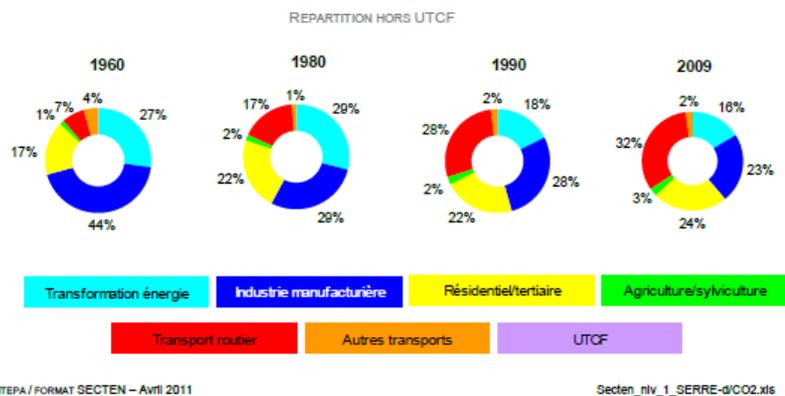
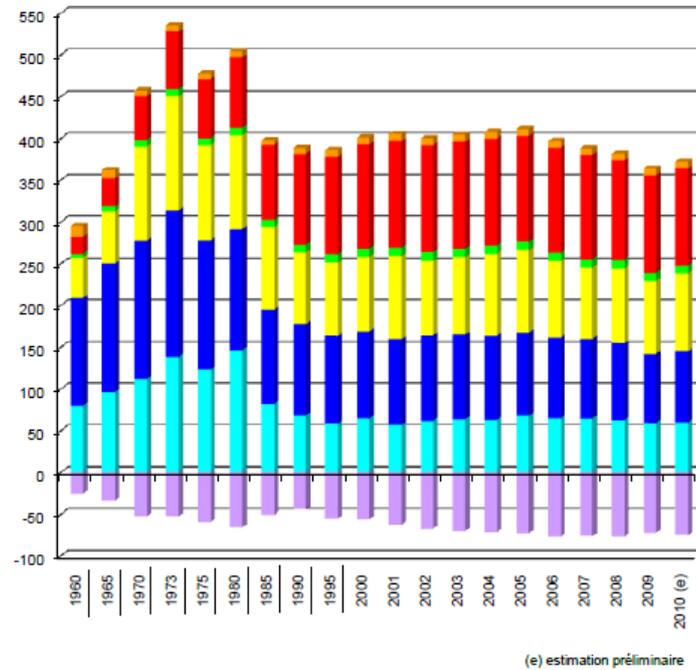
TABLE 1.3 – Émissions de CO<sub>2</sub> par secteurs en millions de tonnes en France métropolitaine (CITEPA, 2011 [27])

Année	Énergie	Industrie manufacturière	Résidentiel tertiaire	Agriculture sylviculture	Transport routier	Autres transports	Total hors UTCF	UTCF	Total avec UTCF	hors total
1960	80	128	49	3,9	21	12,8	295	-26	269	6
1973	138	175	136	8,9	69	7,0	535	-52	482	20
2009	59	82	87	9,7	117	7,8	364	-72	292	24

Données source : <http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv1>

Dans le tableau, UTCF signifie "Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt". Les valeurs négatives indiquent que ce "secteur" absorbe plus de CO<sub>2</sub> qu'il n'en rejette dans l'atmosphère.

FIGURE 1.3 – Émissions de CO<sub>2</sub> par secteurs en millions de tonnes en France métropolitaine (CITEPA, 2011 [27] p. 38)



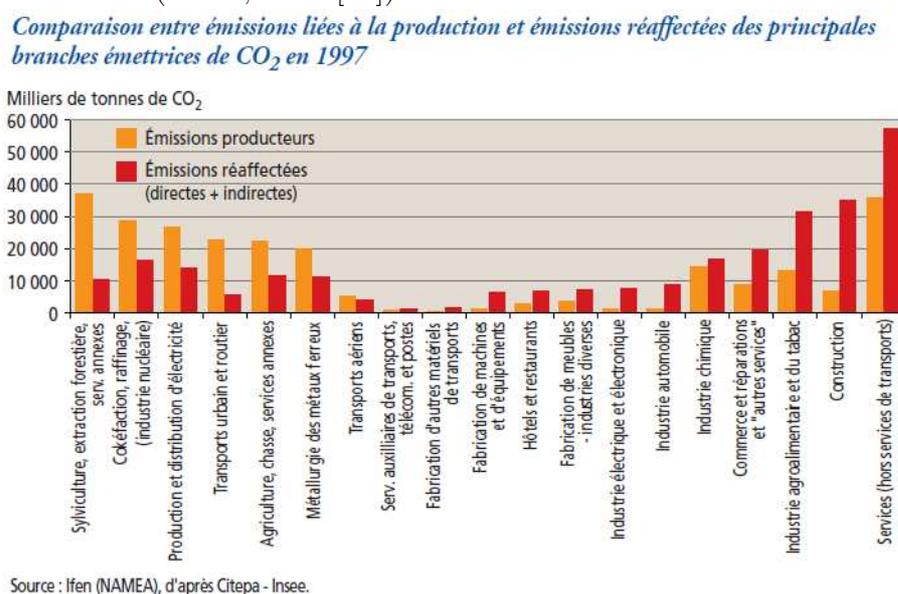
Selon Gadrey (2008 [59]), dans une économie où près de 80 % de la valeur ajoutée<sup>7</sup> est produite par les services, une part importante des transports réalisés doivent avoir été principalement initiés par des activités de services. Cette remarque est formulée dès 2004 par l’Institut Français de l’Environnement (IFEN [79]), qui réaffecte les émissions de CO<sub>2</sub> des branches d’activité<sup>8</sup>. Le principe de cette réaffectation est le suivant : si une production d’une branche entre en tant que consommation inter-

7. La Banque Mondiale évalue la part des services dans le PIB en France à 77 % en 2009 : <http://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TETC.ZS>.

8. Au sens de la Nomenclature d’Activités Française, NAF

médiaire dans une autre branche, alors les émissions de CO<sub>2</sub> de la branche primo productrice sont comptabilisées comme des émissions de la branche cliente. Le résultat de cette réaffectation est présenté dans la figure 1.4. On y observe que la plupart des branches de services apparaissent beaucoup plus polluantes qu'auparavant, si bien qu'au lieu de représenter environ 25 % des émissions françaises de CO<sub>2</sub>, les services hors transport représenteraient environ un tiers des émissions après réaffectation (IFEN, 2004 [79]). Fourcroy et al. (2012 [51]) s'inscrivent également dans une démarche de réaffectation en proposant d'ajouter à la consommation d'énergie des services celle qui est nécessaire aux transports des personnes en amont et en aval de la prestation de services. Il s'ensuit que la part des services dans la consommation totale d'énergie en France en 2007 s'élèverait, selon les estimations des auteurs, à 20 % au lieu de l'estimation officielle de 15 %.

FIGURE 1.4 – Réaffectation des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports vers les secteurs initiateurs (IFEN, 2004 [79])



L'autre source de pollution dans les services qui transparait dans la définition de Hill-Gadrey est celle de la matérialité du lieu dans lequel se déroule la prestation de services. De ce point de vue, les émissions de CO<sub>2</sub> rapportées par le CITEPA et reproduites sur la figure 1.3 et le tableau 1.3 semblent plutôt pertinentes, puisqu'elles comprennent les émissions liées au chauffage et à l'entretien des bâtiments.

Ces émissions ont presque doublé sur la période 1960-2009, passant de 49 à 87 millions de tonnes. On observe un pic en 1973 et une certaine stabilisation durant les années 2000. On peut expliquer la forte baisse des émissions, tous secteurs confondus entre 1973 et 1985, par l'expansion du parc de réacteurs nucléaires suite aux chocs pétroliers. Une dernière source de matérialité est, selon Gadrey (2008 [59]), celle des outils et du support de la prestation de services. Fourcroy et al. (2011 [51]) estiment que 20 % de la consommation d'énergie du secteur des services s'expliquerait par l'usage des technologies de l'information.

La définition du service proposée par Hill et Gadrey permet donc d'identifier leurs sources potentielles de pollution. Cette redéfinition invite également à réaffecter une partie des émissions des autres branches, notamment de transport, aux branches de services hors-transport. Cette opération révèle la possibilité d'un rôle moteur des services dans la croissance de la production et de la pollution, et elle met également en évidence la nature systémique du problème de la pollution. Nous développons cette approche dans le paragraphe suivant.

#### **1.4.2 Appréhender la pollution des économies tertiaires par les systèmes complexes adaptatifs**

Les objections soulevées par Arrow et al. (1995 [89]) aux courbes de Kuznets environnementales plaident en faveur d'une approche du phénomène de pollution par la théorie des systèmes. C'est en particulier évident lorsque ces objections soulignent la possibilité d'une interdépendance entre les différents types de polluants et l'existence possible d'un seuil au-delà duquel la pollution pourrait engendrer des conséquences irréversibles. De même, nous avons constaté qu'une définition des services plus élaborée que l'énoncé de simples caractéristiques techniques intrinsèques invite à tenir compte des interactions multiples entre les services et le reste de l'économie et à opérer une certaine réaffectation des émissions de CO<sub>2</sub>.

La notion de système est particulièrement féconde dans tous les domaines scien-

tifiques, mais aucune définition ne faisant autorité, le concept demeure plutôt flou. Ainsi par exemple, Richardson (1999 [121]), dans son ouvrage sur l'histoire des systèmes en sciences sociales, lui préfère le concept de rétroaction. La rétroaction semble en effet être un trait commun à tous les systèmes : même le système mathématique le plus simple inclut au minimum deux équations linéaires à deux variables interdépendantes. Pumain et al. (1989 [117]) proposent une définition simple et très large du système comme "*un ensemble d'éléments en interaction*" (p.12). Une classe particulière de systèmes, qualifiés de "*systèmes dynamiques complexes*", présente un certain nombre de propriétés, particulièrement intéressantes en économie (Tessfatsion, 2006 [?] p. 836).

Le système dynamique est "*composé d'unités en interaction*".

Il présente "*des propriétés émergentes, c'est-à-dire des propriétés découlant des interactions des unités sans être les propriétés des unités elles-mêmes*"<sup>9</sup>.

Plus précisément, lorsque les interactions entre les unités d'un système deviennent suffisamment denses, le comportement des variables agrégées du système, résultat de nombreux processus de rétroactions interdépendantes, devient en quelque sorte autonome, car difficile à expliquer par les caractéristiques des unités qui composent le système. On parle alors, pour décrire la dynamique agrégée, de **phénomène émergent** (Holland et Miller, 1991 [78]; Dessalles et Phan, 2006 [34]), ou bien encore d'**auto-organisation** (Pumain et al., 1989 [117]). Ainsi, un phénomène micro-économique peut avoir des conséquences agrégées surprenantes. L'exemple des conséquences multiples de la maladie des coûts (Baumol, 1967 [7]; Baumol, 2010 [10]) démontre la pertinence de cette classe de systèmes lorsqu'on traite des activités de services.

Malgré la pertinence des systèmes dynamiques complexes, leur usage en économie a été particulièrement critiqué après la publication du Rapport Meadows (1972 [96]), dont les conclusions sont fondées sur le "système-monde" de Forrester. En particulier,

---

9. Traductions personnelles.

Nordhaus (1992 [104]) identifie deux faiblesses des systèmes dynamiques complexes :

*"À la lumière des développements dans la compréhension des systèmes non-linéaires ces vingt dernières années, il semble apparent que le comportement dynamique du modèle, extrêmement compliqué, de 'Limits 1' [c'est-à-dire le système monde de la première édition du Rapport Meadows] n'était pas totalement compris (ou même compréhensible) par quiconque, ni par les auteurs, ni par les critiques" (p. 15) ;*

*"Il est maintenant connu que les systèmes non-linéaires du type de ceux présentés dans Limits to Growth peuvent se comporter de manière étonnamment riche et compliquée, et que leur comportement est sensible à de petits changements de spécification, de paramètres et de conditions initiales."<sup>10</sup> (p. 17) ;*

Autrement dit, il est difficile d'expliquer les raisons du comportement agrégé du système et la forte sensibilité des dynamiques agrégées aux valeurs des paramètres et à la spécification des fonctions mathématiques utilisées rendent les résultats contestables. À la première critique on peut répondre que l'étude des phénomènes émergents fait désormais l'objet d'un intérêt particulier, notamment à l'aide d'une nouvelle classe de systèmes appelés *"systèmes complexes adaptatifs"*. Holland et Miller (1991 [78]) définissent le système complexe adaptatif avant tout comme un type particulier de système complexe ayant les trois caractéristiques suivantes (p. 365) :

*"Il consiste en un réseau d'agents en interaction".*

*"Il présente un comportement dynamique agrégé qui émerge des activités individuelles des agents".*

*"Son comportement agrégé peut être décrit sans une connaissance détaillée du comportement des agents individuels"<sup>11</sup>.*

L'accent est donc mis sur l'étude du phénomène émergent en tant que tel. On

---

10. Traductions personnelles.

11. Traduction personnelle.

note par ailleurs que les parties constitutives du système ne sont plus des unités abstraites, mais des agents qui ont un comportement particulier. Ce comportement est adaptatif si les deux conditions suivantes sont vérifiées (p.365) :

*"Une valeur peut être assignée aux actions de l'agent dans son environnement (performance, utilité, profit, fitness, ou analogue).*

*"L'agent se comporte de façon à augmenter cette valeur au cours du temps"<sup>12</sup>.*

Ainsi, Holland et Miller indiquent que, même si une connaissance précise des comportements n'est pas nécessaire pour étudier les propriétés émergentes d'un système, il peut quand même être utile d'étudier l'influence de différents comportements individuels sur ces propriétés, notamment pour valider certaines hypothèses théoriques. Epstein et Axtell (1996 [47]) vont même jusqu'à envisager cette possibilité analytique comme une nouvelle démarche épistémologique en sciences sociales. Selon eux, les systèmes complexes adaptatifs peuvent permettre de rechercher et de formuler des *"explications suffisantes"* (p. 20) aux phénomènes agrégés du monde réel dans le sens où, si des comportements individuels permettent de générer un phénomène pertinent, alors ces comportements en sont une explication plausible.

La deuxième critique adressée par Nordhaus au modèle du Rapport Meadows, et en fait à tous les systèmes dynamiques complexes, est leur forte sensibilité aux valeurs des paramètres et aux formes fonctionnelles choisies. La modélisation des comportements dans le cadre des systèmes adaptatifs permet de limiter l'usage de formes fonctionnelles spécifiques. En ce qui concerne l'extrême sensibilité du système, elle peut désormais être testée par l'usage de tests économétriques (test de racines unitaires) et fortement réduite par la pratique d'analyses de sensibilité au cours desquelles on répète un grand nombre de fois les simulations pour un large intervalle de valeurs pour les paramètres clés du système (Pyka et Fagiolo, 2007 [118]).

Nous avons vu que la théorie des systèmes est pertinente pour aborder les pro-

---

12. Traduction personnelle.

blèmes environnementaux. La classe particulière des systèmes complexes adaptatifs semble de plus particulièrement utile pour modéliser la prestation de service dans la mesure où, selon Gadrey (1992 [58]), cette prestation peut être envisagée comme le produit d'une interaction entre agents. Suivant la notion d'adaptation individuelle, qui est au cœur de cette classe de systèmes, nous pouvons repenser notre question de recherche générale. Sous cet angle adaptatif, une façon de traiter le problème de la pollution dans les services est de répondre aux questions suivantes :

*Quels changements dans les comportements individuels et dans les interactions entre agents (individus, entreprises...), qui sont induits par le processus de tertiarisation, ont une influence (positive ou négative) sur les niveaux de pollution et leurs dynamiques au niveau agrégé ? Comment utiliser ces changements pour réduire les niveaux de pollution des économies tertiaires ?*

Notre objectif dans cette thèse est d'apporter des éléments de réponse à ces deux questions. Conformément au cadre analytique présenté dans ce chapitre, nous proposons d'aborder ces deux questions par la construction de systèmes complexes adaptatifs (ou systèmes multi-agents).

## 1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons souligné que que la tertiarisation polluante n'est pas vraiment un paradoxe, d'abord parce que les économies tertiaires reposent sur la consommation de masse de biens matériels et aussi parce que la pollution des activités de services est largement sous-estimée.

Une définition d'un service plus élaborée que l'approche en termes de caractéristiques techniques intrinsèques (immatérialité, interactivité) s'est révélée nécessaire pour aborder cette pollution au niveau micro-économique. Les services sont alors apparus particulièrement imbriqués aux autres activités économiques. Partant de ce constat de l'existence de relations systémiques entre les différents secteurs de l'éco-

nomie, un certain nombre de travaux récents attribuent aux services une partie des pollutions liées aux activités de transport. Cette approche nous semble nécessaire. Cependant, à moins d'aboutir à la conclusion que les services sont plus polluants que les activités industrielles, une telle réaffectation ne peut expliquer la croissance de la pollution pendant la période de tertiarisation.

Nous proposons en conséquence d'envisager le phénomène agrégé de pollution et sa dynamique comme des phénomènes émergents du système économique conçu comme un système complexe adaptatif. Dans le chapitre suivant, nous tenterons ainsi d'expliquer cette pollution croissante par les comportements adaptatifs des agents pendant la phase de tertiarisation de l'économie.

## Chapitre 2

# La société de consommation : un produit de l'adaptation des agents à la tertiarisation du système économique ?

### 2.1 Introduction<sup>1</sup>

La loi d'Engel décrit la façon dont les consommateurs modifient la répartition de leur revenu entre différents postes de dépenses lorsque ce revenu augmente. Selon cette loi, le budget alloué à la consommation de produits de base progresse moins vite que le revenu, tandis que celui consacré à la consommation de produits de luxe (ou produits supérieurs) croît plus vite. Les services étant globalement considérés comme des consommations supérieures (Fourastié, 1963 [50]), cette loi joue un rôle fondamental dans le mécanisme de tertiarisation. On ne peut pas véritablement la considérer comme un mécanisme adaptatif, car selon cette loi, c'est la seule croissance du revenu qui influence les postes de dépenses, indépendamment de toute influence interpersonnelle ou de toute stratégie d'entreprise. De plus, le mouvement

---

1. Certains résultats de ce chapitre ont été publiés dans : B. Desmarchelier, F. Djellal, F. Gallouj (2011), "Economic growth by waste generation : the dynamics of a vicious circle", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, n652.

adaptatif envisagé par la loi d'Engel est pré-déterminé, dans le sens où l'on sait par avance que l'individu se dirige vers une consommation de services de moins en moins matériels.

Dans le modèle de croissance déséquilibrée de Baumol (1967 [7]), c'est cette évolution autonome de la demande qui dicte l'évolution de la répartition sectorielle de la production et des emplois. Dans ce modèle, le comportement adaptatif des entreprises apparaît aussi très limité, puisque seules les entreprises industrielles y sont capables d'innover au moyen d'innovations de processus introduites de manière continue.

Ces hypothèses en matière d'innovation des entreprises et d'évolution des préférences des consommateurs, bien qu'usuelles dans les théories de la croissance tertiaire (Baumol, 1967 [7] ; Fourastié, 1963 [50] ; Gadrey, 1992 [58]), sont rejetées dès les années 1930 par Schumpeter (1935 [129])<sup>2</sup>. Selon cet auteur, les innovations arrivent par groupes (et non pas de manière continue). Elles sont par ailleurs très diverses : il peut s'agir d'un nouveau produit, d'une nouvelle méthode de production, de la découverte d'un nouveau débouché, d'une nouvelle source de matières premières ou bien encore d'un nouveau mode d'organisation (p. 95). Ces innovations éloignent le système économique de l'équilibre car elles en modifient tous les fondamentaux (technologie, préférences des consommateurs, niveaux des prix...). Dans le "modèle" schumpeterien initial, c'est l'entrepreneur-innovateur qui a l'initiative sur la demande. *"Il crée sans répit, car il ne peut rien faire d'autre"* (p. 134). Ainsi, ce n'est pas l'appareil productif qui s'adapte aux aspirations du consommateur, contrairement à ce que suggèrent à la fois le modèle de Baumol et la loi d'Engel (à travers l'hypothèse des préférences pré-déterminées du consommateur). Dans une perspective schumpeterienne, c'est plutôt l'entrepreneur qui vient modifier par à coups les préférences du consommateur, au rythme de ses innovations. *"Les innovations en économie ne sont pas, en règle générale, le résultat du fait qu'apparaissent d'abord chez les consommateurs de nouveaux besoins, dont la pression modifie l'orientation*

---

2. L'édition consultée est la ré-édition de 1999 chez Dalloz.

*de l'appareil de production, mais du fait que la production procède en quelque sorte à l'éducation des consommateurs et suscite de nouveaux besoins, si bien que l'initiative est de son côté*<sup>3</sup> (p. 94).

La loi d'Engel apparaît donc comme un outil dont la pertinence est limitée pour expliquer la tertiarisation lorsque l'on raisonne en dynamique : sur le long terme, les multiples innovations de produit qui surviennent au sein de l'appareil productif peuvent modifier les préférences des consommateurs, les faisant dévier du sentier décrit initialement par la loi d'Engel. C'est ainsi que nous interprétons la remarque de Gershuny (1978 [68]) selon laquelle cette loi est vérifiée à un instant  $t$  mais pas en dynamique : à long terme, les innovations de produit réalisées dans l'industrie peuvent en effet agir comme un facteur de "rétention", c'est-à-dire de maintien et de renforcement, de la demande pour les biens, même en présence d'un revenu croissant et donc d'une demande qui arrive à satiété. Remarquons cependant que, contrairement à Gershuny, nous ne concluons pas que les individus vont préférer les biens aux services à long terme. Nous considérons plutôt que la croissance de la consommation tertiaire peut être fortement ralentie par les efforts d'innovation déployés par les firmes industrielles, ce qui peut réduire la corrélation positive en termes réels entre le niveau de revenu et la consommation de services lorsque l'on considère cette relation dans le temps long.

La dynamique de la consommation est donc un point faible des théories de la croissance tertiaire, qui sont fondées sur la loi d'Engel. Or, pour Panayotou (2003 [110]), la consommation est justement l'obstacle principal à l'amorçage d'une réelle phase de dé-pollution dans les économies développées, car sa croissance fait plus que compenser l'effet environnemental positif du progrès technique. Ainsi peut-on dire que les théories de la croissance tertiaire ne permettent pas d'évaluer l'impact environnemental réel d'une tertiarisation des activités. En particulier, la conception

---

3. On retrouve ici le débat entre innovation "science push" et innovation "demand pull" (Kline et Rosenberg, 1986 [90]), Schumpeter s'inscrivant dans le premier camp, tandis que les théories traditionnelles de la croissance tertiaire s'inscrivent plutôt dans le second.

schumpeterienne de l'innovation suggère qu'il est fort possible que la consommation matérielle soit plus forte qu'escompté, notamment en raison du comportement adaptatif des firmes industrielles qui consiste à réaliser des innovations incrémentales et de produit, capables d'influencer le jugement des consommateurs.

Ce chapitre a pour objet de tester cette hypothèse d'une tertiarisation associée à une stratégie de "rétention" de la demande par les firmes industrielles. Pour réaliser cet objectif, nous construisons un système complexe adaptatif -ou système multi-agents- de croissance et de tertiarisation. Dans la première section, nous vérifions que la consommation est bien une source majeure d'externalités environnementales dans les pays développés et nous identifions quelques faits stylisés du corolaire direct de cette consommation : la génération de déchets par les ménages. Dans la seconde section, nous abordons un certain nombre de théories néo-schumpeteriennes du changement structurel et de la croissance, qui mettent en avant des comportements adaptatifs potentiellement générateurs d'externalités environnementales. Dans la troisième section, nous construisons un système multi-agents sur la base des comportements identifiés, à savoir le développement de l'obsolescence planifiée pour les entreprises, et celui de la consommation pour motif démonstratif pour les consommateurs. Nous testons ensuite (section 4) la capacité du modèle à générer les faits stylisés observés dans la section 1. Il s'agit en particulier de vérifier si notre hypothèse de comportement adaptatif des agents au cours de la tertiarisation est suffisante pour expliquer le blocage des économies tertiaires dans la consommation matérielle et la pollution. Enfin, nous terminons ce chapitre par une recommandation de politique publique susceptible de permettre de sortir du verrouillage consumériste.

## 2.2 La consommation, moteur de la pollution des économies tertiaires

Dans cette section, nous essayons d'identifier l'influence de la consommation sur l'évolution de trois indicateurs qui révèlent un accroissement de la pression exercée par l'économie sur l'environnement pendant la tertiarisation des activités. Ces indicateurs sont la consommation de matière par l'économie, les rejets et CO<sub>2</sub> et la production de déchets.

Mettant en doute l'idée répandue d'une dématérialisation progressive des économies développées, Ayres et al. (2004 [4]) évaluent la masse (en million de tonnes) de la production américaine et son évolution entre 1900 et 1998 (figure 2.1 (a)). Leur étude révèle une croissance progressive de cette masse sur toute la période étudiée, avec même une certaine accélération durant les années 1960 (jusqu'au choc pétrolier de 1973) et durant les années 1990.

La recherche des facteurs de cette croissance les conduit à étudier l'évolution d'un autre indice, à savoir la masse par unité de PIB (figure 2.1 (b)). On observe que l'indice *Masse/PIB* a presque été réduit de moitié entre 1900 et 1998, ce qui traduit l'existence d'un progrès technique favorable à la réduction de l'usage de matière dans la production américaine. Cette réduction, qui semble avoir débuté dans les années 1920-1930, est contraire à la croissance globale de la masse de la production américaine. Selon Ayres et al., c'est la croissance de la consommation qui empêche la réduction de la masse globale. Pour éclairer la relation qui existe entre les deux indices, on peut considérer la relation comptable décrite par l'équation (2.1).

$$M = \frac{M}{Y} \times \frac{Y}{N} \times N \quad (2.1)$$

$M$ ,  $Y$  et  $N$  représentent respectivement la masse en tonnes, le PIB (en dollars constants) et le niveau de la population. La masse  $M$  croît progressivement (figure 2.1 (a)), tandis que l'indice  $\frac{M}{Y}$  diminue (figure 2.1 (b)). Cette croissance de  $M$

s'explique donc par une croissance du PIB,  $\frac{Y}{N} \times N$ , supérieure à la baisse de  $\frac{M}{Y}$ . Selon Ayres et al. (2004 [4]), cette croissance supérieure est surtout le fruit d'une forte croissance de la consommation par tête, évaluée ici par l'indice  $\frac{Y}{N}$ .

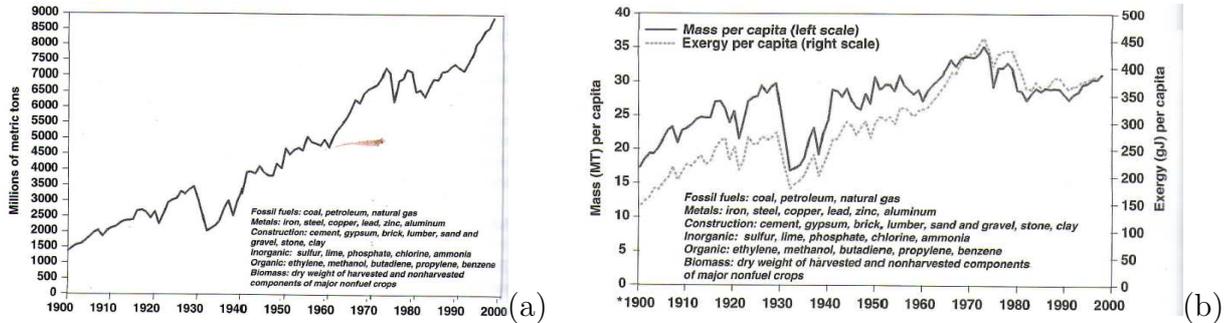


FIGURE 2.1 – Évolution de la masse (en millions de tonnes) de l'économie américaine entre 1900 et 1998(a) par unité de PIB, (b) par tête. Source : Ayres et al. (2004 [4]).

Notre second indice de pollution est l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans le domaine de l'évaluation de la pollution atmosphérique, les normes internationales adoptent une perspective de production en recommandant aux agences nationales d'évaluation de ne prendre en compte que les émissions des unités productives situées sur le territoire national. Une telle évaluation ignore donc les phénomènes de délocalisation et/ ou d'importation des productions polluantes. Le CITEPA<sup>4</sup>, agence officielle française dans le domaine de la mesure de la pollution atmosphérique, adopte cette perspective et conclut à une diminution des émissions nationales de CO<sub>2</sub> de 10 % entre 1990 et 2010. Désireux de connaître le niveau des émissions de CO<sub>2</sub> issu de la consommation et son évolution, le cabinet de conseil Carbone 4<sup>5</sup> propose de soustraire, aux émissions officielles, celles qui sont générées dans la production de produits exportés et d'y ajouter celles issues de la production de produits importés. Cette méthode, orientée consommation, permet de conclure en une augmentation des émissions nationales de 25 % entre 1990 et 2010. En tenant compte de la croissance de la population française (+11 % sur la période), les émissions de

4. Centre Interprofessionnel Technique d'Étude de la Pollution Atmosphérique (cf. chapitre 1) : <http://citepa.org/>

5. Il s'agit d'un cabinet de conseil en matière de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> : <http://www.carbone4.com/fr/>

CO<sub>2</sub> de la consommation individuelle en France ont ainsi progressé de 14 % depuis 1990 si l'on retient les chiffres avancés par Carbone 4.

Nous nous intéressons désormais à la croissance des émissions de déchets municipaux. La figure 2.2 illustre d'une part l'évolution des émissions de déchets municipaux par tête dans la zone euro et dans l'Union Européenne à 27 de 1995 à 2009, et d'autre part pour les États-Unis depuis 1960, l'évolution des émissions totales journalières par tête. Les émissions américaines révèlent clairement une trajectoire logistique avec une accélération des rejets de déchets sur la période 1960 – 1990 et une stabilisation depuis 2000. Une telle trajectoire est plus difficile à valider dans le cas de l'Europe compte tenu de l'intervalle de temps plus court couvert par les données. On notera cependant qu'une telle trajectoire est observée en France depuis 1960 par l'ADEME<sup>6</sup>. Par ailleurs, on observe une stabilisation des niveaux d'émissions européennes depuis 2000, ce qui plaide en faveur de l'hypothèse d'une forme logistique de l'évolution des rejets de déchets municipaux.

---

6. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie :

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12549>

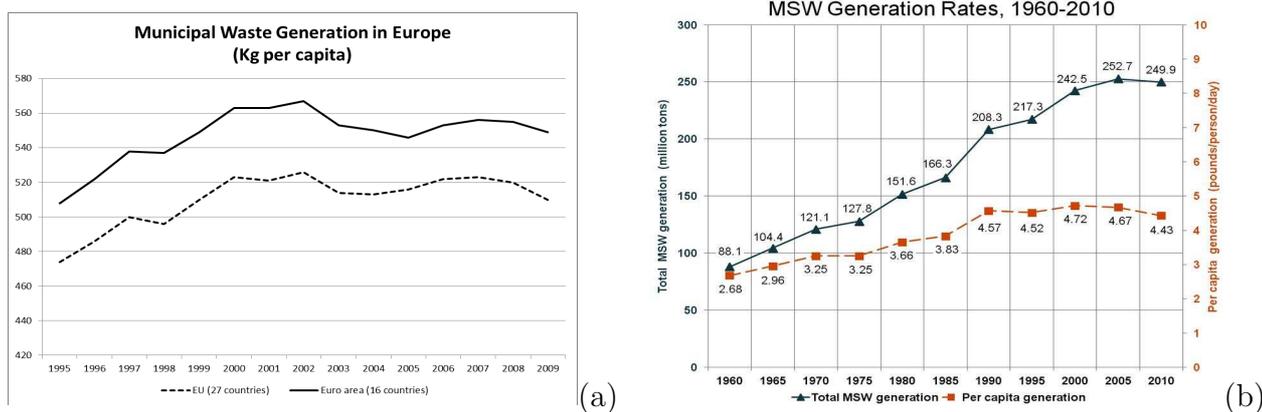


FIGURE 2.2 – Flux de déchets municipaux (a) annuels en Union Européenne, (b) journaliers aux États-Unis.

Source des données européennes :

[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/sectors/municipal\\_waste](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/sectors/municipal_waste)

Source des données américaines : <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/>

La période 1960 – 1990 aux États-Unis est marquée par une forte tertiarisation des emplois et de la production<sup>7</sup>, mais elle correspond aussi à une forte croissance des émissions de déchets (figure 2.2 (b)). Notons que Fourastié (1963 [50]) et Baumol (1967 [7]) anticipaient plutôt une consommation de biens de plus en plus stable avec la tertiarisation des activités. Baumol (2010 [10])<sup>8</sup> essaie quant à lui d'expliquer la croissance des rejets de déchets des consommateurs par la maladie des coûts : si le salaire d'une économie donnée croît au rythme de la productivité moyenne, alors les coûts et les prix des secteurs industriels, plus productifs que la moyenne, vont baisser continuellement tandis que ceux des secteurs de services, traditionnellement moins productifs que la moyenne, vont augmenter de plus en plus. Appliquant ce raisonnement aux secteurs producteurs de biens durables et aux services de réparation, Baumol conclut qu'il devient peu à peu moins coûteux de jeter un bien et d'en racheter un nouveau plutôt que de tenter de le faire réparer, ce qui produit une augmentation

7. Selon la Banque Mondiale, la part des services dans le PIB américain est passée de 62% en 1971 à 71,5% en 1991.

Source : <http://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TETC.ZS>

8. cf. chapitre 1

des rejets de déchets. Cette explication se limite néanmoins aux biens durables et ne permet pas d'envisager la stagnation des rejets depuis 2000. En effet, il n'y a aucune raison pour que la maladie des coûts cesse brusquement d'influencer le jugement des consommateurs à partir de cette date.

Ces observations renforcent nos réserves sur la capacité des théories de la croissance tertiaire à rendre compte de l'évolution de la consommation matérielle. La figure 2.3 met en relation les niveaux d'émissions de déchets municipaux et la part des services dans le PIB nominal pour un panel de pays européens entre 2001 et 2006<sup>9</sup>. Notre analyse des courbes de Kuznets environnementales (cf. chapitre 1) suggère de prendre des précautions dans l'interprétation des données de panel. Il convient en effet de considérer la trajectoire de chaque pays comme particulière. Ainsi, nous n'utilisons pas ces données pour mettre en évidence une trajectoire type (les trajectoires nationales sont, selon-nous, bien reflétées par la figure 2.2). Il s'agit plutôt ici de montrer que la corrélation est positive entre les rejets de déchets municipaux et la part des services dans la production, et aussi que les situations nationales sont très différentes, puisque la dispersion du nuage de points autour de la droite de régression<sup>10</sup> est particulièrement prononcée. Cette hétérogénéité des profils nationaux en matière de rejets de déchets -et donc aussi en termes de consommation matérielle- à niveau de tertiarisation donné ne peut être expliquée ni par les théories de la croissance tertiaire, ni par la seule maladie des coûts.

---

9. Les pays dont les données sont reportées sur la figure sont : l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, le Luxembourg, les Pays-Bas, la Norvège, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse.

10. La droite de régression présente sur la figure est statistiquement satisfaisante :  $F = 17,83$  et  $T = 4,22$ . On peut aussi noter qu'elle capte 17 % de la variance du nuage de points ( $R^2 = 0,17$ ).

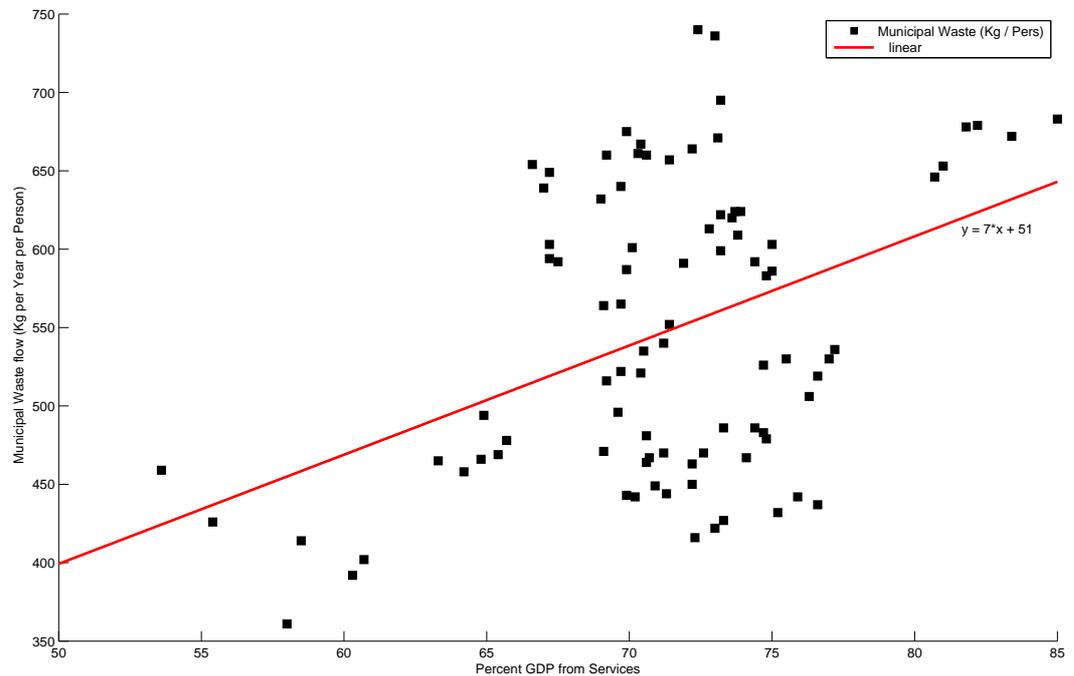


FIGURE 2.3 – relation entre tertiarisation de la production (PIB en valeur) et flux annuels de déchets municipaux pour un panel de pays de l’Union Européenne entre 2001 et 2006.

Source des données de déchets municipaux :

[http : //epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/sectors/municipal\\_waste](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/sectors/municipal_waste)

Source des données de part des services dans le PIB :

[data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TETC.ZS?page = 1](http://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TETC.ZS?page=1)

Au total, cette section confirme que le principal facteur de la pollution dans les économies tertiaires est la forte croissance de la consommation matérielle. Pour le moment, les théories traditionnelles de la croissance tertiaire ne permettent pas d’apporter une explication satisfaisante à cette dynamique. Au niveau des émissions de déchets matériels par les ménages -corollaire écologique de leur consommation- nous avons constaté une trajectoire logistique des émissions de déchets municipaux aux États-Unis, en France et, semble-t-il aussi, au sein de l’Union Européenne. De plus, la corrélation entre la part des services dans le PIB et le niveau des émissions

de déchets municipaux est significative et positive, mais aussi relativement faible de sorte que les émissions nationales pour un niveau de tertiarisation donné sont très hétérogènes. Une théorie satisfaisante de l'évolution de la consommation au cours du processus de tertiarisation devrait être en mesure d'expliquer ces différents phénomènes. Nous consacrons la section suivante à la discussion d'une telle théorie.

## 2.3 Tertiarisation, comportements adaptatifs et émergence du consumérisme

Les sociétés tertiaires actuelles sont souvent décrites comme des sociétés consuméristes (Speth, 2008 [133]), voire des sociétés de gaspillage (Baumol, 2010 [10]). Speth (2008 [133]), définit le consumérisme comme *"un puissant engagement, socialement inscrit, à acheter toujours plus de biens et de services sur le marché"* (p.147)<sup>11</sup>. Selon lui, une *"société de consommation est une société dans laquelle le consumérisme et le matérialisme sont les aspects centraux de la culture dominante, dans laquelle les biens et les services sont acquis non seulement pour satisfaire les besoins communs, mais aussi pour sécuriser l'identité"* (p. 147)<sup>12</sup>.

Une telle société n'a pas toujours existé. Selon Rostow (1960 [124]), elle est née aux États-unis durant les années 1920. Meikle (2001 [97]) confirme cette hypothèse en indiquant que *"dans les années vingt, bien que les valeurs traditionnelles d'épargne et de dur labeur n'aient pas immédiatement disparu, de plus en plus de gens étaient engagés en priorité dans l'achat d'un [mode de] vie"* (p. 7)<sup>13</sup>. L'auteur décrit l'émergence de cette société à travers l'apparition et le développement de nouvelles activités de service, principalement des services aux entreprises. Parmi les nouvelles activités les plus décisives, on notera l'apparition des *"stylistes"* et des cabinets de design industriel. Les premiers sont employés dans les grands magasins,

---

11. Traduction personnelle.

12. Traduction personnelle.

13. Traduction personnelle.

leur activité principale consiste alors à sonder les goûts des clients les plus fortunés pour anticiper les nouvelles tendances. Les goûts des consommateurs dictent donc en partie l'orientation de l'appareil productif. Mais ce dernier garde l'initiative en ayant largement recours aux cabinets de design industriel. L'activité de ces cabinets consiste à changer le design des produits existants pour pousser les consommateurs à l'achat compulsif. Ce changement doit nécessairement être incrémentiel. Ainsi pour Whiteley (1987 [149]), *"le rythme évolutionniste du changement était crucial : s'il était trop lent, les différences entre le modèle de l'année précédente et le nouveau n'auraient pas été perceptibles (et donc il y aurait eu moins d'incitation à acheter) ; s'il était trop rapide, le fabricant aurait couru le risque de s'aliéner des consommateurs potentiels en offrant quelque chose de trop nouveau pour leur goût et en usant en un an ou deux les changements évolutionnaires qui auraient pu être répartis sur une décennie"* (p. 7)<sup>14</sup>. Le nouveau comportement des consommateurs est aussi obtenu par un changement qualitatif dans la façon de faire de la publicité : *"Avant 1920 la plupart des publicités annonçaient simplement la disponibilité d'un produit donné avec certaines caractéristiques. Après 1920, l'approche de l'industrie a basculé dans la persuasion par la stimulation de désirs irrationnels"* (Meikle, 2001 [97] p. 9)<sup>15</sup>.

Tous ces éléments indiquent la présence d'un vaste mouvement de co-adaptation entre les firmes et les consommateurs durant les années 1920 aux États-Unis. Ce mouvement nécessite l'apparition de services nouveaux dans l'entreprise industrielle et au dehors. Fourastié (1963 [50]) constate par ailleurs que les années 1920 marquent aussi le début de la phase de déclin de l'emploi industriel aux États-Unis. Les difficultés ou le déclin de l'industrie peuvent aussi être envisagés, dans une certaine mesure, comme le moteur du développement des stratégies qui ont amené la société de consommation. Cette hypothèse est appuyée par les récentes théories évolutionnistes du changement structurel, qui mettent notamment l'accent sur une micro-fondation du phénomène à l'aide d'agents adaptatifs.

---

14. Traduction personnelle.

15. Traduction personnelle.

Pasinetti (1981 [111]) développe un modèle de croissance et de changement structurel qui génère des dynamiques de croissance et de déclin sectoriels. Il montre que si la dynamique de la demande qui s'adresse à un secteur est différente du rythme de croissance de la productivité dans le secteur, alors la part de ce dernier dans le PIB et dans l'emploi va évoluer au cours du temps. En particulier, une croissance comparée plus rapide de la demande fait croître le produit du secteur tandis qu'une croissance comparée plus lente fait entrer le secteur dans une phase de déclin. En mobilisant la loi d'Engel, Pasinetti indique que la demande qui s'adresse à un secteur est d'abord croissante puis asymptotiquement stagnante ou décroissante, déterminant ainsi les grandes étapes du cycle de vie du secteur. Ce modèle a l'avantage de mettre en évidence la normalité du phénomène de déclin sectoriel lorsqu'on se situe sur la longue période. En revanche, Pasinetti n'indique pas comment se comportent les firmes d'un secteur qui entre dans cette phase de déclin. Cette question a été abordée récemment lors d'un débat entre d'une part Saviotti et Pyka (2004 [127]), qui proposent un modèle de croissance par la création continue de nouveaux secteurs, et d'autre part Witt (2001 [151] ; 2010 [152]) qui propose une théorie évolutionniste du consommateur.

Pour Saviotti et Pyka (2004 [127]), l'enseignement principal à retirer du modèle de Pasinetti est que la création de nouveaux secteurs est nécessaire à la croissance du PIB à long terme. Sans cette création, la demande et le produit macroéconomiques seraient asymptotiquement stagnants. Dans le modèle qu'ils proposent, la croissance du PIB et ses fluctuations sont le produit des cycles de vie de secteurs successifs, définis comme des ensembles d'entreprises qui produisent des biens (ou services) aux caractéristiques techniques et de services (Saviotti et Metcalfe, 1984 [126]) relativement homogènes. Saviotti et Pyka font l'hypothèse d'une "*coordination inter-temporelle parfaite*" (p. 16) : un nouveau secteur émerge systématiquement et seulement lorsque le secteur précédent entre dans sa phase de déclin. Cette phase de déclin, caractérisée par la baisse de la production et du nombre d'entreprises, est le résultat de l'hypothèse de l'existence d'une demande maximale pour chaque secteur. Cette demande n'est pas figée, elle augmente au cours du temps sous l'effet

des dépenses de R&D des firmes du secteur, mais elle est bornée à long terme.

Witt (2001 [151]; 2010 [152]) critique ce modèle à deux niveaux. D'abord, il considère que l'acte d'achat des consommateurs est davantage motivé par les caractéristiques subjectives du produit que par ses caractéristiques techniques et de services concrètes. Ces caractéristiques subjectives sont des conventions qui émergent des interactions entre consommateurs. Ensuite, il rejette l'hypothèse de coordination inter-temporelle. Cette hypothèse suppose en effet la passivité des firmes du secteur en déclin : elles ne chercheraient pas à concurrencer le secteur émergent ni à conserver leurs parts de marché. La résistance de ces firmes menacées de disparition suppose une évolution de leur comportement. Selon Witt, elles vont en effet changer de stratégie en cherchant à profiter de la subjectivité des consommateurs pour attirer leur attention sur la dimension symbolique de leur produit. D'un point de vue écologique, on peut dire que cette construction symbolique provoque une multiplication des achats, et donc aussi des rejets de déchets, de la part d'une demande pourtant arrivée à satiété.

Cette théorie du consommateur est dynamique et elle s'affranchit de la loi d'Engel. Par ailleurs, la mise en évidence d'un comportement évolutif des agents (entreprises et consommateurs) permet de penser un changement structurel moins déterministe et plus conflictuel. Dans un tel cadre, la tertiarisation peut être pensée comme un processus générateur de déchets matériels parce qu'il s'agit d'un changement structurel majeur qui a du rencontrer une forte résistance de la part des secteurs industriels entrés en phase de déclin. La littérature déjà évoquée sur l'émergence de la société de consommation vient confirmer cette intuition. Ainsi, Packard [108] considère en 1960 que le "*throw-away spirit*" des consommateurs et la "*planned obsolescence*" organisée par les entreprises sont les deux moyens d'atteindre le "*progrès*" (c'est-à-dire la croissance) dans une économie américaine où la demande de biens arrive à satiété. De la même façon, Meikle (2001 [97]) montre que le design industriel a été un moyen efficace utilisé par les entreprises américaines pour limiter l'impact de la crise de 1929 sur leurs ventes. Décivant l'émergence de la classe moyenne amé-

ricaine des années 1960, Whiteley (1987 [149]) confirme également l'hypothèse de subjectivité des consommateurs avancée par Witt. Selon-lui *"avec des revenus assez égaux au sein d'une même banlieue, le statut social et le prestige étaient communiqués par les possessions.[...] Le rôle du design dans une telle société devient autant social qu'utilitaire : le design est utilisé comme un langage social pour communiquer son statut dans la société"*<sup>16</sup> (p. 6).

Cette hypothèse de changement structurel générateur d'adaptation des agents semble également en mesure d'expliquer les faits stylisés de dispersion et de stagnation des émissions de déchets identifiés sur les figures 2.2 et 2.3. En effet, l'hétérogénéité des situations nationales à niveau de tertiarisation donné peut provenir de la plus ou moins grande réussite des firmes industrielles des différents pays dans la promotion des attributs symboliques de leurs produits auprès des populations de consommateurs. Quant au tassement des rejets de déchets, il peut être le résultat d'un processus de tertiarisation arrivé à maturité, c'est-à-dire dans lequel les possibilités d'intensification du rythme des achats ont été épuisées par les firmes des secteurs industriels déclinants.

## 2.4 Construction du modèle<sup>17</sup>

Dans cette section, nous construisons un modèle multi-agents fondé sur les comportements adaptatifs identifiés dans la section précédente pour un secteur industriel arrivant en fin de vie, à savoir le développement régulier d'innovations de produit incrémentales, et une tendance des consommateurs à acheter, non plus par nécessité, mais par désir. Pour pouvoir rester connecté aux théories de la croissance tertiaire existantes, nous retenons comme base de notre modèle la croissance déséquilibrée proposée par Baumol (1967 [7]). Ce modèle est aussi, à notre connaissance, le mo-

---

16. Traduction personnelle.

17. Tous les modèles construits dans cette thèse ont été programmés à l'aide du logiciel Laboratory for Simulation Development, disponible gratuitement à l'adresse suivante :

<http://www.labsimdev.org/Joomla1-3/>

dèle le plus simple permettant de générer un changement structurel endogène. Notre objectif est d'y inclure des fondations microéconomiques compatibles avec l'idée de comportements évolutifs suggérée par Witt ([151]; [152]). Dans cette perspective, nous agentifions le modèle d'origine (Guerrero et Axtell, 2011 [71]) et nous lui apportons divers amendements afin de représenter un secteur industriel qui connaît un cycle de vie et des consommateurs intégrés dans un réseau d'interactions interindividuelles.

Le modèle de Baumol comprend, rappelons-le, deux secteurs et il repose sur trois hypothèses : (1) le secteur industriel est progressif (sa productivité augmente au cours du temps) tandis que le secteur tertiaire est stagnant (sa productivité est constante); (2) le salaire est identique pour tous les secteurs et il est indexé sur la productivité du secteur progressif; (3) l'élasticité-revenu de la demande qui s'adresse au secteur stagnant est supérieure à l'unité. Trois conclusions en découlent. D'abord, les services sont victimes d'une "*maladie des coûts*", c'est-à-dire que leur prix croît au rythme d'augmentation du salaire, ce qui empêche toute croissance quantitative du secteur tertiaire. Ensuite, en raison d'une croissance des capacités productives supérieure à la croissance de la demande dans le secteur progressif, on assiste à une tertiarisation continue des emplois. Enfin, puisqu'une part toujours plus grande de travailleurs est employée dans le secteur stagnant, la croissance du PIB est asymptotiquement nulle.

La version agentifiée du modèle devra inclure ces hypothèses et être capable d'aboutir aux mêmes conclusions générales. Elle comprend trois populations d'agents en interactions, à savoir 10 entreprises industrielles, 10 entreprises de services et une population de 500 consommateurs. Leurs comportements et leurs interactions sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

### 2.4.1 Règles de comportement des agents industriels

Par hypothèse, le comportement des entreprises industrielles est différent selon que le secteur est dans sa phase de croissance ou de déclin. On distingue donc ces deux phases dans la présentation du modèle. Le tableau 2.2 donne la valeur des paramètres du modèle.

#### Avant la saturation du secteur

Au début de chaque période, les  $i = 1, \dots, 10$  entreprises industrielles du modèle sont mélangées par l'ordinateur. Ensuite, elles formulent chacune leurs anticipations de demande  $D_{it}^e$  pour la période. En notant  $D_{it-1}$ , la demande adressée à la firme  $i$  en  $t - 1$  et  $\beta$ , un coefficient qui indique la rapidité d'adaptation aux erreurs d'anticipation, la demande anticipée est donnée par l'équation (2.2).

$$D_{it}^e = D_{it-1}^e + \beta[D_{it-1} - D_{it-1}^e] \quad (2.2)$$

Chaque firme  $i$  détermine ensuite les quantités à produire,  $(D_{it}^e - S_{it})$ , avec  $S_{it}$  le niveau des stocks hérités des invendus des périodes précédentes. Le nombre d'heures de travail  $L_{it}^d$  à demander sur le marché du travail est donné par l'équation (2.3).

$$L_{it}^d = \frac{D_{it}^e - S_{it}}{a_{it}} \quad (2.3)$$

$a_{it}$  représente le niveau de productivité du travail de la firme  $i$  en  $t$ . Si le nombre d'heures de travail disponible sur le marché est insuffisant, le niveau de production de  $i$  sera inférieur à celui désiré<sup>18</sup>. Comme chez Baumol (1967 [7]), le salaire  $w_t$

---

18. On notera que le modèle permet d'employer un nombre de travailleurs inférieur à l'unité. En effet, chaque consommateur/ travailleur se voit attribuer un temps de travail maximal égal à 1. Si un travailleur est pleinement employé, il perçoit un salaire complet, si en revanche la firme  $i$  n'emploie un travailleurs qu'à 30 %, alors ce dernier perçoit 30 % du salaire et il peut encore offrir une quantité de travail égale à 0,7. Afin d'éviter une situation dans laquelle tous les travailleurs sont employés à temps partiel, les firmes qui demandent du travail commencent systématiquement par employer le travailleur qui n'est pas pleinement employé. On notera que le nombre d'employeurs d'un travailleur à temps partiel n'a pas de limite, tant que ce dernier n'est pas employé à 100 % de ses capacités.

du modèle est identique pour tous les secteurs.  $w_t$  est indexé sur la productivité moyenne de l'économie<sup>19</sup>. En notant  $a_j$ , la productivité de travail constante de la firme de service  $j$ , et si  $N$  est le nombre total de firmes dans l'économie, alors  $w_t$  est donné par l'équation (2.4).

$$w_t = \frac{\sum_i a_{it} + \sum_j a_j}{N} \quad (2.4)$$

Une autre hypothèse essentielle de Baumol (1967 [7]) est que la productivité du secteur industriel croît au cours du temps. Nous introduisons dans notre modèle un mécanisme endogène : si une firme  $i$  réalise des profits  $\pi_{it}$  positifs, alors elle en investit une fraction  $\delta$  en *R&D*. Soit  $\xi$  un paramètre d'échelle, une innovation survient si la condition (2.5) est satisfaite.

$$U(0; 1) < 1 - e^{-\xi \times \delta \times \pi_{it}} \quad (2.5)$$

$U(0, 1)$  représente un tirage aléatoire dans une loi Uniforme définie sur l'intervalle  $[0; 1]$ . Si l'innovation est réussie, la productivité  $a_{it}$  de la firme  $i$  est augmentée du montant du tirage  $U(0, 1)$ . Les produits des firmes  $i$  sont décrits par un vecteur  $(p_{it} \ q_{it} \ m_{it})$ .  $p_{it}$  et  $q_{it}$  sont les caractéristiques objectives du produit, elles représentent respectivement son prix<sup>20</sup> et sa qualité. Chacun des biens produit par  $i$  a une durée de vie, inconnue des consommateurs, obtenue par un tirage aléatoire dans une loi Normale  $N(q_{it}, 1)$  tronquée afin d'éviter une durée de vie inférieure à une période. La caractéristique  $m_{it}$  représente quant à elle la dimension subjective du produit, il s'agit d'un paramètre de style utilisé lorsque le secteur entre dans sa phase de déclin.

Enfin, toute firme industrielle ou de service dont les liquidités deviennent négatives est retirée du modèle et remplacée par une nouvelle, copie de l'une des firmes survivantes avec une forte part de marché.

---

19. Cette hypothèse est formulée dans Baumol (2010 [10]).

20. Toutes les firmes du modèle adoptent la même règle de tarification. Soit  $\mu$  le taux de marge d'une entreprise quelconque et  $a_t$  son niveau de productivité, son prix  $p_t$  est donné par  $p_t = (1 + \mu) \frac{w_t}{a_t}$ . Ainsi, plus une firme est productive par rapport à la moyenne et plus son prix sera faible.

## Lorsque le secteur est saturé

Dans le modèle que nous construisons, le secteur est menacé de déclin lorsqu'au moins 90 % des consommateurs possèdent un bien. On distingue alors les firmes  $i$  classiques des firmes  $i_s$  qui sont stratégiques. Ces dernières vont s'adapter à la menace que représente pour la poursuite de leurs activités une stagnation voire une baisse de la demande adressée au secteur.

Le comportement d'une firme  $i_s$  diffère de celui d'une firme  $i$  dans la mesure où elle investit, en plus de  $\delta$ , une part  $\phi$  de ses profits positifs dans une  $R\&D$  qui a pour but d'accélérer l'obsolescence de son produit<sup>21</sup>. Selon Packard (1960 [108]), une firme peut poursuivre trois types de stratégies d'obsolescence planifiée. Dans une première stratégie, il s'agit de proposer régulièrement un produit légèrement plus performant que le précédent (obsolescence de fonction). Une seconde stratégie possible consiste à réduire artificiellement la qualité du produit afin d'en raccourcir la durée de vie (obsolescence de qualité). Enfin, une firme peut poursuivre une stratégie d'obsolescence de style en changeant régulièrement l'apparence de son produit.

Les firmes  $i_s$  du modèle vont poursuivre les stratégies d'obsolescence par la qualité et d'obsolescence par le style<sup>22</sup>. Ainsi, si une nouvelle condition  $U(0; 1) < 1 - e^{-\xi \times \phi \times \pi_{i_s t}}$  est satisfaite, le paramètre de style  $m_{i_s t}$  du produit de la firme  $i_s$  est augmenté du montant du tirage  $U(0; 1)$ . Cette innovation de produit se traduira par

---

21. Gastaldo et Ragot (2000 [67]) soulignent que toutes les tentatives de modélisation de la relation croissance/ environnement intègrent des conditions permettant d'obtenir une croissance non polluante. Tel n'est pas le cas de notre modèle dans la mesure où le comportement des firmes stratégiques traduit au contraire l'absence de condition de durabilité a priori. Par le terme "durabilité", nous entendons une croissance économique potentiellement indéfinie, car non contrainte par des variables environnementales.

22. On ne tiens pas compte de l'obsolescence de fonction dans la mesure où elle s'inscrit dans une réelle perspective de "progrès", puisque le produit est amélioré. Dans ce sens, un consommateur n'a pas besoin de devenir compulsif pour décider d'acheter un produit plus performant.

une baisse de la qualité  $q_{i_{st}}$  du produit et, par conséquent, par une baisse de sa durée de vie moyenne ou espérée.  $m_{i_{st}}$  et  $q_{i_{st}}$  sont en effet reliés par une fonction logistique (équation 2.6) décroissante en fonction du paramètre  $m_{i_{st}}$ .

$$q_{i_{st}} = q_{min} + \frac{q_{max} - q_{min}}{1 + e^{\tau \times m_{i_{st}}}} \quad (2.6)$$

$\tau$  est un paramètre d'échelle,  $q_{max}$  est une contrainte technologique, il s'agit du niveau maximum de qualité qui peut être atteint par le produit, et  $q_{min}$  est une variable de politique publique : elle représente la qualité réglementaire minimale que les firmes sont tenues de satisfaire.

En résumé, lorsque le secteur industriel fait face à une demande saturée, un certain nombre d'entreprises décident d'investir des sommes supplémentaires en *R&D* dans le but de développer la dimension subjective de leur produit. Ce faisant, elles réduisent sa qualité et, in fine, sa durée de vie.

## 2.4.2 Règles de comportement des agents tertiaires

Les entreprises de services  $j = 1, \dots, 10$  sont également mélangées au début de chaque période. En notant  $D_{jt-1}$ , la demande qui est adressée à la firme  $j$  en  $t - 1$ , la demande anticipée par cette firme à la période courante,  $D_{jt}^e$ , est donnée par l'équation (2.7).

$$D_{jt}^e = D_{jt-1}^e + \beta[D_{jt-1} - D_{jt-1}^e] \quad (2.7)$$

La production de services est par hypothèse immatérielle et non-stockable, ainsi la production désirée est juste égale à la demande anticipée,  $y_{jt}^d = D_{jt}^e$ . Le nombre d'heures de travail demandées est donc donné par l'équation (2.8).

$$L_{jt}^d = \frac{y_{jt}^d}{a_j} \quad (2.8)$$

Conformément à l'hypothèse de Baumol (1967 [7]), le secteur des services est stagnant, autrement dit les firmes  $j$  n'innovent pas.

### 2.4.3 Règles de comportement des consommateurs

Les consommateurs peuvent être sensibles aux stratégies d'obsolescence planifiée des firmes industrielles. Ainsi nous distinguons leur comportement avant et après la mise en place de ces stratégies.

#### Avant satiété

Le modèle comprend une population de 500 consommateurs individuels, notés  $c = 1, \dots, 500$ . Ils sont inclus dans un réseau de relations sociales représenté par un vecteur ligne à 500 cellules. Les cellules extrêmes se rejoignent de sorte que le réseau prend la forme d'un cercle dans lequel chaque consommateur a toujours deux voisins. La position de chaque consommateur  $c$  dans le réseau est changée de façon aléatoire à chaque début de période. Avant la saturation du secteur progressif, la place d'un individu dans ce réseau n'a pas d'importance.

Les consommateurs offrent leur travail pour tout niveau de salaire  $w_t$  et sont prêts à accepter un contrat à temps partiel si nécessaire. En notant  $Bud_{ct}$  le budget du consommateur  $c$  à la période  $t$ ,  $Bud_{ct} = Bud_{ct-1} + w_t$  si  $c$  est employé à temps plein pendant la période.  $Bud_{ct-1}$  est le budget résiduel hérité des périodes précédentes. La répartition du budget entre la dépense de biens et la dépense de services est déterminée par une loi d'Engel de forme logistique<sup>23</sup>. Ainsi  $\sigma_t$ , la part du budget allouée à la consommation de services, est donnée par l'équation (2.9).

$$\sigma_t = \sigma_{min} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{1 + e^{-w_t}} \quad (2.9)$$

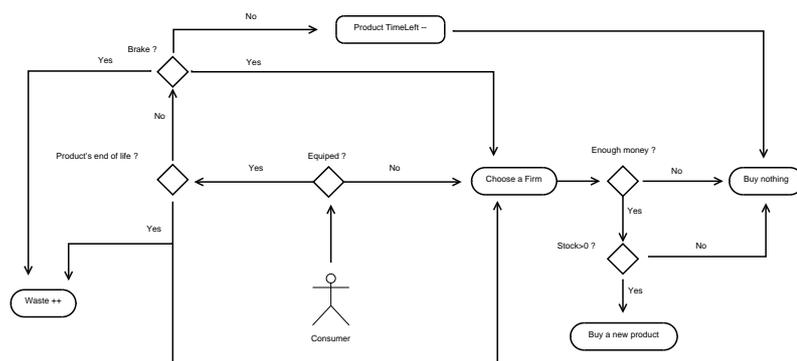
Chaque consommateur  $c$  cherche à épuiser son budget alloué à la consomma-

---

23. La loi d'Engel n'a qu'un pouvoir explicatif limité dans notre système multi-agents. En effet, si un consommateur est déjà équipé et qu'il ne consomme pas son budget actuel consacré à l'achat de biens, alors le budget résiduel qui se forme sera en partie alloué à l'achat de services à la période suivante. A l'inverse, le comportement compulsif, qu'on analyse dans la section suivante, implique une réduction importante du budget résiduel issu de la non-consommation de biens puisque cette consommation va augmenter. De cette façon, nous prenons en compte l'observation de Gershuny (1978, [68]) de la pertinence de la loi d'Engel à une date donnée, mais pas en dynamique.

tion de services,  $\sigma_t \times Bud_{ct}$ . Le fournisseur de services est choisi de façon aléatoire. Pour l'achat de biens en revanche, le consommateur choisit une entreprise  $i$  sur la base de sa compétitivité, mesurée par le rapport qualité-prix  $\frac{q_{it}}{p_{it}}$ . Plus le rapport proposé par une firme  $i$  est important relativement à ses concurrents, plus elle a de chances de voir sa part de marché progresser. Contrairement à l'achat de services, les consommateurs ne peuvent pas épuiser leur budget par l'achat de biens, car nous faisons l'hypothèse qu'un consommateur ne peut pas posséder plus d'un bien à la fois<sup>24</sup>. C'est une façon commode d'être sûr d'obtenir rapidement une phase de déclin pour le secteur industriel. L'algorithme utilisé par le consommateur individuel  $c$  pour l'achat d'un nouveau bien est décrit par la figure 2.4.

FIGURE 2.4 – Algorithme d'achat des consommateurs avant saturation du secteur industriel



Si l'agent  $c$  n'est pas équipé, il choisit une firme  $i$  et ne peut acheter un bien que si son budget et le stock de l'entreprise sont suffisants. Si  $c$  est déjà équipé, trois situations sont possibles. (1) Le bien est arrivé à la fin de son espérance de vie<sup>25</sup>. Dans ce cas, il est transformé en déchet et le consommateur se porte demandeur sur le marché des biens. (2) Le bien se casse avant d'avoir atteint la fin de sa durée de vie<sup>26</sup>. Dans ce cas, il est aussi considéré comme un déchet et le consommateur se

24. Cette hypothèse offre deux avantages. D'abord, elle est compatible avec l'idée de satiété des consommateurs qu'on retrouve chez Passinetti, Saviotti et Pyka et chez Witt. Ensuite, elle permet de s'assurer que le secteur industriel parviendra relativement rapidement à une phase de stagnation, voir de déclin.

25. Cette espérance de vie a été déterminée à l'achat par un tirage dans  $N(q_{it}, 1)$ .

26. La probabilité de casse est donnée par l'indice  $\frac{q_{it}}{10}$ . Si  $U(0; 1) > \frac{q_{it}}{10}$ , alors le produit se casse.

porte de nouveau demandeur sur le marché des biens. (3) Dans le cas où le produit ne se casse pas, son espérance de vie résiduelle se réduit et le consommateur n'achète pas de bien durant la période.

### **Demande parvenue à satiété**

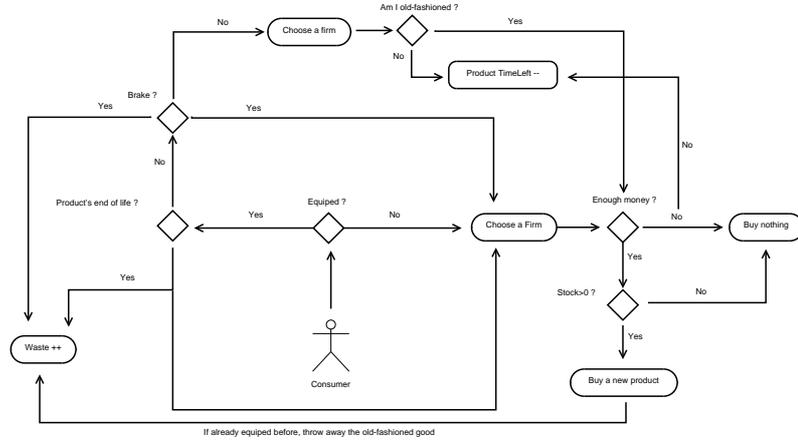
Lorsque 90 % des consommateurs possèdent un bien, certaines firmes industrielles, notées  $i_s$ , décident de mettre en œuvre une stratégie d'obsolescence planifiée afin de faire face à la saturation du secteur. Cette stratégie, notamment l'obsolescence de style, peut avoir un impact sur le comportement d'achat des consommateurs, qui pourraient en réaction accorder davantage d'importance au style du produit qu'à sa qualité.

Dans notre population de consommateurs, un certain nombre d'agents, notés  $c_c$ , sont de type "compulsif". Leur comportement diffère de celui des consommateurs  $c$  décrits précédemment. En effet, suite à la stratégie des firmes industrielles, les consommateurs  $c_c$  vont choisir un fournisseur (souvent un fournisseur  $i_s$ ) sur la base de son indice  $\frac{m_{i_s t}}{p_{i_s t}}$  plutôt que sur la base de son rapport qualité-prix. L'algorithme d'achat d'un agent  $c_c$  est décrit par la figure 2.5. Cet algorithme diffère de celui d'un agent  $c$  par la caractéristique suivante : lorsque le bien possédé ne se casse pas, le consommateur compulsif va tout de même choisir une firme dans le but de comparer le style du produit qu'elle propose avec celui du produit possédé. Si le consommateur  $c_c$  constate que son produit est démodé, c'est-à-dire si  $m_{i_s t} - m_{c_c t} > 1^{27}$ , alors il cherchera à acheter le nouveau bien et à jeter l'ancien, créant ainsi un nouveau canal d'émission de déchets. On remarquera aussi que les biens proposés par les firmes  $i_s$  auront une qualité  $q_{i_s t}$  médiocre et une durée de vie limitée.

---

27. La valeur 1 est choisie de façon arbitraire.

FIGURE 2.5 – Algorithme d'achat des consommateurs compulsifs



La population des consommateurs est donc désormais composée de deux types d'agents : ceux qui sont compulsifs et ceux qui ne le sont pas. Notre réseau de consommateurs se transforme alors en automate cellulaire<sup>28</sup> : selon la position des consommateurs dans les cellules du vecteur ligne<sup>29</sup>, chaque cellule peut prendre deux états (compulsif ou non). Nous introduisons une règle simple d'évolution de l'état des consommateurs, et donc aussi d'évolution de l'état des cellules. Concrètement, si un consommateur  $c$  est entouré de deux voisins  $c_c$ , alors il devient compulsif à son tour. De la même manière, si un consommateur  $c_c$  est entouré de deux voisins  $c$ , alors il cessera d'être compulsif.

Ainsi, les comportements compulsifs ou non-compulsifs apparaissent comme deux conventions potentiellement émergentes (Witt, 2010 [152]) : c'est le nombre de consommateurs compulsifs en  $t = 0$  et leur place dans le réseau lorsque le taux d'équipement des consommateurs atteint 90 % qui déterminera laquelle de ces deux conventions va émerger. Un automate cellulaire est un réseau régulier tandis que les réseaux sociaux réels sont bien souvent irréguliers, c'est-à-dire qu'ils sont, sinon

28. Un automate cellulaire est une grille, finie ou infinie, dont les différentes cellules peuvent prendre plusieurs états (souvent il s'agit d'un nombre ou d'une couleur). On associe ensuite à cette grille une règle d'évolution de l'état des cellules en fonction de leur voisinage (qui est à définir) (Wolfram, 1984 [154]).

29. On rappelle que la place de chaque consommateur est attribuée aléatoirement à chaque début de période.

totalemment, du moins partiellement aléatoires (Newman et al., 2002 [102]). C'est pour cette raison que nous mélangeons les agents au début de chaque période, tout en nous assurant que chaque consommateur a toujours deux voisins. De cette façon, nous limitons aussi l'impact de la structure du réseau sur la convention émergente. Le paramètre déterminant sera donc le nombre d'agents compulsifs en  $t = 0$ .

## 2.5 Dynamiques émergentes : confrontation avec les faits stylisés des émissions de déchets

Dans le but de tester notre hypothèse d'adaptation des agents pendant la phase de tertiarisation des activités, nous avons choisi d'agentifier le modèle de croissance déséquilibrée de Baumol (1967 [7]). Nous commençons donc par vérifier si les dynamiques émergentes de notre système multi-agents sont cohérentes avec les conclusions du modèle original. Ensuite, nous évaluons la capacité du modèle à reproduire les faits stylisés relatifs aux émissions de déchets municipaux que nous avons évoqués en introduction. Les résultats présentés dans la suite du chapitre sont une moyenne de 30 simulations réalisées chacune avec un noyau différent pour les tirages aléatoires. Chaque simulation dure 20000 périodes.

### 2.5.1 Les conclusions de Baumol

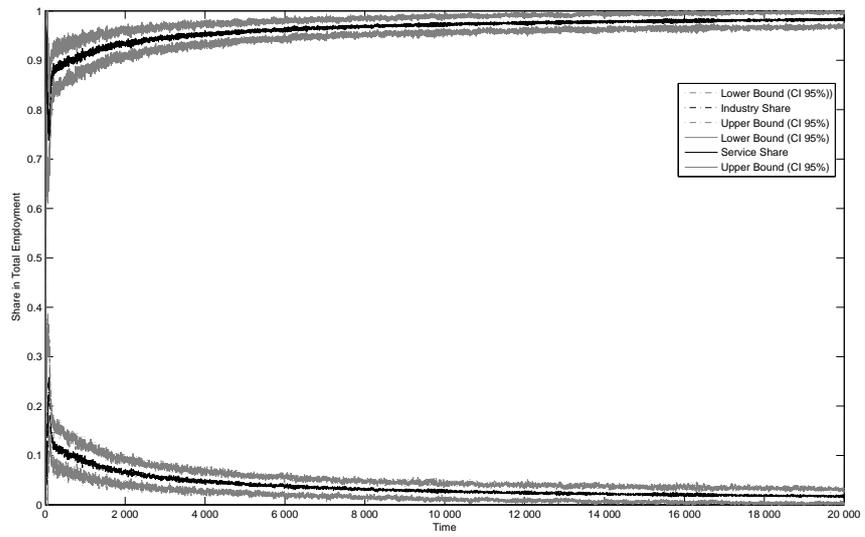
Les trois résultats majeurs de Baumol (1967 [7]) sont : la tertiarisation des emplois, une croissance de la production tertiaire qui s'explique uniquement par la croissance accélérée du prix des services (la maladie des coûts) et une stagnation du PIB à long terme. Les résultats présentés dans cette sous-section proviennent de simulations réalisées sans évolution du comportement des firmes face au déclin du secteur industriel.

L'évolution des parts respectives des services et de l'industrie dans l'emploi produite par notre modèle est illustrée par la partie (a) de la figure 2.6. On observe

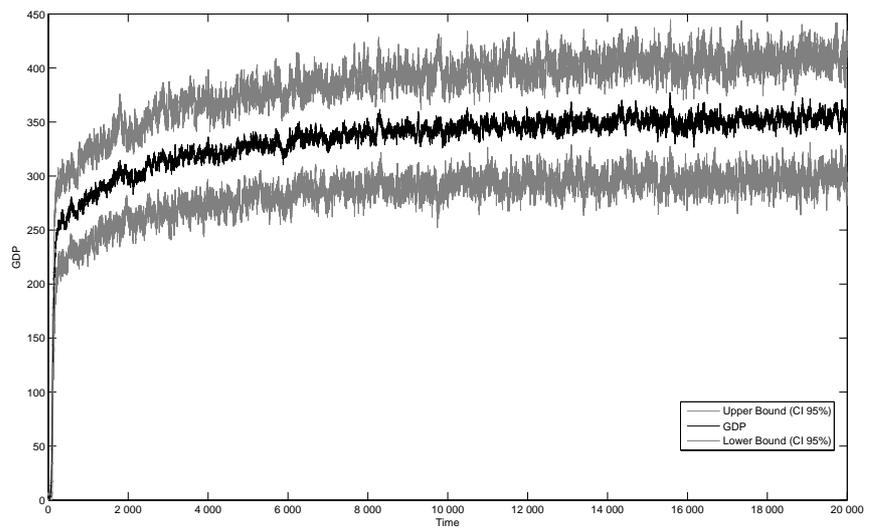
que l'économie considérée est déjà largement tertiarisée en  $t = 0$ . Cette situation est uniquement due à notre hypothèse restrictive sur la consommation industrielle<sup>30</sup>. On remarque cependant une réelle croissance relative de l'emploi tertiaire, ce qui est cohérent avec le comportement asymptotique du modèle de Baumol. Les dynamiques de la production tertiaire en valeur et en volume sont reproduites dans la figure 2.7. On y observe une production en volume globalement stable et une production nominale croissante ; cette croissance est uniquement liée à la croissance du niveau des prix dans les services. En effet, notre hypothèse de services stagnants implique que le prix de ces activités croît au rythme des gains de productivité dans l'industrie, inhibant ainsi toute source de croissance quantitative de la demande dans le secteur tertiaire. Enfin, le PIB de notre économie artificielle (figure 2.6 partie (b)) se révèle être asymptotiquement stagnant.

---

30. En effet, les consommateurs du modèle ne peuvent posséder qu'un bien à la fois.



(a)



(b)

FIGURE 2.6 – (a) Part des secteurs dans l’emploi total, (b) évolution du PIB à long terme.

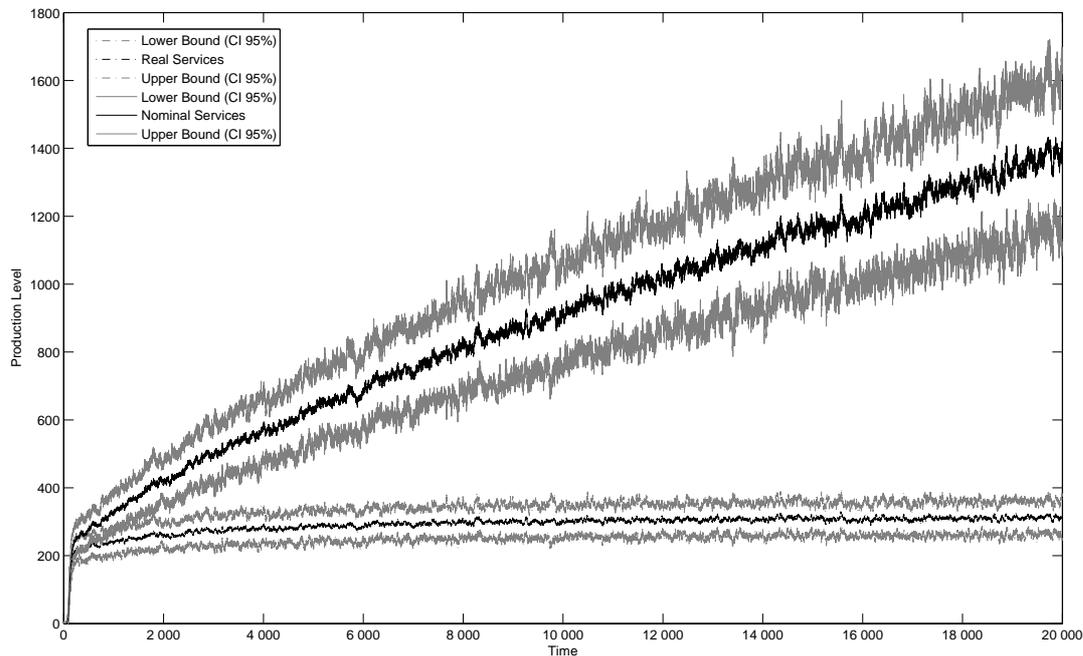


FIGURE 2.7 – Maladie des coûts dans le secteur tertiaire

### 2.5.2 Reproduction des faits stylisés

Notre système multi-agents permet donc de retrouver les conclusions du modèle de Baumol original. Dans cette section, nous permettons aux agents entreprises industrielles et aux agents consommateurs de changer de comportement en cours de simulation. Nous avons modélisé 9 scénarios différents selon le nombre initial de consommateurs compulsifs  $c_c$  et de firmes stratégiques  $i_s$ . Les scénarios sont résumés dans le tableau 2.1. Nous avons choisi les nombres initiaux de consommateurs compulsifs en fonction des propriétés de l'automate cellulaire qui représente les consommateurs. En effet, cet automate mélange aléatoirement les consommateurs à chaque période, ce qui implique que chaque consommateur peut changer d'état (compulsif ou non) à chaque période tant que la population n'est pas homogène. Ainsi, l'automate admet deux équilibres : lorsque tous les consommateurs sont devenus compulsifs ou bien lorsqu'ils sont tous non-compulsifs. L'équilibre sera nécessairement atteint en raison du mélange aléatoire. Par définition, ce mélange est équiprobable, si bien que choisir 50 % de consommateurs compulsifs en  $t = 0$  ne permet pas de prédire quel

sera l'équilibre final, par contre, choisir un peu plus de 50 % des consommateurs initialement d'un certain type devrait conduire à l'émergence de ce type de consommateurs à l'équilibre de l'automate. Pour cette raison, seules 3 situations méritent notre attention : le cas indéterminé où 50 % des consommateurs sont compulsifs, et ensuite les cas où nous donnons un avantage initial à l'une ou l'autre convention de consommation.

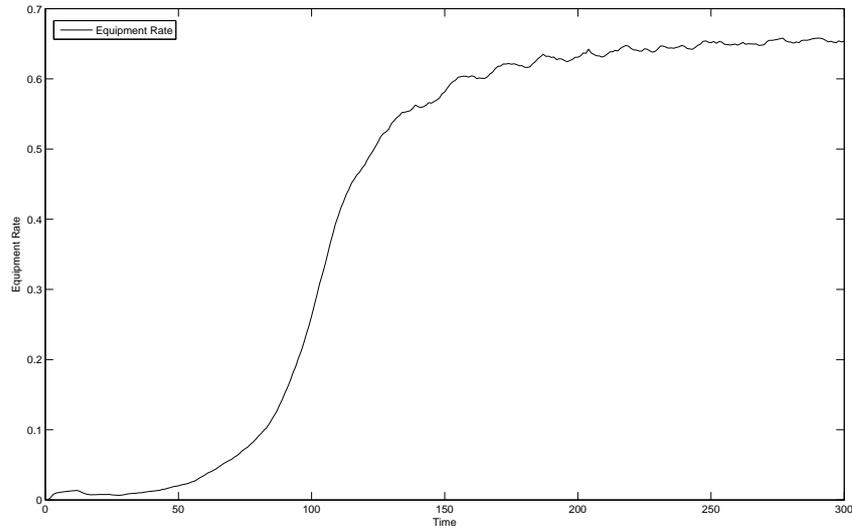
On rappelle que les comportements n'évoluent que lorsque le taux d'équipement des consommateurs est supérieur ou égal à 90%. Par ailleurs, le modèle construit n'est pas déterministe : il se peut très bien que ce taux d'équipement seuil ne soit jamais atteint, et rien n'empêche le système de générer des taux d'équipements inférieurs à 90 % après que cette valeur ait été initialement atteinte. Dans ce cas précis, les agents  $i_s$  et  $c_c$  retrouvent leurs comportements non-stratégiques et non-compulsifs jusqu'à ce que le taux d'équipement s'élève de nouveau au-dessus de 90 %. On peut justifier cette hypothèse en avançant que les firmes  $i_s$  perçoivent dans ce cas la stratégie d'obsolescence planifiée comme risquée, tandis que les consommateurs  $c_c$  ont peur de ne plus être équipés en période de crise, préférant ainsi évaluer les biens sur leur rapport qualité-prix.

TABLE 2.1 – récapitulatif des scénarios simulés

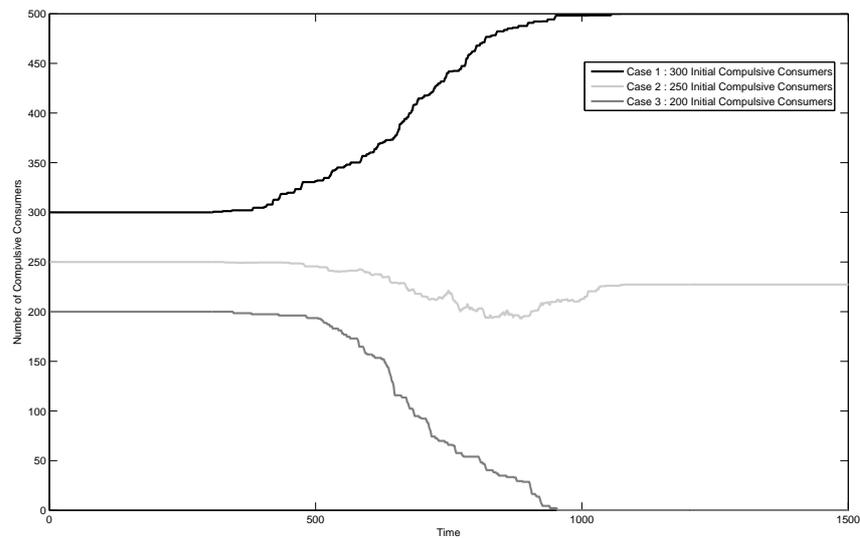
$t = 0$	$c_c = 300$	$c_c = 250$	$c_c = 200$
$i_s = 10$			
$i_s = 5$			
$i_s = 2$			

La figure 2.8 illustre les dynamiques de diffusion produites par le modèle. Le taux d'équipement décrit une trajectoire logistique typique des processus de diffusion (Rogers, 1995[123]). On remarque qu'il converge vers une valeur d'environ 65 % en seulement 300 périodes, ce qui suggère que le secteur industriel entrera relativement rapidement dans sa phase de déclin. L'émergence d'une norme de consommation parmi les consommateurs débute vers la période 500, ce qui confirme un cycle

de vie rapide du secteur industriel. On observe que si le nombre de consommateurs compulsifs,  $c_c$ , est égal à 300 en début de simulation, alors c'est nécessairement le comportement compulsif qui émerge au sein de la population. En effet, notre courbe moyenne atteint la valeur 500 après  $t = 1000$ , ce qui suggère que toutes les simulations ont produit l'émergence d'une population homogène d'agents compulsifs après cette période. On fait la même observation dans l'autre sens lorsque  $c_c = 200$  en  $t = 0$ . Dans ce cas, la population homogène qui émerge à long terme est une population de consommateurs non-compulsifs. Le cas où 50 % des consommateurs sont compulsifs en  $t = 0$  est plus intéressant dans la mesure où son résultat est imprévisible à long terme : certaines simulations font émerger une population compulsive alors que d'autres font émerger une population plus ascétique ; si bien que la situation la plus probable à long terme, dans ce cas, est l'émergence d'une population composée des deux types de consommateurs en proportion stable. Le modèle est donc capable de produire des normes de consommation très différentes à long terme selon la configuration initiale du réseau de consommateurs. Cette diversité devrait nous aider à générer les faits stylisés des émissions de déchets.



(a)



(b)

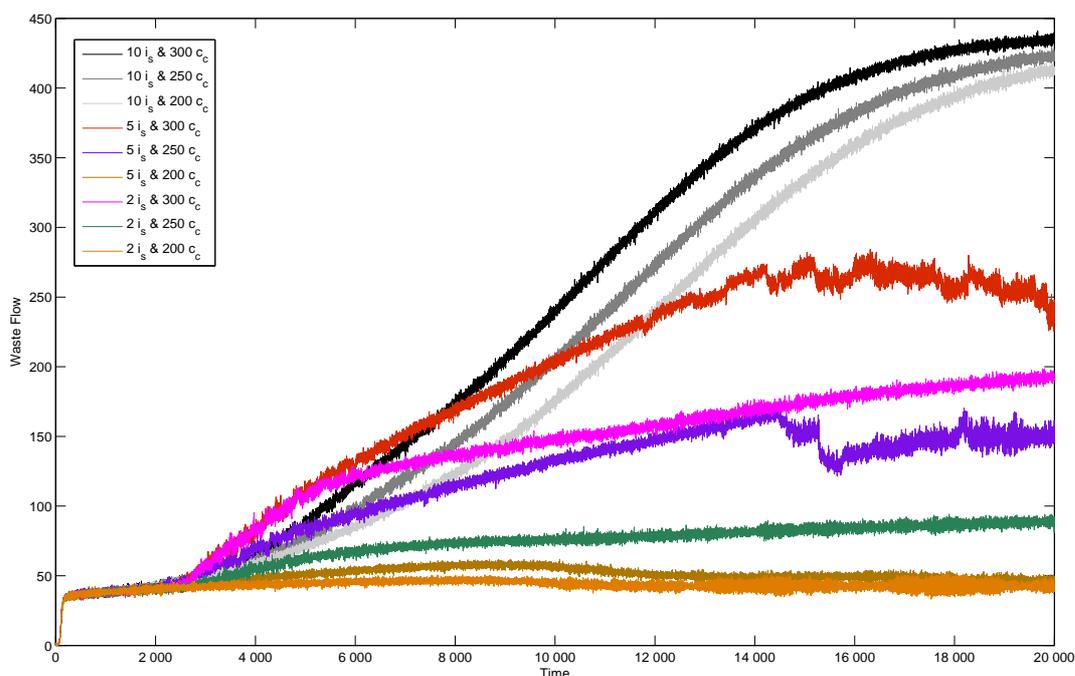
FIGURE 2.8 – Dynamiques de diffusion : (a) évolution du taux d'équipement, (b) norme de consommation émergente.

La figure 2.2 (voir section 2.1) illustre une trajectoire logistique des flux de déchets municipaux aux États-Unis<sup>31</sup>. La dynamique de ces flux telle qu'elle est produite par notre modèle pour les 9 scénarios envisagés est quant à elle illustrée par la figure 2.9. On observe que seuls les scénarios dans lesquels  $i_s = 10$  parviennent à produire une telle trajectoire, et cela quelque soit la structure de notre population

31. On rappelle qu'une trajectoire similaire est aussi observée pour la France.

de consommateurs. Cette dynamique suggère donc que c'est la baisse de la qualité et de la durée de vie des produits plus que le comportement compulsif des consommateurs qui explique la croissance des émissions. Le tassement de la trajectoire, qui lui donne une forme logistique, est donc lié à la limitation réglementaire que nous avons imposée au modèle, limitation selon laquelle un bien ne peut avoir une qualité inférieure à 1 ainsi qu'une durée de vie inférieure à une période. Ainsi, le tassement des émissions s'explique par le fait que le rythme des achats atteint asymptotiquement son maximum.

FIGURE 2.9 – Dynamique des flux de déchets



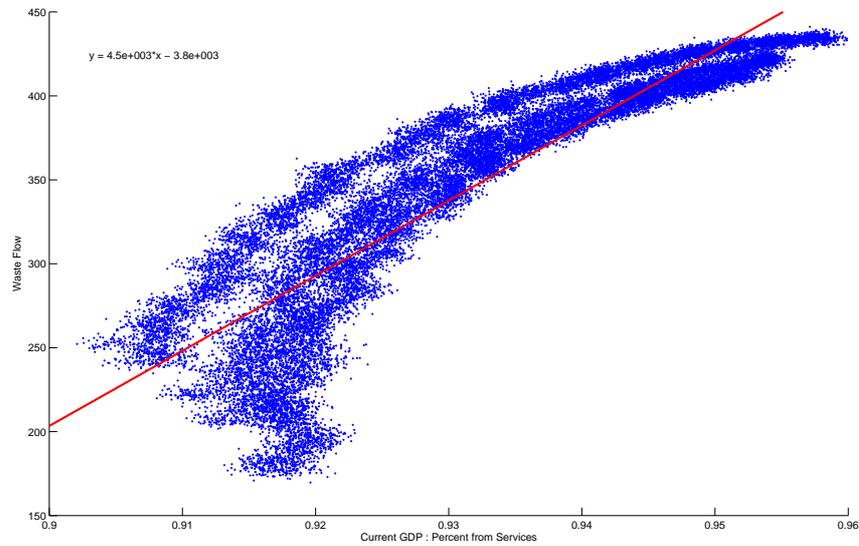
Quant à la relation entre le niveau des émissions et la part des services dans la production, le comportement du modèle n'est pas évident. En effet, en raison de la maladie des coûts, il convient de distinguer la relation à prix courants et celle en volume. Les données de part des services dans le PIB présentées dans la figure 2.3 (cf. section 2.1) sont celles fournies par la Banque Mondiale, qui les évalue à prix courants<sup>32</sup>. L'observation de la trajectoire suivie par les flux de déchets dans nos

<sup>32</sup>. La méthode de calcul est présentée à cette adresse :

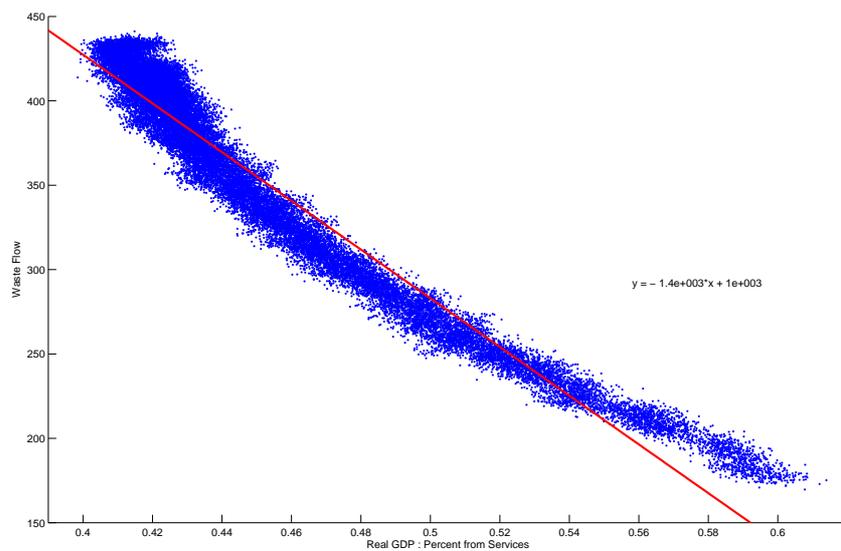
différents scénarios a révélé que seules les 3 simulations dans lesquelles  $i_s = 10$  sont pertinentes. La figure 2.10 (a) reproduit donc la relation entre la part des services dans le PIB courant et les émissions de déchets pour ces 3 scénarios spécifiques. On y retrouve les deux faits stylisés illustrés par la figure 2.3, à savoir une relation croissante accompagnée d'une forte dispersion des niveaux d'émissions pour un niveau donné de tertiarisation. La relation obtenue paraît également convexe et la dispersion des observations semble décroître à mesure que la tertiarisation progresse. Ces observations suggèrent une tendance à la convergence des économies tertiaires vers un niveau d'émission asymptotiquement plutôt homogène. Cette tendance est la conséquence des trajectoires temporelles logistiques des flux de déchets observées dans les scénarios retenus.

---

*<http://data.worldbank.org/about/faq/specific-data-series>*



(a)



(b)

FIGURE 2.10 – Relation entre la part des services dans le PIB et les émissions de déchets : (a) pour le PIB nominal, (b) pour le PIB réel.

La relation entre les émissions de déchets et la part des services dans les volumes produits est quant à elle évaluée dans la partie (b) de la figure 2.10. On y observe une relation décroissante, à l'inverse de la relation nominale. Cette relation s'explique par la maladie des coûts et le comportement réactif des firmes de type  $i_s$ . En effet, la maladie des coûts implique une stagnation asymptotique du volume de services produits (cf. figure 2.6), tandis que la stratégie d'obsolescence planifiée des firmes  $i_s$

induit un renouvellement de plus en plus fréquent des achats de biens, que ce soit pour un motif esthétique ou bien par nécessité, du fait d'une durée de vie de plus en plus réduite des biens vendus. Ainsi, la production de services est stagnante tandis que celle des biens est croissante, d'où une part décroissante des services dans la production réelle et la correspondance des observations les plus faiblement tertiari-sées avec les niveaux les plus importants d'émissions de déchets.

L'hypothèse du comportement réactif des entreprises face au déclin du secteur industriel semble donc produire de bons résultats au vu des faits stylisés des émissions de déchets des économies tertiaires. Par ailleurs, le modèle suggère que la relation positive entre les déchets émis et la part des services dans la production est le produit de la maladie des coûts : la croissance des prix des services masquant une relation négative en volume.

## 2.6 Proposition de politique environnementale

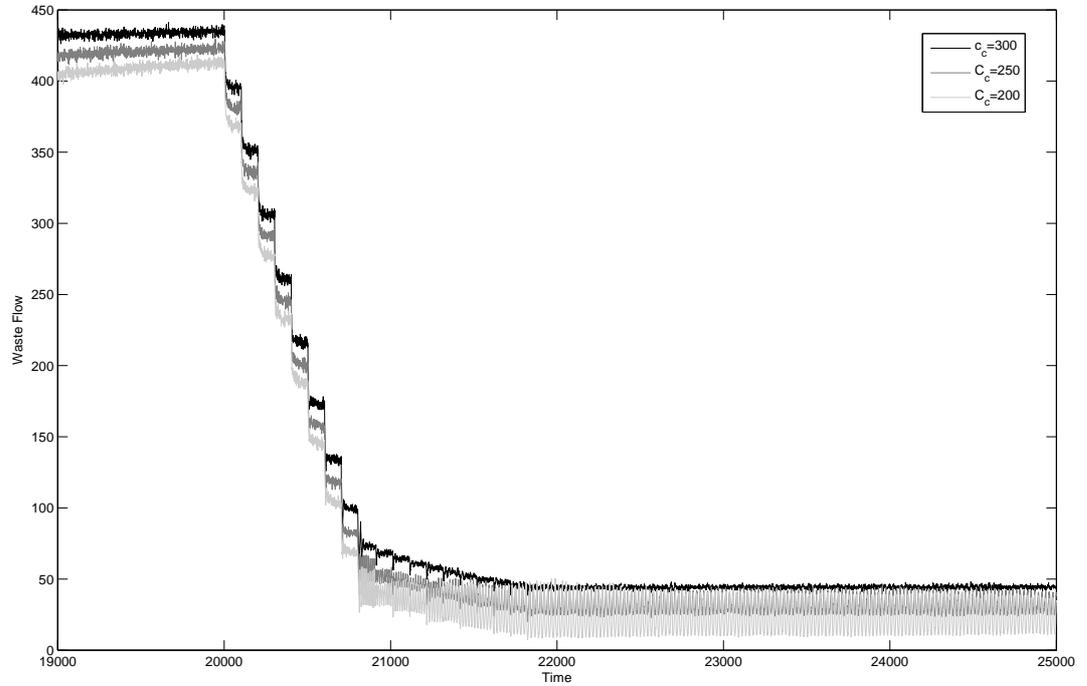
Dans la construction du modèle, nous avons introduit un paramètre réglementaire  $q_{min}$  (cf. équation 2.6) qui détermine le niveau de qualité en-deçà duquel les entreprises ne peuvent descendre. Dans cette section, nous analysons les conséquences d'une augmentation de  $q_{min}$  sur les émissions de déchets. Afin de proposer des résultats pertinents, nous nous limitons encore une fois aux 3 scénarios où  $i_s = 10$ , car ils génèrent une série temporelle logistique pour les flux d'émissions. Par convention, la politique est mise en place à partir de la période 20000 (les simulations durent désormais 25000 périodes). Elle consiste à augmenter  $q_{min}$  d'une unité toutes les 100 périodes jusqu'à atteindre  $q_{max}$ , la valeur maximum permise par la technologie en vigueur. Cette hausse graduelle permettra d'observer l'effet de différents niveaux de paramètres  $q_{min}$  sur les émissions.

L'effet d'une telle politique sur la durée de vie des biens sera immédiat. On attend donc une réduction du nombre d'achats motivés par la nécessité, mais dans le même temps, il est possible que les achats pour motif de style viennent contreba-

lancer cette réduction. Afin d'évaluer l'importance de cet effet rebond attendu, nous distinguons désormais ces deux motifs d'achats. Ainsi le modèle considère désormais tout achat réalisé lorsque le consommateur n'est pas équipé, ou bien lorsque le bien possédé est cassé ou arrivé en fin de vie, comme un achat de nécessité. L'achat de style réunit quant à lui tous les achats réalisés par des consommateurs équipés d'un bien encore fonctionnel mais qu'ils jugent désuet.

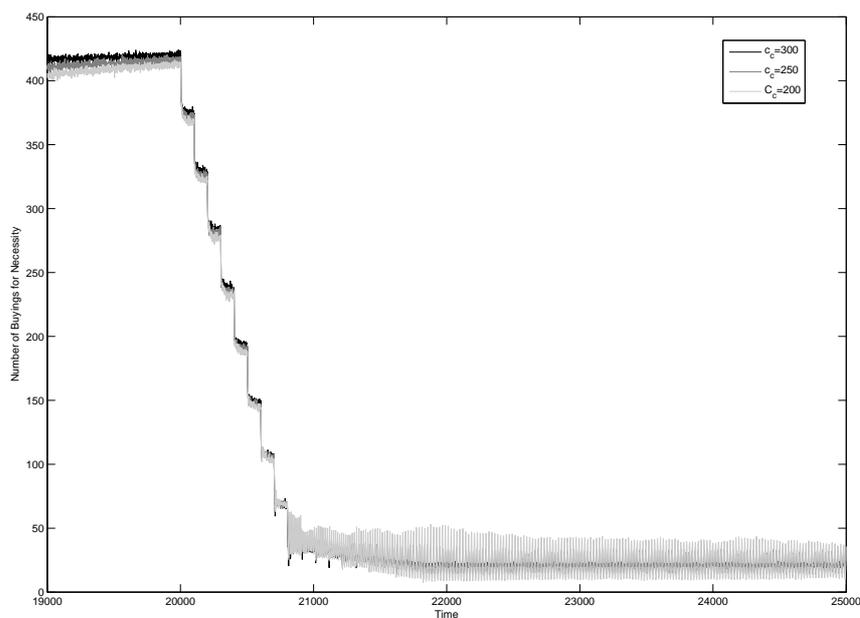
L'effet de la politique sur les émissions de déchets est présenté dans la figure 2.11. On observe que plus le niveau de  $q_{min}$  est important, plus le niveau des émissions est faible, et cela quelque soit la structure initiale de la population des consommateurs. On constate toutefois que le niveau des émissions à long terme se caractérise par des fluctuations d'amplitude nettement plus élevées dans le scénario où  $c_c = 200$ , c'est-à-dire celui où la norme de consommation émergente est non-compulsive. On peut également montrer que ces fluctuations sont moins aléatoires que celle du scénario à population de consommateurs homogènes et compulsifs (c'est-à-dire  $c_c = 300$ ). Dans le cas  $c_c = 200$  en effet, les consommateurs n'achètent finalement un nouveau bien que lorsqu'ils en ont besoin. Après la politique, tous les produits ont une qualité égale à  $q_{min} = 20$ , et donc leur durée de vie devient plutôt homogène. Les fluctuations des émissions de déchets révèlent ainsi des cycles réguliers au cours desquels un grand nombre de consommateurs décident en même temps d'acheter ou de ne pas acheter un nouveau bien. De tels cycles ne peuvent exister dans le scénario où l'achat compulsif est la norme puisque l'évaluation individuelle et subjective du style des nouveaux biens y est un motif d'achat important.

FIGURE 2.11 – Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) sur les émissions de déchets

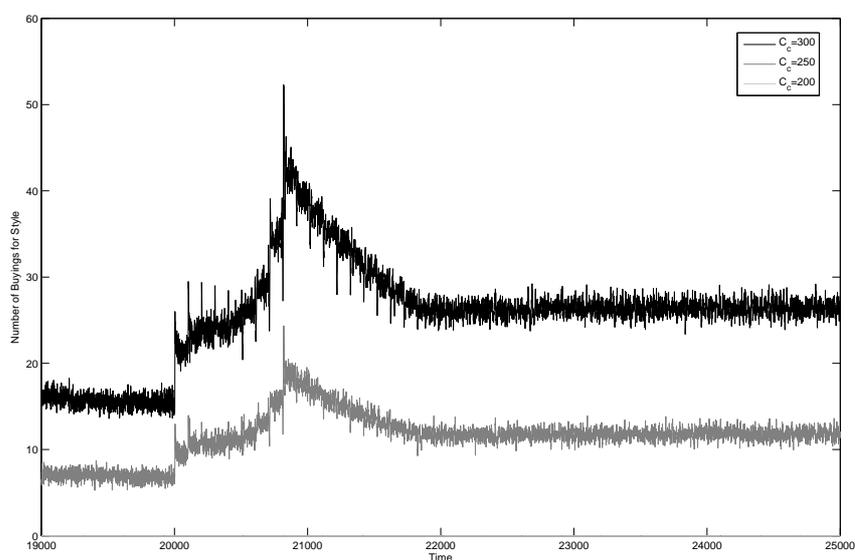


La partie (a) de la figure 2.12 présente l'évolution du nombre d'actes d'achats par nécessité dans chacun des trois scénarios étudiés. Les dynamiques observées confirment notre explication de l'amplitude des fluctuations des rejets de déchets. En effet, les achats pour motif de nécessité dans le scénario à norme de consommation non-compulsive ( $c_c = 200$ ) sont caractérisés par une forte amplitude comparative-ment aux scénarios alternatifs. Quant aux achats pour motif de style (figure 2.12 (b)), ils illustrent l'existence d'un effet rebond limité puisque leur niveau après la politique est stable et relativement faible. Cette stabilité s'explique par la durée de vie toujours limitée des biens, qui contraint les consommateurs compulsifs à acheter des produits pour motif de nécessité assez régulièrement. Par ailleurs, on observe une forte réduction des profits des firmes industrielles (figure 2.13 (d)), ce qui induit une mise en marché moins fréquente de produits au style novateur (autrement dit, la condition d'innovation de style est moins fréquemment remplie). Cette baisse du profit des firmes correspond à un retour aux niveaux de profits d'avant l'émergence

du comportement stratégique des firmes, elle s'explique donc par la réduction du rythme d'achat des consommateurs à la suite de la hausse de la durée de vie des produits liée à la politique publique.



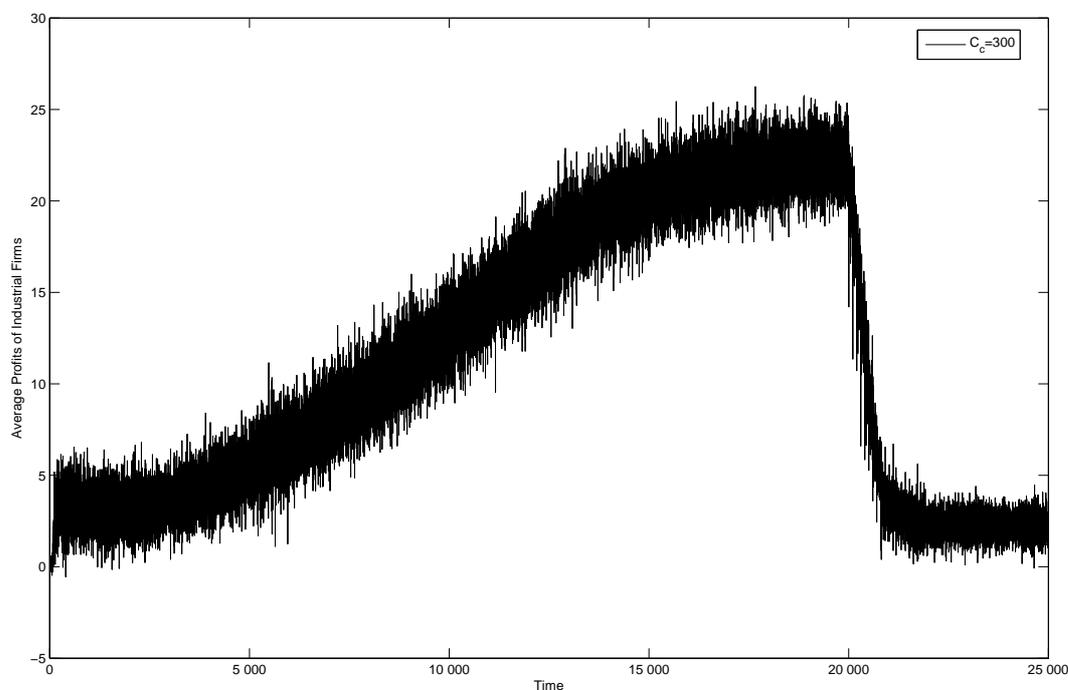
(a)



(b)

FIGURE 2.12 – Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) : (a) sur le nombre d'achats par nécessité, (b) sur le nombre d'achats pour motif de style.

FIGURE 2.13 – Effet de la politique réglementaire ( $t \in [19000 ; 25000]$ ) sur le profit moyen des firmes du secteur industriel.



## 2.7 Conclusion

En conclusion, on peut dire que notre modèle est en mesure d'expliquer les observations statistiques sur les émissions de déchets municipaux des économies tertiaires. Il confirme ainsi la pertinence de l'analyse de Witt ([151] et [152]) selon laquelle les firmes de secteurs en déclin cherchent à mettre en place des stratégies d'obsolescence planifiées afin de relancer la croissance d'une demande pourtant parvenue à satiété. Dans cette perspective, la naissance de la société de consommation peut être interprétée comme une conséquence de la tertiarisation, envisagée comme une période de déclin des secteurs industriels.

Plus généralement, nous avons analysé dans le premier chapitre comment les travaux portant sur l'évaluation de la pollution des activités de services (Ifen, 2004 [79] ; Fourcroy et al., 2012 [51]) invitent surtout à opérer une réaffectation des pollutions

depuis l'industrie vers les services. Ainsi, à moins de conclure que les services sont plus polluants que l'industrie, ces travaux ne permettent pas d'expliquer la croissance de la pollution macroéconomique au cours du processus de tertiarisation. Dans ce chapitre en revanche, nous avons proposé une explication de la croissance de la pollution par l'hypothèse de comportements adaptatifs. Dans cette perspective, la tertiarisation est polluante, non pas parce que les services sont des activités particulièrement polluantes, mais parce qu'elle implique des changements de comportements de la part des agents économiques, et notamment de la part des entreprises industrielles, qui ne restent pas passives face au tarissement de leurs débouchés.

Nous en déduisons que la politique environnementale doit se concentrer davantage sur le produit que sur le processus de production : les observations statistiques d'Ayres et al. (2004 [4]) révèlent en effet la présence d'un progrès technique allant dans le sens d'une baisse de la masse de la production, progrès qui semble compensé par la croissance de la consommation. De même, notre modèle et la littérature sur l'émergence de la société de consommation (Whiteley, 1987 [149] ; Meikle, 2001 [97] ; Packard, 1960 [108] ) montrent que c'est avant tout le design des produits qu'il faut repenser pour sortir de la logique d'obsolescence planifiée qui s'est généralisée dans l'industrie. Cette option est celle de l'"économie de la fonctionnalité" qui consiste à *"insister [pour les firmes] sur la fonction ou le service que les produits peuvent fournir plutôt que sur la possession du produit lui-même"* (Van den Bergh et Janssen, 2004 [144] p.44)<sup>33</sup>.

L'analyse réalisée dans ce chapitre est cependant confrontée à un certain nombre de limites. La première est une limite d'unités : les flux de déchets que nous mesurons dans les simulations sont évalués en nombre de produits jetés, alors que les données réelles que nous utilisons sont mesurées en tonnes. Compte tenu de la trajectoire technologique identifiée par Ayres et al. (2004 [4]) vers une réduction de la masse des biens et des processus productifs, les données réelles utilisées minorent forcément la croissance de la consommation et des rejets de déchets. De plus, nous avons

---

33. Traduction personnelle.

relevé que la tertiarisation passe par l'apparition de nouveaux services, notamment des services aux entreprises, qui ont joué un rôle fondamental dans l'émergence de la société de consommation (design industriel, publicité, stylistes...). Or, le modèle ne fait pas intervenir ces services.

Par ailleurs, le modèle illustre l'idée d'un conflit entre la croissance et l'environnement. Cette conclusion repose ici sur une dichotomie entre services improductifs et industrie productive. Dans un tel univers, en effet, la croissance n'est possible que grâce à l'industrie, qui doit faire face à une saturation de ses débouchés et qui réagit en mettant en place des stratégies d'obsolescence planifiée. Cette dichotomie semble cependant devoir être remise en question par le rôle majeur joué par les services aux entreprises pour générer de la croissance dans les économies contemporaines (Jorgenson, 2009 [84] ; Baumol et Schramm, 2010[13]). On se demande dès lors si la façon de produire de la croissance dans une économie dominée par les services n'est pas différente de celle à l'œuvre dans une économie industrielle. Dans ce cas, un certain nombre de questions importantes se posent : la croissance d'une économie tertiaire est-elle plus ou moins polluante que la croissance d'une économie industrielle ou en phase de tertiarisation ? Les services aux entreprises ne peuvent-ils pas agir ou bien être utilisés en faveur du développement d'innovations environnementales et de l'émergence de comportements plus responsables chez les agents du système économique ? Nous abordons ces questions dans les chapitres suivants.

TABLE 2.2 – Conditions initiales et valeur des paramètres du modèle

Paramètre	Description	Valeur
$\beta$	Réactivité des firmes face à une erreur d'anticipation	0.5
$a_j$	Productivité constante des firmes de services $j$	1.5
$\delta$	Part des profits positifs investis en R&D par les firmes industrielles	0.25
$\xi$	Paramètre d'échelle de la R&D	0.1
$\mu$	Taux de marge sur coût unitaire, commun à toutes les firmes	0.1
$\phi$	Part des profits positifs investis en R&D d'obsolescence planifiée par les firmes industrielles $i$	0.25
$q_{max}$	Niveau maximum de qualité pour les biens des firmes $i$	20
$q_{min}$	Niveau minimum de qualité pour les biens des firmes $i$	1
$\tau$	Paramètre d'échelle dans la détermination de la qualité des produits	0.1
$\sigma_{min}$	Part minimum du budget d'un consommateur allouée à la consommation de services	0.1
$\sigma_{max}$	Part maximum du budget d'un consommateur allouée à la consommation de services	0.7

# Chapitre 3

## La croissance de long terme dans une économie de services

### 3.1 Introduction<sup>1</sup>

Nous avons mis en évidence, dans le chapitre 2, une incompatibilité profonde entre les objectifs de croissance et de dé-pollution dans une économie dichotomique, c'est-à-dire dans laquelle les secteurs industriels sont progressifs alors que ceux de services demeurent stagnants. En effet, à cause de l'inflation du prix des services dans une telle économie (cf. la maladie des coûts de Baumol), les seules opportunités de croissance résident dans l'industrie, dont la demande arrive peu peu à satiété avec la croissance du revenu. La solution pour croître indéfiniment est alors, pour les firmes industrielles, de trouver un moyen de stimuler davantage la demande de biens. Historiquement, ce sont les stratégies d'obsolescence planifiée qui ont joué ce rôle. Ces stratégies consistent à rendre un produit démodable par des innovations incrémentales de style ou de fonction, ou bien à baisser peu à peu la qualité d'un produit afin de le rendre de plus en plus fréquemment sujet à la casse. Ainsi, la croissance d'une économie dichotomique où la demande de biens est parvenue à satiété repose finalement sur la production toujours plus grande de déchets.

---

1. Certains résultats de ce chapitre ont été publiés dans : B. Desmarchelier, F. Djellal, F. Gallouj (2012), "Knowledge intensive business services and long term growth", *Structural Change and Economic Dynamics*, à paraître.

On se demande maintenant si cette hypothèse de services improductifs est réaliste. Si cette hypothèse n'était pas vérifiée, la réponse à la question des possibilités de découplage croissance-pollution exigerait que l'on se dote d'un modèle capable de simuler la croissance d'une économie tertiaire.

À première vue, les statistiques sectorielles sur l'évolution de la productivité semblent confirmer l'improductivité des services (Baumol et al., 1994 [11]). De même, les conclusions du modèle dichotomique semblent validées par l'observation d'un ralentissement de la croissance tendancielle dans de nombreux pays qui entrent dans leur phase tertiaire. Ainsi, les États-Unis font l'expérience d'une rupture à la baisse de leur trend de croissance dès 1968 (Stock et Watson, 1999 [137]). Une telle rupture est aussi observée au début des années 1970 pour la France, le Royaume-Uni, le Japon, l'Allemagne de l'Ouest et les Pays-Bas (Maury et Pluyaud, 2004 [95]). Fournier (2000 [52]) identifie même un nouveau tassement de la croissance tendancielle pour la France à partir de 1992-1993.

Pour autant, de nombreux indices mettent en doute cette vision dualiste. En effet, de nombreuses innovations sont réalisées dans les secteurs de services sans être captées par les indicateurs traditionnels de l'innovation que sont les dépenses en R&D en sciences et techniques, les dépôts de brevets et la croissance de la productivité. Griliches (1994 [69]) considère ainsi que l'usage massif de l'informatique dans les secteurs de services en a sans aucun doute accru la productivité et la qualité, mais sans que ces dynamiques soient reflétées dans les indices de productivité, notamment à cause d'un output particulièrement difficile à définir et à mesurer dans les services. Selon lui, la baisse de la croissance tendancielle est bien le produit d'un glissement progressif des productions nationales vers les secteurs de services, mais elle s'explique par les difficultés de mesure du produit de ces secteurs plus que par leur improductivité réelle. Le paradoxe de Solow (1987 [132]) selon lequel *"you can see the computer age everywhere but in the productivity statistics"* (p. 36) serait donc uniquement le fruit d'outils statistiques inadaptés aux économies de services.

Au niveau des indicateurs de brevets et de R&D, Djellal et al. (2003 [36]) montrent que les services réalisent des dépenses régulières en R&D, mais que ces dépenses concernent davantage les sciences humaines et sociales et l'ingénierie organisationnelle, éventuellement hybridées aux TIC<sup>2</sup>, que les sciences et techniques à proprement parler, qui sont traditionnellement considérées comme l'unique domaine de la R&D<sup>3</sup>. Ces auteurs constatent également que cette R&D dans l'entreprise de services n'est pas forcément réalisée dans un département dédié et qu'elle ne débouche pas systématiquement sur le dépôt d'un brevet. Dans un travail plus récent, Djellal et Gallouj (2010 [39]) défendent l'idée que les économies de services sont caractérisés par un double déficit ("*gap*"), l'un dans l'évaluation de la productivité et de la performance (le "*performance gap*"), et l'autre dans l'évaluation de l'innovation ("*innovation gap*").

Aborder les questions d'innovation et de productivité dans les services requiert donc l'usage d'indicateurs alternatifs. Wolff (2002 [153]) s'inscrit dans cette perspective en distinguant deux types de secteurs tertiaires : les "*services progressifs*", qui ont connu une croissance globalement positive de la productivité du travail sur la période 1947-1997<sup>4</sup>, et les "*services stagnants*", dont la productivité reste globalement inerte sur la période. Wolff se concentre sur une comparaison du profil des employés des firmes de services stagnants avec celui des firmes progressives (industrielles et de services). La main d'œuvre apparaît alors beaucoup plus qualifiée et compétente dans les activités stagnantes. De même, la part de "*knowledge workers*", c'est-à-dire de travailleurs techniques et/ ou travaillant dans le domaine du management (p. 9), y est sensiblement plus importante que dans les secteurs progressifs. Enfin, il observe

---

2. Dans cette thèse, TIC signifie "Technologies de l'Information et des Télécommunications".

3. Même si le manuel de Frascati retient les SHS dans sa définition de la R&D.

4. Il s'agit principalement de services à forte composante matérielle (transport, communication, fourniture d'électricité et de gaz). En reprenant l'analyse de Griliches (1994 [69]), on pourrait justifier ce caractère progressif en notant qu'il s'agit des services dont l'output est le plus proche d'un output industriel. Il s'agit d'un output qui se prête plutôt bien à la mesure par l'indice de productivité usuel.

un très fort investissement en matériel informatique dans les firmes pourtant considérées comme stagnantes. Wolff en conclut que *"les services, prétendus stagnants par le modèle standard de la maladie des coûts, ne sont pas technologiquement inertes. Bien que ces secteurs fassent apparaître une croissance de la productivité proche de zéro, ils sont très actifs et ont subi des changements majeurs avec le temps selon d'autres indices technologiques"*<sup>5</sup> (p. 21).

Ces observations sur la productivité des services suggèrent que le ralentissement de la croissance de la productivité dans les économies développées est, dans une certaine mesure, une illusion statistique. Il s'agit d'une affirmation aux conséquences importantes pour la question du découplage croissance-pollution. En effet, si l'on considère que les émissions polluantes sont bien mesurées, une révision à la hausse des estimations de croissance du PIB permettrait de conclure à l'existence d'un découplage (relatif<sup>6</sup>) important, ce qui nous conduirait à ré-envisager la question de la compatibilité des objectifs de croissance et de dé-pollution, qui paraissent contradictoires dans le cadre des modèles dichotomiques (c'est-à-dire dans lesquels la productivité des services est constante). Mais un problème se pose : l'étude de la relation croissance-pollution dans une économie de services est particulièrement délicate dans la mesure où, comme nous venons de le souligner, la croissance du PIB y est probablement mal définie et mal évaluée. Nous consacrons donc ce chapitre à l'étude de la relation services-croissance. Il s'agit d'un préalable à l'étude de la relation croissance-pollution, que nous abordons dans le chapitre 4. Notre objectif est ici de construire un système multi-agents de croissance tertiaire. Un tel modèle, après un bilan de la littérature récente sur la relation services-croissance (section 1), est proposé dans la deuxième section. La troisième section est consacrée à l'analyse des dynamiques émergentes du système ainsi qu'à ses propriétés statistiques.

---

5. Traduction personnelle.

6. On parle de découplage relatif lorsque la corrélation du niveau du PIB avec les émissions polluantes se réduit, sans pour autant devenir négative.

## 3.2 La relation services-croissance : une relation paradoxale à deux niveaux

Baumol (2002a [6]) résume la difficulté d'aborder la question de la croissance tertiaire par un double paradoxe théorique<sup>7</sup>. D'abord, comme nous l'avons souligné dans l'introduction de ce chapitre, certains services sont qualifiés d'improductifs alors qu'ils semblent particulièrement innovants. Ensuite, la forte croissance des services aux entreprises pose la question des relations intersectorielles dans la mesure où, malgré leur stagnation apparente, ces services, semblent capables d'accroître la productivité de leurs clients et la productivité agrégée. Nous examinons ces deux paradoxes dans les sous-sections suivantes.

### 3.2.1 Vers une redéfinition du capital accumulable

Comme le suggère Wolff (2002 [153]), il peut être pertinent, sur la base de l'indice traditionnel de productivité du travail, de distinguer les services selon qu'ils sont progressifs ou non. Pour Baumol et Wolf (1983 [14]) et Baumol (2002 [8]), les services progressifs ont la particularité de combiner deux types d'inputs en proportions fixes, à savoir du capital progressif (par exemple des ordinateurs) et un input stagnant (par exemple du travail intellectuel). Afin d'illustrer l'importance de ce type de services pour la croissance, Baumol (2002 [8]) remarque que la R&D appartient aux services progressifs, dans la mesure où elle combine divers inputs progressifs (ordinateurs, microscopes, lasers...) et des capacités intellectuelles par nature stagnantes.

---

7. Petit (1999 [112]) considère quant à lui que la croissance des économies qu'il qualifie de "*fondées sur le savoir*" présente un triple paradoxe. Le premier paradoxe est celui mis en évidence par Solow : on assiste à une large diffusion des technologies de l'information et de la communication (TIC) et en même temps à une certaine inertie des statistiques de productivité. Le deuxième paradoxe est qu'on observe une large internationalisation des entreprises, notamment grâce aux TIC et aux faibles coûts de transport, sans que les statistiques des balances des paiements ne permettent de conclure à une internationalisation plus poussée que celle survenue à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Le troisième paradoxe relevé par l'auteur est celui de la qualification croissante de l'offre de travail. En effet, Petit souligne que, durant l'époque fordiste des années 1950-1960, le progrès technique s'accompagnait plutôt d'une augmentation de la demande de travail peu qualifié.

En effet, selon lui *"l'acte de penser est un input crucial du processus de recherche, mais il y a peu de raisons de croire que nous soyons devenus plus performants dans cette activité que Newton, Leibnitz ou Huygens"*<sup>8</sup> (p.153).

La question qui se pose pour les auteurs pour Baumol et Wolff est alors de savoir si la maladie des coûts s'applique à ces services progressifs. Une réponse positive signifierait que, si la demande pour ces services est élastique, alors la demande de R&D pourrait se réduire à terme, menaçant la poursuite du processus de croissance. Baumol et Wolff (1983 [14]) proposent de répondre à cette question en modifiant le modèle de croissance déséquilibrée original (Baumol, 1967 [7]). Le nouveau modèle proposé comprend 3 secteurs : le secteur 1 est progressif, le secteur 2 est stagnant et le secteur 3 utilise en inputs leurs productions respectives,  $y_1$  et  $y_2$ , en proportions fixes  $k_1$  et  $k_2$ . En notant  $L_{1t}$  et  $L_{2t}$  les quantités de travail utilisées en input par les secteurs 1 et 2,  $r$  le taux périodique de croissance de la productivité du travail dans le secteur progressif, et avec  $c$  et  $b$  deux constantes réelles positives, les fonctions de production de  $y_1$  et  $y_2$  sont données par les équations 3.1 et 3.2.

$$y_{1t} = c.L_{1t}.e^{rt} \quad (3.1)$$

$$y_{2t} = b.L_{2t} \quad (3.2)$$

Le salaire  $W_t$  est supposé indexé sur la productivité moyenne du travail dans l'économie<sup>9</sup>, de sorte que  $\frac{\partial W_t}{\partial t} < r$ . Le coût unitaire du secteur 3,  $CU_{3t}$ , est selon Baumol (2002 [8]) une moyenne pondérée des coûts unitaires des deux autres secteurs (équation 3.3).

$$CU_{3t} = k_1.CU_{1t} + k_2.CU_{2t} = k_1.\frac{W_t L_{1t}}{c L_{1t} e^{rt}} + k_2.\frac{W_t L_{2t}}{b.L_{2t}} = k_1.\frac{W_t}{c e^{rt}} + k_2.\frac{W_t}{b} \quad (3.3)$$

Puisque l'input progressif est par hypothèse plus productif que la moyenne,

---

8. Traduction personnelle.

9. On note que le salaire était indexé sur la productivité du secteur progressif dans le modèle original proposé par Baumol en 1967 [7] (cf. chapitre 1 section 1.2).

$\frac{\partial W_t}{\partial t} < r$ , son coût unitaire se réduit peu à peu tandis que celui de l'input stagnant va croître au rythme  $\frac{\partial W_t}{\partial t} > 0$ . Ces dynamiques contradictoires impliquent une trajectoire temporelle non monotone pour le coût du secteur des services progressifs : la baisse du coût de l'input progressif va induire une première phase de diminution de  $CU_{3t}$ , diminution qui sera peu à peu contrebalancée par la hausse du coût unitaire de l'input stagnant, si bien qu'à long terme, le coût du service progressif va se comporter comme celui d'une activité stagnante, victime de la maladie des coûts. Ainsi, selon ce modèle, les services progressifs, en particulier la R&D, sont en fait asymptotiquement stagnants.

Pour Baumol (2002a [6]), ce modèle explique le premier paradoxe : des activités de services particulièrement innovantes peuvent se révéler stagnantes à long terme. De notre point de vue, cette construction théorique présente deux lacunes. D'abord, elle ne permet pas d'expliquer pourquoi des activités qui ont toujours été perçues comme stagnantes sont en fait innovantes. C'est le cas notamment du secteur de l'assurance : Wolff (2002 [153]) le classe parmi les secteurs stagnants, mais il constate qu'il est en même temps le plus gros investisseur en matériel informatique et aussi le secteur où la main d'œuvre est la plus qualifiée (caractéristiques qui devraient en faire un secteur asymptotiquement stagnant, donc temporairement progressif). De même, Barras (1986 [5]) observe l'existence d'un cycle d'innovation (inversé) dans ce secteur, ce qui remet en cause la pertinence de sa stagnation supposée. Ensuite, le modèle révisé de Baumol (2002 [8]) conditionne le caractère progressif à l'usage de capitaux matériels. Or, un certain nombre d'auteurs (Prescott, 1998 [115] ; Roth et al., 2010 [125] ; Nakamura, 1997 [99], 2001 [100] ; Corrado et al., 2009 [28]) suggèrent que la notion de capital doit être élargie dans une économie de services.

L'argument principal en faveur de cet élargissement est qu'un certain nombre d'actifs immatériels (R&D en sciences humaines et sociales, dépenses de publicité, formation, logiciels...) sont accumulables et ont un impact significatif sur la productivité du travail. Corrado et al. (2009 [28]) regroupent ces actifs en trois catégories de

capitaux intangibles (p. 669-671) : les données informatisées (logiciels), la "*propriété innovante*" (R&D "*scientifique*" et "*non-scientifique*", c'est-à-dire qui ne concerne pas les sciences exactes), et les compétences économiques (marque, formation...) <sup>10</sup>. À l'exception des logiciels, dont l'acquisition est désormais considérée comme un investissement, ces actifs intangibles sont comptabilisés par les agences nationales de statistique au titre de consommations intermédiaires. Il est ainsi admis que ces actifs ne sont pas accumulables (donc que leur produit s'évapore après usage) et qu'ils sont implicitement présents dans l'évaluation du stock de ressources en travail et en capital de l'économie.

Corrado et al. (2009 [28]) utilisent la décomposition du taux de croissance du PIB, suggérée par Solow (1957 [131]), pour évaluer l'incidence de l'ajout (et de l'omission) des capitaux intangibles sur la mesure de la croissance du PIB et sur la contribution des différents facteurs de production à cette croissance. Nous rappelons tout d'abord les termes de la décomposition de Solow (1957 [131]), puis nous examinons les amendements introduits par Corrado et al. afin d'observer l'incidence de l'ajout des capitaux intangibles.

#### – La décomposition de Solow originale

Dans le cadre de la décomposition de Solow, les capitaux intangibles sont considérés comme inclus dans les facteurs de production usuels. Soit  $Y$ ,  $K$  et  $L$  respectivement le produit national, les capitaux matériels et le facteur travail. En notant  $F$  la fonction de production macroéconomique et  $A$  le progrès technique neutre au sens de Solow, le produit national est donné par la relation  $Y_t = A_t F(K_t, L_t)$ . La décomposition du taux de croissance est obtenue en log-différentiant cette relation (équation 3.4).

---

10. Dans le texte, ces trois catégories sont nommées respectivement "*computerized information*", "*innovative property*" et "*non-scientific R&D*". La qualification de "non scientifique" vient principalement de la grande hétérogénéité de cette "autre" R&D, qui inclue aussi bien des dépenses publicitaires sous forme de films ou de loisirs que des dépenses de développement d'un nouveau produit.

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{\dot{A}}{A} + K \times \frac{F'_K}{Y} \frac{\dot{K}}{K} + L \times \frac{F'_L}{Y} \frac{\dot{L}}{L} \quad (3.4)$$

En concurrence pure et parfaite, les facteurs de production sont rémunérés à leur productivité marginale, ce qui implique que  $F'_K = r$  et  $F'_L = w$ , avec  $r$  le taux d'intérêt qui rémunère le capital et  $w$  le salaire. Si par ailleurs la technologie est de type Cobb-Douglas, soit  $Y_t = A_t K_t^\alpha L_t^\beta$ , alors  $K \times \frac{F'_K}{Y} = \alpha$  et  $L \times \frac{F'_L}{Y} = \beta$ . Avec ces hypothèses supplémentaires, et en notant  $g_Y$ ,  $g_K$  et  $g_L$  respectivement le taux de croissance du PIB, celui du capital et celui du travail, le taux de croissance du PIB peut être décomposé comme la moyenne pondérée de la croissance des facteurs  $K$  et  $L$  à laquelle on ajoute la croissance du progrès technique  $g_A$  (équation 3.5).

$$g_Y = g_A + \alpha g_K + \beta g_L \quad (3.5)$$

#### – Décomposition de Solow avec capitaux intangibles accumulables

Corrado et al. (2009 [28]) ajoutent un nouveau facteur de production, à savoir le stock de capitaux intangibles, à la fonction de production macroéconomique utilisée par Solow. On note  $R_t$  le stock de capitaux intangibles à la période  $t$ . Si ces capitaux sont considérés comme du capital productif accumule, alors leur stock progresse et ils doivent apparaître dans la fonction de production comme un input, au même titre que le facteur  $K$ . La nouvelle fonction de production s'écrit  $Y_t = A_t F(K_t, L_t, R_t)$ . En notant  $\gamma$  la part de  $R$  dans le revenu national, soit  $\gamma = R \times \frac{F'_R}{Y}$ , la décomposition de Solow prend la forme de l'équation 3.6.

$$g_Y = g_A + \alpha g_K + \beta g_L + \gamma g_R \quad (3.6)$$

Cette nouvelle décomposition suggère que chaque taux de croissance, y compris

celui du PIB, ainsi que les valeurs des parts de chacun des facteurs dans le revenu national, doivent être ré-estimés. Le tableau 3.1 fourni une comparaison aux résultats officiels (donc sans capitaux intangibles) des estimations réalisées par Corrado et al. (2009 [28]) pour les États-Unis.

TABLE 3.1 – Décomposition de Corrado et al. (2009 [28]) p. 679) (en %).

	<b>1973-1995</b>	<b>1995-2003</b>
<b>Données officielles</b>		
$g_Y$	1.36	2.78
$\alpha g_K$	0.6	0.98
$\beta g_L$	0.28	0.38
$g_A$	0.48	1.42
<b>Calculs des auteurs avec capitaux intan- gibles</b>		
$g_Y$	1.63	3.09
$\alpha g_K$	0.55	0.85
$\gamma g_R$	0.43	0.84
$\beta g_L$	0.25	0.33
$g_A$	0.41	1.08

On observe une nette ré-évaluation de  $g_Y$  à toutes les périodes, ce qui confirme l'hypothèse de Griliches (1994 [69]) selon laquelle le tassement du trend de croissance du PIB est surtout le fruit de conventions statistiques inadaptées aux économies tertiaires. Les résultats obtenus sont intéressants d'un point de vue statistique puisqu'ils conduisent à réduire la part inexpliquée de la croissance,  $g_A$ , qui est souvent (abusivement) imputée au progrès technique. On observe également que le pouvoir explicatif des capitaux intangibles,  $\gamma g_R$ , est comparable à celui des capitaux matériels,  $\alpha g_K$ , sur la période 1995-2003, alors qu'il était clairement inférieur sur la période 1973-1995. Corrado et al. (2009 [28]) montrent en effet que les investissements en actifs intangibles croissent beaucoup plus vite que ceux en capital matériel sur toute la période 1973-2003. On assiste donc à une substitution progressive du capital immatériel au capital matériel en termes de contribution à la croissance.

Cette substitution semble s'inscrire dans un processus de dématérialisation des

sources de la croissance entamé bien avant 1973. En effet, Abramovitz (1993 [1]) aboutit à une conclusion similaire en observant une substitution progressive de la productivité globale des facteurs ( $g_A$ ) (PGF) au capital matériel ( $\alpha g_K$ ) vers 1890 aux États-Unis. Étant donné que la PGF inclut, en plus du progrès technique, le niveau du capital humain, Abramovitz note que *"dans les années 1800, un biais du progrès technique en faveur de l'usage du capital matériel a soutenu un taux élevé et croissant d'accumulation du capital par heure travaillée. Au cours du [vingtième siècle], le biais du progrès technique a basculé vers le capital intangible. Le changement technologique tendait à accroître la productivité marginale du capital, sous forme d'éducation et de formation de la force de travail, à tous les niveaux ; sous la forme de la connaissance pratique acquise par l'investissement délibéré de ressources en recherche et développement et dans d'autres formes de capitaux intangibles, telle que la création et le support de la culture et des structures managériales d'entreprise, le développement et la commercialisation des produits"*<sup>11</sup> (p. 229). La récente montée en puissance de "nouvelles" formes de capitaux intangibles (logiciels, R&D en sciences humaines), mise en évidence par Corrado et al., semble quand à elle s'accompagner d'une substitution du nouveau facteur  $R$  aux sources traditionnelles de la croissance que sont la PGF et le capital matériel (cf. le tableau 3.1 et l'équation 3.6).

L'exercice comptable entrepris par Corrado et al. (2009 [28]) nous permet de répondre au premier paradoxe relevé par Baumol (2002a [6]). Si certaines activités de services semblent parfois stagnantes et parfois progressives selon l'indicateur d'innovation retenu, c'est parce que leurs investissements massifs en capitaux intangibles (personnels qualifiés et matériel informatique) ne sont pris en compte que comme des consommations intermédiaires dans les calculs usuels de la productivité. Les travaux sur les intangibles nous permettent également de rejeter les conclusions des modèles dichotomiques<sup>12</sup> de la croissance tertiaire en ce sens que l'évidence empirique ne permet plus de conclure à une réduction de la croissance tendancielle lorsque l'on

---

11. Traduction personnelle.

12. Nous entendons par "modèle dichotomique" un modèle dans lequel les services sont stagnants et l'industrie et productive.

intègre les investissements intangibles dans le calcul de cette tendance.

### **3.2.2 Les services aux entreprises intensifs en connaissances (KIBS) : diffuseurs de connaissances et générateurs d'innovations**

La deuxième dimension du paradoxe de la croissance tertiaire relevée par Baumol (2002a [6]) est l'impact positif de certains services aux entreprises stagnants sur la productivité agrégée. Nous devons identifier ces services et déterminer pourquoi ils sont en mesure d'accroître cette productivité.

L'impact positif des services aux entreprises sur la productivité est mis en évidence par Oulton (2001 [107]) dans une critique au modèle de Baumol révisé (Baumol et Wolff, 1983 [14] ; Baumol, 2002 [8]). Le reproche principal adressé au modèle concerne son traitement de la demande de services aux entreprises comme une demande finale, alors qu'il s'agit d'une demande intermédiaire. En effet, ces services sont un input du processus de production de la firme cliente.

Oulton (2001 [107]) propose un modèle alternatif dans lequel une firme industrielle peut choisir entre deux types d'inputs substituables : le travail et les services intermédiaires (ou services aux entreprises). En raison de l'usage d'inputs progressifs, les firmes de services aux entreprises font l'expérience d'une croissance de la productivité du travail. Cette croissance, même si elle est faible, implique que les services intermédiaires sont nécessairement moins coûteux que le facteur travail lui-même. Ainsi, la demande pour ces services n'est pas menacée à terme, même s'ils présentent les symptômes de la maladie des coûts (croissance exponentielle de leur prix). De plus, la croissance de la part de ces services dans l'emploi est en mesure de générer un mécanisme automatique de croissance de la productivité agrégée. En effet, les gains de productivité dans les services intermédiaires viennent s'ajouter à ceux dans l'industrie qui les utilise, ce qui en augmente mécaniquement la productivité.

Le modèle proposé par Oulton reprend une hypothèse implicite du cadre d'analyse de Baumol et Wolff, à savoir que les services aux entreprises sont une forme de consommation intermédiaire. Cela signifie que le produit de ces services ne peut pas être capitalisé/ accumulé par la firme cliente en vue d'un retour positif éventuel en termes de performance (profit, part de marché ...). Cette hypothèse implique aussi qu'un service aux entreprises est avant tout choisi pour son moindre coût par rapport à un facteur de production alternatif (le facteur travail).

La définition d'un service proposée par Gadrey (1992 [58]), que nous avons retenue au chapitre 1, nous permet de mettre en doute cette hypothèse. Selon cette définition, un service est une *"opération visant une transformation d'état d'une [support] C, possédée ou utilisée par un consommateur (ou client ou usager) B, et souvent en relation avec lui mais n'aboutissant pas à la production d'un bien susceptible de circuler économiquement indépendamment du support C"* (p. 17). Ce support peut être un objet, un individu, de l'information codifiée ou de la connaissance. Or, Corrado et al. (2009 [28]) considèrent ces deux derniers supports comme des capitaux intangibles, dont l'acquisition obéit à une logique d'investissement à long terme. Par extension, nous pouvons considérer que la demande pour les services liés à l'information et à la connaissance obéit, elle aussi, à une logique d'investissement plus qu'à une logique de consommation intermédiaire. On peut aussi s'attendre à ce que de tels services accroissent la productivité de leurs clients, ce qui solutionnerait le second paradoxe de la croissance tertiaire identifié par Baumol : si des services stagnants contribuent à faire progresser la productivité de leurs clients, c'est qu'ils entrent dans le processus d'accumulation des capitaux intangibles de la firme cliente.

Pour Miles et al. (1995 [98]), les services aux entreprises portent justement sur les supports que sont l'information et la connaissance (assurance, banque, comptabilité...). La différence entre information et connaissance permet un classement plus fin des services aux entreprises. Selon Nonaka (1994 [103]) : *"l'information est un flux de messages et de significations qui peut s'ajouter à, restructurer ou modifier*

de la connaissance"<sup>13</sup> (p. 15), tandis que la connaissance est "une croyance vraie justifiée"<sup>14</sup> (p. 15). La connaissance requiert donc de l'information et une action humaine (qui peut être collective) de justification qui va lui donner du sens, une utilité. Les services aux entreprises orientés vers l'information sont ceux dont l'activité est centrée sur le "stockage et le transport de données" (Miles et al., 1995 [98]) (télécommunications, transactions financières...), tandis que les "services intensifs en connaissance" (KIBS<sup>15</sup>) (formation, conseil, services informatiques...) sont spécifiquement liés à la production et à la diffusion de connaissances dans le système économique.

La définition des KIBS proposée par Miles et al. est orientée output, mais d'autres définitions sont possibles. Ainsi pour Eurostat, les "services intensifs en connaissances" sont ceux dont une partie significative de la main d'œuvre dispose d'un niveau de formation universitaire<sup>16</sup>. Ils comprennent 4 sous-catégories : les services de haute technologie (R&D, télécommunications...), les services marchands intensifs en connaissances (transport aérien, activités immobilières...), les services financiers intensifs en connaissances et les autres services intensifs en connaissances<sup>17</sup>. Le critère déterminant pour Eurostat est donc la qualification de la main d'œuvre. Cette définition s'avère beaucoup plus large que celle de Miles et al. (1995 [98]) puisqu'elle englobe des services intensifs en information. Pour notre part, nous privilégions la définition en termes d'output, dans la mesure où elle est compatible avec la définition générale du service de Gadrey (1992 [58]) que nous avons retenue au chapitre 1. Les statistiques d'Eurostat traitant des KIBS sont donc à considérer avec précaution. Néanmoins, afin d'estimer l'importance du changement structurel à l'œuvre

---

13. Traduction personnelle.

14. Traduction personnelle.

15. KIBS = Knowledge Intensive Business Services, ou services aux entreprises intensifs en connaissances. Par commodité, nous choisissons d'utiliser l'abréviation anglophone dans la suite de cette thèse.

16. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_SDDS/en/htec\\_sms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/htec_sms.htm)

17. La liste complète des secteurs est disponible à l'adresse suivante :

[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Glossary](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Glossary_Classification_of_knowledge_intensive_services_(KIS)) : [Classification\\_of\\_knowledge\\_intensive\\_services\\_\(KIS\)](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Glossary_Classification_of_knowledge_intensive_services_(KIS))

en direction de ces activités, nous calculons le taux de croissance de leur part dans l'emploi pour les pays de l'UE-15 à partir des données fournies par Eurostat. Les résultats sont reportés dans le tableau 3.2. On observe une croissance très rapide de ces services, avec une progression dans la part de l'emploi supérieure à 20 % dans 7 pays sur les 15. Cette dynamique confirme une nouvelle fois la thèse de la dématérialisation du moteur de croissance des économies tertiaires<sup>18</sup>.

TABLE 3.2 – Taux de croissance (en %) de la part des KIBS dans l'emplois des pays de l'UE-15 entre 1998 et 2008 (données EUROSTAT).

Pays	taux de croissance
Belgium	10.22
Denmark	7.49
Germany	23.6
Ireland	23.28
Greece	23.64
Spain	20.72
France	9.2
Italy	21.31
Luxembourg	31.45
Netherlands	15.51
Austria	14.34
Portugal	8.28
Finland	9.87
Sweden	8.41
United Kingdom	12.89
Switzerland	20.24

Source des données : <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=0&language=en&pcode=tsc00012>

Les KIBS, tels qu'ils sont définis par Miles et al. (1995 [98]) sont compatibles avec les trois catégories d'intangibles de Corrado et al. (2009 [28]), à savoir les données informatisées (softwares), la "*propriété innovante*" (services de R&D, marketing...)

---

18. Notons que la dématérialisation du moteur de croissance n'implique pas nécessairement la dématérialisation de l'économie dans son ensemble. Nous avons d'ailleurs constaté dans le chapitre 1 que les économies tertiaires demeurent extrêmement matérielles et polluantes. La dématérialisation du "moteur" signifie simplement, comme le soulignent Abramovitz (1993 [1]) et Corrado et al. (2009 [28]), que la part de la croissance du PIB expliquée par les actifs immatériels progresse, bien que les facteurs matériels demeurent significatifs

et les "*compétences économiques*" (formation du personnel). Ainsi nous considérons la demande dont ils font l'objet comme relevant plus d'une décision d'investissement que d'une consommation intermédiaire. Antonelli et Quéré (2002 [3]) voient d'ailleurs les KIBS comme un "*moteur de l'accumulation*" (p. 1059), grâce à leur capacité à favoriser la diffusion des connaissances dans l'économie. L'hypothèse d'investissement en KIBS est confirmée par Tether et Hipp (2002 [139]). À partir d'une enquête menée auprès d'un large panel de firmes allemandes, ces auteurs montrent que la source principale de compétitivité pour les firmes de KIBS est la qualité du service, tandis que le prix apparaît comme étant l'une des sources de compétitivité les moins importantes. De même, Gallouj (2002 [63] p. 274) considère l'entreprise de KIBS comme un "*un système d'accumulation des connaissances*", parce qu'elle "*accumule, capitalise and et protège les connaissances issues de différentes transactions de service*". Selon-lui, la demande des services d'une telle firme "*s'explique moins par les coûts de transaction que par les différentiels cognitifs*"<sup>19</sup> (p. 274).

Le différentiel cognitif perçu par les clients potentiels peut être un indice de qualité dans le cas des KIBS : un différentiel important pourrait augmenter les chances du client de bénéficier d'une innovation. En effet, de nombreux auteurs soulignent l'incertitude du résultat d'un investissement en KIBS. Ainsi pour Nakamura (2001 [100]), "*une différence substantielle entre les investissements tangibles et intangibles est que le processus de production [des investissements] tangibles est bien moins risqué que celui [des investissements] intangibles*"<sup>20</sup> (p. 30), Baumol et al. (2007 [12]) considèrent également que "*contrairement à l'investissement dans une nouvelle machine, qui a une incidence plus ou moins prévisible en termes d'accroissement de la productivité, l'investissement dans la découverte de connaissances plein d'incertitudes*"<sup>21</sup> (p. 51).

Nous sommes désormais en mesure d'interpréter le deuxième paradoxe de la croissance tertiaire identifié par Baumol (2002a [6]), à savoir que certains services

---

19. Traductions personnelles.

20. traduction personnelle.

21. Traduction personnelle.

aux entreprises sont improductifs, mais qu'ils peuvent favoriser la croissance de la productivité agrégée. Ces services sont les services aux entreprises intensifs en connaissances (KIBS). Il s'agit d'activités de service dont le produit principal est la création de connaissances et leur diffusion dans le système économique. En raison de la nature de leur produit, la demande exprimée pour ces services est assimilable à des investissements en capitaux intangibles exerçant une influence positive sur la croissance agrégée (comme nous l'avons constaté en discutant le premier paradoxe). Le lien étroit entre KIBS et capitaux intangibles est également souligné par Antonelli (1995 [2]), qui montre que c'est par l'usage des KIBS que les technologies de l'information et de la communication (TIC) permettent d'améliorer la "*connectivité*" (le nombre de connexions entre agents dans un réseau) et la "*réceptivité*" (la capacité à absorber l'information) des agents. Enfin, la part croissante des KIBS dans l'emploi depuis le milieu des années 1990 (voir le tableau 3.2), confirme l'importance de plus en plus décisive de ces activités dans l'explication de la croissance.

### 3.3 Un modèle multi-agents de croissance tertiaire

Dans la section précédente, nous avons discuté les limites rencontrées par les statistiques et les modèles théoriques disponibles pour rendre compte du phénomène de croissance dans les économies tertiaires. Dans cette nouvelle section, notre objectif est de proposer un système multi-agents capable de générer les deux caractéristiques fondamentales de la croissance tertiaire que nous venons d'identifier, à savoir d'une part la croissance des services aux entreprises dans l'emploi et d'autre part la substitution progressive des capitaux intangibles aux capitaux matériels dans l'explication de la croissance du produit agrégé.

La littérature fournit un certain nombre de modèles de croissance économique de type multi-agents (voir Dawid, 2006 [29] pour un état de l'art sur le sujet). Parmi ces modèles, nous accordons une attention particulière à celui proposé par Dosi et al. (2006 [43]; 2008 [44]; 2010 [45]; 2011 [42]), d'une part parce que ses dynamiques

émergentes sont conformes à de nombreux faits stylisés, d'autre part parce qu'il est fondé sur un moteur de croissance exclusivement industriel. Nous commençons cette section par une présentation du fonctionnement de ce moteur de croissance, puis nous construisons notre propre modèle en nous en inspirant.

### 3.3.1 Le moteur de croissance à générations de capital de Dosi et al.

Le modèle de croissance proposé par Dosi et al. (2006 [43] ; 2008 [44] ; 2010 [45] ; 2011 [42]) est de type *vintage capital*, c'est-à-dire que la croissance économique  $y$  est générée par les décisions des firmes industrielles d'accroître et de moderniser leur stock de machines. Soit  $i = 1 \dots n$ , les  $n$  producteurs de biens de capital et  $j = 1 \dots m$ , les  $m$  producteurs de biens de consommation. Chacun de ces derniers possède un stock de  $k$  machines. La règle de prix d'une firme  $i$  à la période  $t$  est donnée par l'équation 3.7.

$$p_{it} = (1 + \mu_i) \frac{w_t}{a_{it}} \quad (3.7)$$

Avec  $\mu_i$ , la marge unitaire,  $w_t$  le niveau du salaire macroéconomique à la période  $t$  indexé sur le niveau moyen de la productivité dans l'économie, et  $a_{it}$  le niveau de productivité de la firme  $i$ . La firme  $j$  applique la même règle de tarification, à la différence près que dans son cas, le coefficient  $a_{jt}$  représente la productivité moyenne des  $k$  machines que possède la firme  $j$ . Dans le modèle de Dosi et al., les consommateurs sont représentés par une fonction de demande agrégée.

Une firme  $j$  peut accroître son stock de machines en demandant à une firme  $i$  des nouvelles, qui viendront s'ajouter à son stock existant. Elle peut également choisir d'en remplacer certaines par des machines plus récentes et plus performantes. Afin de décider des machines à remplacer, les firmes  $j$  passent en revue leurs machines à chaque période. Une machine  $k$  est alors remplacée si elle satisfait la condition (3.8).

$$\frac{p_{it}}{w_t} - \frac{w_t}{a_{kjt}} \leq b \quad (3.8)$$

$b$  est un réel positif et  $a_{kjt}$  est le niveau de productivité de la machine  $k$  possédée par la firme  $j$ . Régulièrement, chaque producteur de machines-outils  $i$  essaie d'innover. Si une innovation réussit, elle accroît la productivité  $a_{it}$  du producteur innovant et celle de la machine qu'il produit. Selon les équations 3.7 et 3.8, cette innovation va réduire le prix  $p_{it}$  et inciter davantage les firmes  $j$  à remplacer leurs machines actuelles par des nouvelles. Cet investissement de remplacement aura pour effets d'une part de réduire le prix du bien de consommation produit par la firme  $j$  et d'autre part d'accroître la productivité moyenne de l'économie et le niveau du salaire. Les consommateurs seront donc en mesure d'acheter davantage de biens, ce qui incitera en retour les firmes  $j$  à réaliser des investissements de capacité pour. Un cercle vertueux de croissance est ainsi mis en place par les interactions entre les firmes industrielles.

### 3.3.2 Un modèle de changement structurel endogène

Nous modifions maintenant le modèle de Dosi et al.<sup>22</sup> (2006 [43]; 2008 [44]; 2010 [45]; 2011 [42]) en lui ajoutant  $c = 1...C$  consommateurs individuels,  $z = 1...Z$  prestataires de services à la consommation, une population de  $g = 1...G$  fournisseurs de KIBS ainsi qu'une banque centrale. Le fonctionnement général du modèle durant une période  $t$  quelconque est résumé par la figure 3.12 (en annexe). Celle-ci présente les cinq populations d'agents concernées. La banque, quant à elle, apparaît implicitement au travers des actions "*demand liquidities*" sur le schéma. Chacune des populations est décrite avec ses variables principales, notées  $v(0)$ ;  $v(1)$ ..., ce qui permet de représenter la structure conditionnelle (if/ then/ else) des interactions entre agents. L'ordre dans lequel le schéma doit être lu est indiqué dans le tableau 3.4 (en annexe).

---

22. Notre version du modèle n'a pas été construite à partir du code original des auteurs.

Au début de chaque période, l'ordinateur mélange les agents de chaque population. Ensuite, chaque agent entreprise (industrielle ou de service) calcule son prix, ce qui détermine son niveau de compétitivité vis-à-vis de ses concurrents dans la même branche d'activité (biens de capital, biens et services de consommation, services aux entreprises). Tout comme chez Dosi et al., les prix sont déterminés selon la règle de la marge sur coût unitaire, donnée par l'équation 3.7. L'indice de compétitivité des firmes  $i$  et  $g$ , qui produisent respectivement des machines et des KIBS, est donné par l'équation 3.9, tandis qu'il est donné par l'équation 3.10 pour les firmes  $j$  et  $z$ , producteurs de biens de consommation et de services à la consommation.

$$Competitivity_{it} = \left( \frac{a_{it}}{p_{it}} \right)^{\zeta_1} \quad (3.9)$$

$$Competitivity_{jt} = \left( \frac{MS_{jt-1}}{p_{jt}} \right)^{\zeta_2} \quad (3.10)$$

La présence des parts de marché à la période précédente,  $MS_{jt-1}$ , dans l'équation 3.10 reflète notre hypothèse de consommateurs dont les choix sont très influencés par la consommation des autres (voir le chapitre 2 sur la société de consommation). Quant au niveau du salaire, il est exactement égal au niveau de la productivité moyenne dans l'économie<sup>23</sup>, soit  $w_t = \bar{A}_t$ .

Les firmes de KIBS disposent déjà d'une capacité de production en début de période, celle-ci est formée par leurs employés. La règle générale du modèle en matière d'emploi est qu'un travailleur/consommateur n'est embauché par une firme que pour une durée d'une période, mais dans le cas des firmes de KIBS, les travailleurs sont employés plus longtemps car ces firmes investissent régulièrement dans la formation de leur personnel. Ce point sera précisé dans le paragraphe dédié aux KIBS.

---

23. Cette hypothèse ne pénalise pas les capitalistes de notre économie artificielle, d'abord parce que nous verrons que les prêts sont rémunérés par un intérêt, ensuite parce que les firmes sont déjà rémunérées par la présence d'un taux de marge  $\mu$  dans leur règle de tarification. Par ailleurs, cette hypothèse est conforme à celle du modèle de Baumol et Wolff (1983 [14]).

## Les firmes industrielles

Les firmes  $j$ , productrices de biens de consommation, commencent par formuler leurs anticipations de demande pour la période courante  $D_{jt}^e$  suivant le comportement adaptatif décrit par l'équation 3.11 <sup>24</sup>.

$$D_{jt}^e = D_{jt-1}^e + \beta[D_{jt-1} - D_{jt-1}^e] \quad (3.11)$$

$D_{jt-1}$  représente les quantités réellement demandées à la période précédente, et le paramètre  $\beta$  est choisi tel que  $\beta \in [0; 1]$ . Plus ce paramètre approche de sa valeur supérieure, plus la firme  $j$  est réactive face aux erreurs d'anticipation, et donc plus la volatilité de la production agrégée sera importante en retour. À l'inverse, plus  $\beta$  s'approche de 0, plus grande sera l'inertie des anticipations de la firme. La comparaison de  $D_{jt}^e$  avec le niveau des stocks  $S_{jt}$  hérités des périodes précédentes permet à la firme  $j$  de décider s'il est nécessaire ou non de demander un nombre d'heures de travail  $L_{jt}^d$ . Cette demande de travail est déterminée par l'algorithme décrit dans le tableau 3.3.

---

24. Dosi et al. (2006 [43]) testent une grande variété de routines pour la formulation des anticipations de leurs firmes de biens de consommation (anticipations myopes, anticipations autorégressives, anticipations accélératrices, anticipations adaptatives, anticipations micro-macro). Ils constatent que ce choix n'a d'impact que sur la volatilité des variables macroéconomiques (PIB, investissement...).

TABLE 3.3 – Détermination de la demande de travail par les agents  $j$

$$\begin{aligned}
 & \text{if}(D_{jt}^e > S_{jt}) \\
 & \quad K_{need;jt} = [D_{jt}^e - S_{jt}] \\
 & \quad \text{if}(K_{jt} \geq K_{need;jt}) \quad \text{Le nombre de machines est suffisant} \\
 & \quad \quad L_{jt}^d = K_{need;jt}/a_{jt} \\
 & \quad \text{else if}(K_{jt} < K_{need;jt}) \quad \text{Manque de machines} \\
 & \quad \quad L_{jt}^d = K_{jt}/a_{jt} \\
 & \quad \text{else if}(D_{jt}^e < S_{jt}) \\
 & \quad \quad L_{jt}^d = 0
 \end{aligned}$$


---

$K_{need;jt}$  est le nombre de machines nécessaire à la firme  $j$  pour produire la quantité désirée ( $D_{jt}^e - S_{jt}$ ).  $L_{jt}^d$  dépend du nombre de machines  $K_{jt}$  réellement possédées par la firme  $j$ . Si  $K_{jt} < K_{need;jt}$ , alors ce nombre est insuffisant et la firme va chercher à accroître son stock de biens de capital par un investissement de capacité.

La firme  $j$  passe ensuite en revue ses propres machines-outils et décide de remplacer celles qui sont obsolètes en se conformant, pour l'essentiel, à la procédure établie par l'équation 3.8. Dans notre version du modèle, nous modifions la procédure de Dosi et al. à la marge en deux points : (1) la firme  $j$  ne passe en revue qu'une part  $\Theta$  de ses machines, (2) elle ne demande une nouvelle machine que si elle dispose de liquidités suffisantes. Dans le cas contraire, elle essaiera d'emprunter auprès de la banque centrale.

Soit  $L_{jt}^o$ , le nombre d'heures de travail réellement obtenues sur le marché du travail, la production de biens de consommations par la firme  $j$ , biens qu'elle ajoute à ses stocks, est donnée par l'équation 3.12.

$$y_{jt} = a_{jt} \times L_{jt}^o \tag{3.12}$$

Lorsque toutes les firmes de biens de consommation ont passé leurs commandes de biens de capital (pour motif de capacité et/ou de remplacement), chaque fournisseur  $i$  demande un nombre d'heures de travail  $L_{it}^d = D_{it}/a_{it}$  sur le marché du travail.  $D_{it}$  est le nombre total de machines-outils commandées à la firme  $i$  par ses clients. En notant  $L_{it}^o$ , le nombre d'heures de travail réellement obtenues et avec  $a_{it}$ , la productivité du fournisseur de biens de capital, sa production  $y_{it}$  est donnée par l'équation 3.13.

$$y_{it} = a_{it} \times L_{it}^o \quad (3.13)$$

Les machines produites sont livrées à la fin de la période. Ainsi, les nouvelles machines ne seront utilisables par les clients  $j$  qu'à partir du début de la période suivante. Le paiement n'est effectué par les clients qu'au moment de la livraison, afin d'éviter une situation dans laquelle des machines auraient été payées sans être livrées en raison d'un rationnement du marché du travail pour les producteurs  $i$ . À chaque période, les firmes  $i$  investissent une part  $\gamma$  de leurs recettes  $p_{it} \times y_{it}$  en R&D. Soit  $\eta$ , un paramètre d'échelle et  $U(0; 1)$  un tirage aléatoire dans une loi uniforme, une innovation survient lorsque la condition (3.14) est satisfaite.

$$U(0; 1) < 1 - e^{-\eta \times \gamma \times p_{it} \times y_{it}} \quad (3.14)$$

L'innovation peut consister en une technologie plus ou moins efficace par rapport à la technologie existante. Ainsi, si la condition (3.14) est vérifiée, un autre tirage aléatoire  $U(-0.5; 0.5)$  est réalisé. Si le résultat de ce dernier est positif, alors la productivité de la firme  $i$  et celle de la machine-outil qu'elle produit sont augmentées du résultat de ce second tirage. En revanche, si le résultat du tirage est négatif, l'innovation n'est pas retenue et l'ancienne machine continue d'être produite et vendue. Ces innovations incitent les firmes de biens de consommation à remplacer leurs biens de capital existants à la période suivante selon la procédure (3.8).

### **Les firmes de service à la consommation**

Les  $z$  firmes de services à la consommation réalisent leur production en utilisant un seul facteur : le travail. Elles sont aussi totalement stagnantes dans une économie

où le progrès technique ne peut provenir que de l'adoption de machines de plus en plus performantes. Une firme  $z$  commence la période en formulant ses anticipations de demande (équation 3.15) de la même façon que les entreprises de biens finaux. Par analogie, nous notons  $D_{zt}^e$  cette anticipation pour la période courante et  $D_{zt-1}$  les quantités de services réellement demandée à la période  $t - 1$ .

$$D_{zt}^e = D_{zt-1}^e + \beta[D_{zt-1} - D_{zt-1}^e] \quad (3.15)$$

Un service ne pouvant être stocké, la demande de travail  $L_{zt}^d$  est directement donnée par l'équation 3.16.

$$L_{zt}^d = D_{zt}^e / a_{zt} \quad (3.16)$$

$a_{zt}$  est le niveau de productivité du travail de la firme  $z$ . En notant  $L_{zt}^o$  le nombre d'heures de travail obtenues par la firme  $z$  sur le marché du travail, la capacité de production de cette firme est donnée par (3.17).

$$y_{zt} = a_{zt} \times L_{zt}^o \quad (3.17)$$

### Les consommateurs individuels

À ce stade, tous les consommateurs/travailleurs  $c$  qui ne sont toujours pas employés ne trouveront plus de travail avant la période suivante. Le budget  $B_{ct}$  d'un agent  $c$  qui a trouvé un emploi durant la période  $t$  est donné par l'équation 3.18. Celui d'un agent inemployé est juste égal à la somme des budgets résiduels issus des périodes précédentes, soit  $B_{ct} = B_{ct-1}$ .

$$B_{ct} = B_{ct-1} + w_t \quad (3.18)$$

La loi d'Engel est introduite sous la forme d'une variable  $\vartheta_t$  qui détermine la part de son budget qu'un consommateur consacra à la consommation de services. En notant  $\vartheta_{min}$  et  $\vartheta_{max}$  respectivement les valeurs minimum et maximum de cette part,  $\iota$  étant un paramètre d'échelle,  $\vartheta_t$  est donné par l'équation 3.19.

$$\vartheta_t = \vartheta_{min} + \frac{\vartheta_{max} - \vartheta_{min}}{1 + e^{-\iota \times w_t}} \quad (3.19)$$

Après avoir décidé de l'allocation du budget entre consommation de biens et de services, chaque consommateur  $c$  choisit un fournisseur de biens de consommation et un fournisseur de services à la consommation. Ce choix se fait par tirage aléatoire dans une loi uniforme, tirage dans lequel chaque firme appartenant à un même secteur d'activité a une chance d'être choisie par un agent  $c$  proportionnelle à son indice de compétitivité (cf. équation 3.10). Enfin, chaque consommateur essaie d'épuiser son budget (hypothèse de non-satiété).

### Les firmes de KIBS

À ce stade du fonctionnement du modèle à une période  $t$ , toutes les opérations d'achat et de vente de biens, de services et de machines ont été réalisées. Si une firme de l'un des trois secteurs correspondants a réalisé des profits positifs, elle essaie d'en investir une partie en capitaux intangibles en s'adressant à une firme de KIBS. Ce prestataire de service est d'abord choisi de façon totalement aléatoire par une entreprise profitable. Cette dernière compare ensuite son propre niveau de connaissance,  $H_{client,t}$ , avec celui de l'entreprise de KIBS qui a été choisie,  $H_{KIBS,t}$ . Si elle observe un différentiel cognitif à l'avantage du fournisseur de KIBS, alors elle réalise un investissement en intangibles. Plus spécifiquement, si la capacité de production restante de la firme de KIBS est suffisante pour répondre à la demande du client, le produit d'un tirage aléatoire  $U(H_{client,t}; H_{KIBS,t})$  est ajouté au niveau de connaissance du client  $H_{client,t}$ . Cette connaissance supplémentaire peut se traduire par un accroissement de la productivité du client, décidé par un nouveau tirage  $U(-\kappa; \kappa)$ , avec  $\kappa$  un réel positif. Si le résultat de ce tirage est positif, alors il est ajouté à la productivité du client ; dans le cas contraire, l'innovation permise par la connaissance nouvelle n'est pas retenue.

Ce mécanisme traduit la grande incertitude du résultat d'un investissement en actifs intangibles (Nakamura, 2001 [100] ; Baumol et al., 2007 [12]). On notera par ailleurs, comme le soulignent notamment Roberts et al. (2000 [122]), que tous les

secteurs peuvent investir en actifs immatériels en ayant recours aux firmes de KIBS. Ainsi même le secteur stagnant des services à la consommation peut bénéficier d'innovations par ce canal. Cette hypothèse suggère que les KIBS permettent une diffusion beaucoup plus large du progrès technique que le permet l'innovation dans les machines-outils réalisée par les firmes de biens de capital. En effet, les machines-outils ne peuvent être diffusées que dans les secteurs industriels. Petit (2002 [113]) voit ainsi dans la croissance des KIBS la naissance d'une "économie fondée sur la connaissance" (p. 103), dans le sens où ces services élargissent le champ de diffusion des connaissances à tous les agents économiques. Afin de distinguer secteurs progressifs et secteurs stagnants, nous opérons une distinction du paramètre  $\kappa$  selon le secteur. Nous nommons ainsi  $\kappa_{Industrie}$  le paramètre d'impact, en termes de productivité, des KIBS dans l'industrie, et  $\kappa_{Services}$  leur paramètre d'impact dans le secteur des services à la consommation. Cette distinction nous permettra de réaliser (dans le paragraphe 4.3.2) des analyses de sensibilité et de reproduire un scénario de maladie des coûts lorsque  $\kappa_{Services} < \kappa_{Industrie}$ .

La substitution des actifs intangibles au capital matériel dans l'explication de la croissance peut être favorisée par cet impact des KIBS sur la productivité de leurs clients. En effet, si la productivité d'une firme  $j$  est ainsi augmentée, la condition de l'équation 3.8 sera de moins en moins fréquemment satisfaite, ce qui réduira les investissements de remplacement. La complexité de notre système multi-agents rend cependant ce résultat incertain. En effet, les firmes  $i$  qui produisent des machines-outils peuvent également investir en KIBS et bénéficier d'une productivité accrue pour les machines qu'elles produisent, ce qui, au contraire, encourage l'investissement de remplacement.

Afin de rester compétitives, les firmes de KIBS sont engagées dans une course à l'accumulation de connaissances. Cette accumulation est réalisée de deux manières différentes. La première est automatique et non-coûteuse. Il s'agit du "learning by doing" dont bénéficie la firme de KIBS au cours du processus de production. Dans ce premier cas, on considère que le volume de connaissance de la firme de KIBS

est accru du montant d'un tirage  $U(0, 0.25)$ . La seconde manière est délibérée et coûteuse. Elle se traduit par des investissements en formation. Lorsqu'une firme de KIBS possède une part de marché inférieure à la moyenne, c'est qu'elle souffre d'un retard cognitif. Dans ce cas, la firme retardataire compare son niveau de connaissance au niveau maximum de la période précédente  $H_{max,t-1}$ . Si  $(H_{max,t-1} - H)$  ce différentiel est positif alors elle met en œuvre une stratégie de formation des employés pour le réduire totalement. Le coût correspondant est noté  $e^{(H_{max,t-1}-H)}$ . Cet investissement n'est réalisé par la firme que si elle dispose des liquidités nécessaires. Si tel n'est pas le cas, elle peut demander des liquidités à la banque centrale. Le nouveau niveau de connaissance acquis après l'investissement en formation est  $H_{max,t-1}$ .

Ces investissements en formation du personnel impliquent que l'emploi est moins flexible dans le secteur des KIBS que dans les autres secteurs de notre économie artificielle : une firme de KIBS ne décidera d'employer un nouveau travailleur que lorsque la demande pour ses services excède suffisamment ses capacités de production. De la même façon, le licenciement d'un employé ne surviendra que si la demande se révèle suffisamment inférieure à ses capacités de production.

### **Banque centrale et règles d'entrées-sorties**

Chaque agent du modèle dispose d'un compte courant à la banque du modèle. Ce compte ne rapporte aucun intérêt, mais tous les agents peuvent utiliser à leur guise les sommes qui y sont déposées. La banque est unique, ce qui assure qu'elle ne fera jamais faillite : lorsqu'un agent retire son argent, c'est nécessairement pour en payer un autre<sup>25</sup> qui déposera ses nouvelles liquidités dans la même banque.

Les firmes du modèle peuvent demander un prêt dans deux situations : (1) les firmes de biens de consommation et celles de KIBS peuvent demander des liquidités pour financer un investissement, (2) toutes les entreprises peuvent demander un prêt

---

25. On notera l'exception que représentent les dépenses en R&D, qui apparaissent plutôt comme une fuite dans le système. Mais leur montant cumulé est négligeable comparé au niveau du PIB qui se retrouve, de fait, déposé dans les comptes de la Banque Centrale du modèle.

lorsque leurs liquidités deviennent négatives.

En cas de demande de prêt, la banque observe la solvabilité du demandeur en calculant son ratio ( $Dette/Ventes$ ). Si  $(Dette/Ventes) < k$ , avec  $k = 2$ , alors la banque octroie une rallonge de liquidités d'un montant égal à  $(k \times Ventes) - Dettes$ . Ce prêt est à rembourser en  $A$  périodes au taux d'intérêt périodique  $r$ <sup>26</sup>.

En cas de besoin de liquidités, un nouveau prêt peut être contracté par le client si  $(Dette/Ventes) < k$ . En cas de défaut de paiement d'une firme cliente, elle est immédiatement retirée du modèle et remplacée par une nouvelle firme, copie de l'une des survivantes les plus profitables. La banque ne peut pas faire faillite, car sa capacité d'emprunt est équivalente au niveau du PIB nominal de notre économie artificielle.

Ce système financier permet de ralentir le rythme des entrées et sorties d'entreprises du modèle. En ce qui concerne le profil des nouveaux entrants, le stock de capital des nouvelles firmes de biens de consommation est égal à la moyenne du nombre de machines nécessaires aux firmes existantes (afin d'éviter la surcapacité productive des nouveaux entrants). Dans le cas des nouvelles firmes de KIBS, leur niveau de connaissance est égal au maximum de la période précédente.

### **3.4 La dynamique de croissance tertiaire : résultats des simulations**

Comme nous l'avons analysé dans notre première section, la croissance des économies tertiaires est caractérisée, d'une part, par un net accroissement de la contribution des KIBS à l'emploi et, d'autre part, par une substitution progressive des capitaux intangibles aux biens de capital dans l'explication de la croissance. Afin de pallier le déficit de modèles théoriques capables de rendre compte de ces deux

---

<sup>26</sup>. Les valeurs retenues sont  $A = 10$  et  $r = 5\%$ .

caractéristiques, nous avons décidé de tenter de construire un système multi-agents de croissance tertiaire en nous inspirant du modèle à générations de capital proposé par Dosi et al. (2006 [43]; 2008 [44]; 2010 [45]; 2011 [42]). Avant d'étudier en détail le fonctionnement du moteur de croissance tertiaire ainsi élaboré, et d'en aborder dans le chapitre suivant les implications en matière d'environnement, nous proposons d'étudier les propriétés statistiques et la cohérence théorique des dynamiques émergentes qu'il produit.

### 3.4.1 La qualité du modèle

Les résultats présentés dans ce chapitre proviennent tous d'une moyenne de 50 simulations. Chacune de ces simulations est calculée avec un noyau différent pour les tirages aléatoires. Les conditions initiales et les valeurs des paramètres du modèle sont résumés dans le tableau 3.5 (en annexe). Dans cette section, nous analysons les propriétés et la cohérence d'ensemble des dynamiques agrégées produites par un scénario de référence. Ce scénario utilise les valeurs suivantes pour les paramètres influant sur le moteur de croissance :  $\Theta = 0.5$ , la part de leurs machines que les firmes  $j$ <sup>27</sup> évaluent à chaque période en vue d'un remplacement éventuel ;  $\kappa_{Industrie} = 0.5$  et  $\kappa_{Services} = 0.25$ , les paramètres d'impact maximal d'un investissement en intangible respectivement pour les clients industriels ( $i$  et  $j$ ) et tertiaires ( $z$ ). Nous choisissons délibérément  $\kappa_{Industrie} > \kappa_{Services}$  afin de nous placer dans une situation de services plutôt retardataires en matière de productivité.

Le logarithme du PIB et son intervalle de confiance (bornes à 95% chacune) est reproduit sur la figure 3.1. En termes de pertinence statistique, on note la stabilité de l'intervalle de confiance, ce qui signifie qu'aucune série de PIB constitutive de la série moyenne ne diverge radicalement à long terme à cause de l'usage d'un noyau différent pour les tirages aléatoires. La stabilité du modèle est confirmée par l'évolution du taux de chômage (figure 3.2), dont le niveau moyen fluctue autour de 2,5 %

---

27. Pour rappel, les firmes de biens de consommation sont désignées par l'indice  $j$ , celles qui produisent des biens de capital par l'indice  $i$ , les firmes de services à la consommation par l'indice  $z$  et les fournisseurs de KIBS par l'indice  $g$ .

tout en restant compris dans un intervalle de confiance asymptotiquement stable.

La série de PIB révèle la présence de fluctuations autour d'un trend de croissance, lui-même marqué par une rupture lorsque  $t \in [200; 300]$ . On commence par interroger la nature des fluctuations : ont-elles un sens en termes économiques, ou bien s'agit-il juste d'un bruit blanc ? On propose, à l'instar de Dosi et al. (2006 [43] ; 2008 [44] ; 2010 [45] ; 2011 [42]), de vérifier si ces fluctuations peuvent être interprétées en termes de cycles des affaires. Reprenant les travaux fondateurs de Burns et Mitchell (1946 [21]), Stock et Watson (1999 [137]) repèrent le cycle des affaires par deux critères statistiques : une amplitude des fluctuations du PIB comprise entre 8 et 32 trimestres et une co-évolution avec de nombreuses variables agrégées.

FIGURE 3.1 – Logarithme du PIB pour le scénario de référence

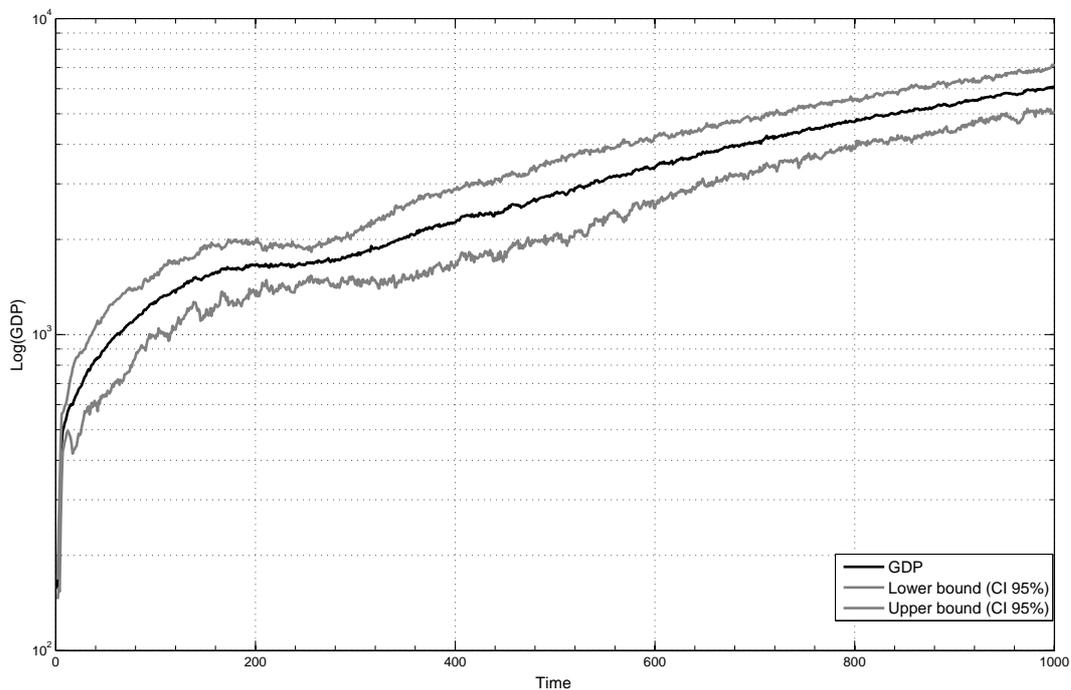
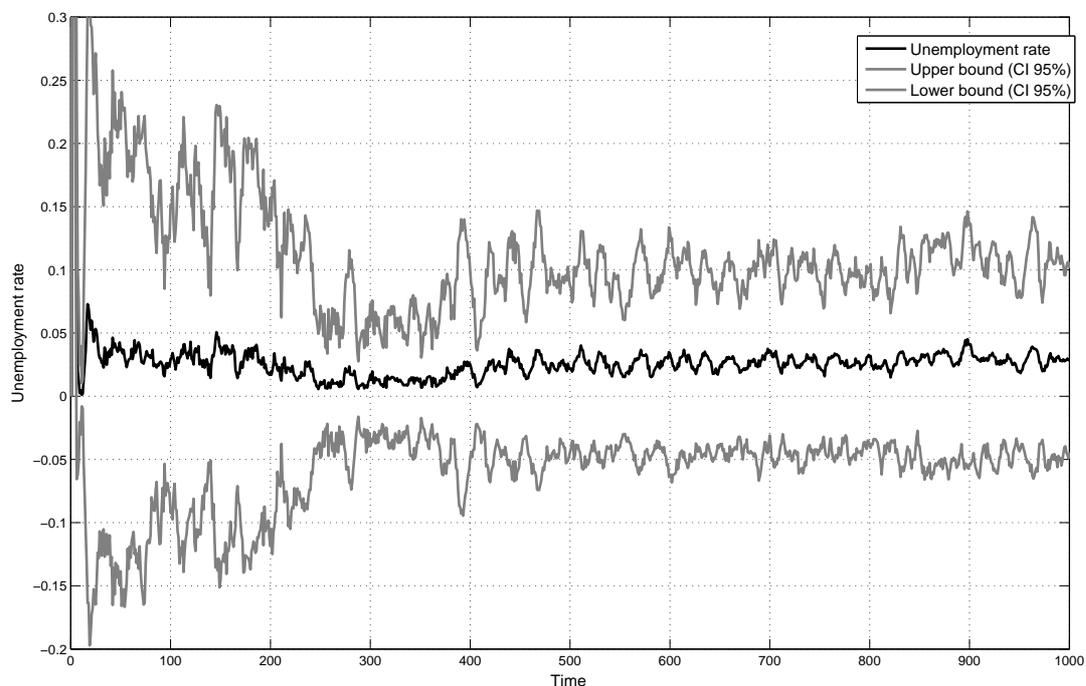


FIGURE 3.2 – Évolution du taux de chômage



Il est d'usage d'utiliser une méthode de filtrage afin d'éliminer des séries statistiques les fluctuations d'amplitudes indésirables : une fluctuation trop courte pouvant être le fruit d'un aléa conjoncturel, tandis qu'une fluctuation trop ample le produit d'un cycle long. Stock et Watson (1999 [137]), et à leur suite Dosi et al. (2006 [43]), utilisent le filtre proposé par Baxter et King (1999 [15]) pour isoler les fluctuations d'amplitude désirée<sup>28</sup>. Afin de faciliter la comparaison avec ces auteurs, nous appliquons ce filtre avec les mêmes valeurs de paramètres aux séries générées par le modèle passées préalablement en logarithme. Cette opération nous conduit à faire l'hypothèse forte qu'une période du modèle correspond à un trimestre réel.

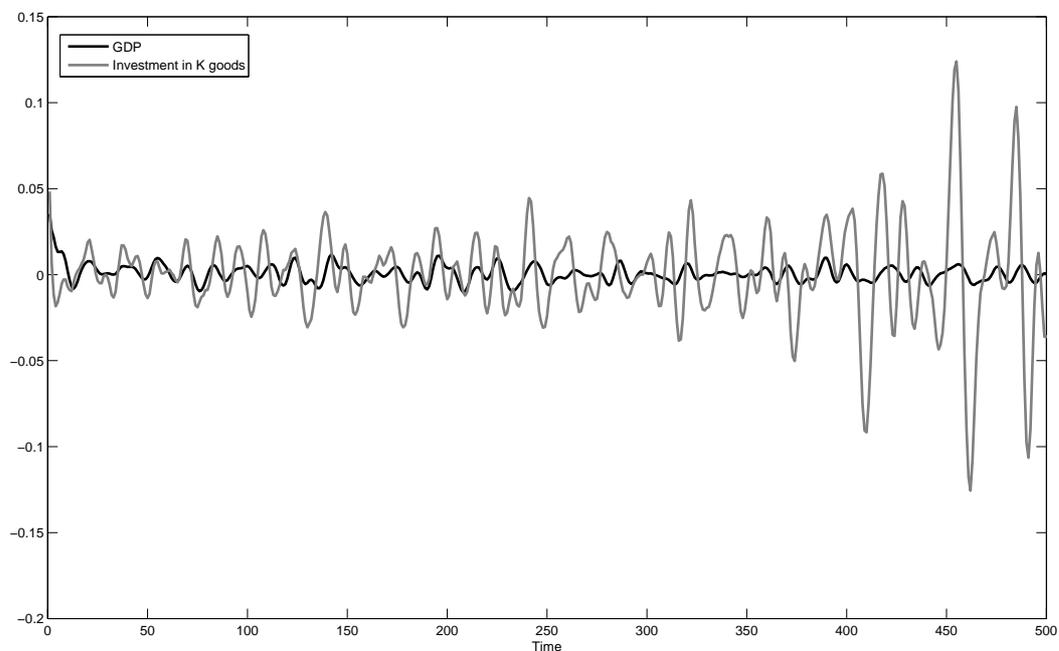
La figure 3.3 superpose les séries filtrées du PIB et de l'investissement en capitaux matériels. On y observe que ces deux séries présentent des fluctuations d'amplitude compatible avec le cycle des affaires. Par ailleurs, l'investissement matériel est caractérisé par des fluctuations apparemment pro-cycliques et plus volatiles que celles

---

28. Les paramètres utilisés pour le filtre sont :  $k = 12$ , *limite basse* = 8, *limite haute* = 32.

du PIB. Il s'agit là de deux faits stylisés bien connus dans les économies réelles.

FIGURE 3.3 – Composantes cycliques du PIB et de l'investissement matériel



Afin de vérifier cette procyclicité de l'investissement matériel et le phénomène de co-mouvement qui caractérise le cycle des affaires, nous calculons les coefficients de corrélation des principales variables agrégées filtrées, y compris le PIB, avec la série du PIB en  $lag = 0$ . Une période de temps du modèle correspondant par hypothèse à un trimestre, nous calculons ces coefficients pour un retard et une avance maximal sur le PIB de 4 périodes, soit un an. La figure 3.4 compare les coefficients de corrélation obtenus avec ceux de l'économie américaine calculés par Stock et Watson pour le PIB, le taux de chômage, l'emploi industriel, l'emploi de services, les investissements en équipements et la consommation de services.

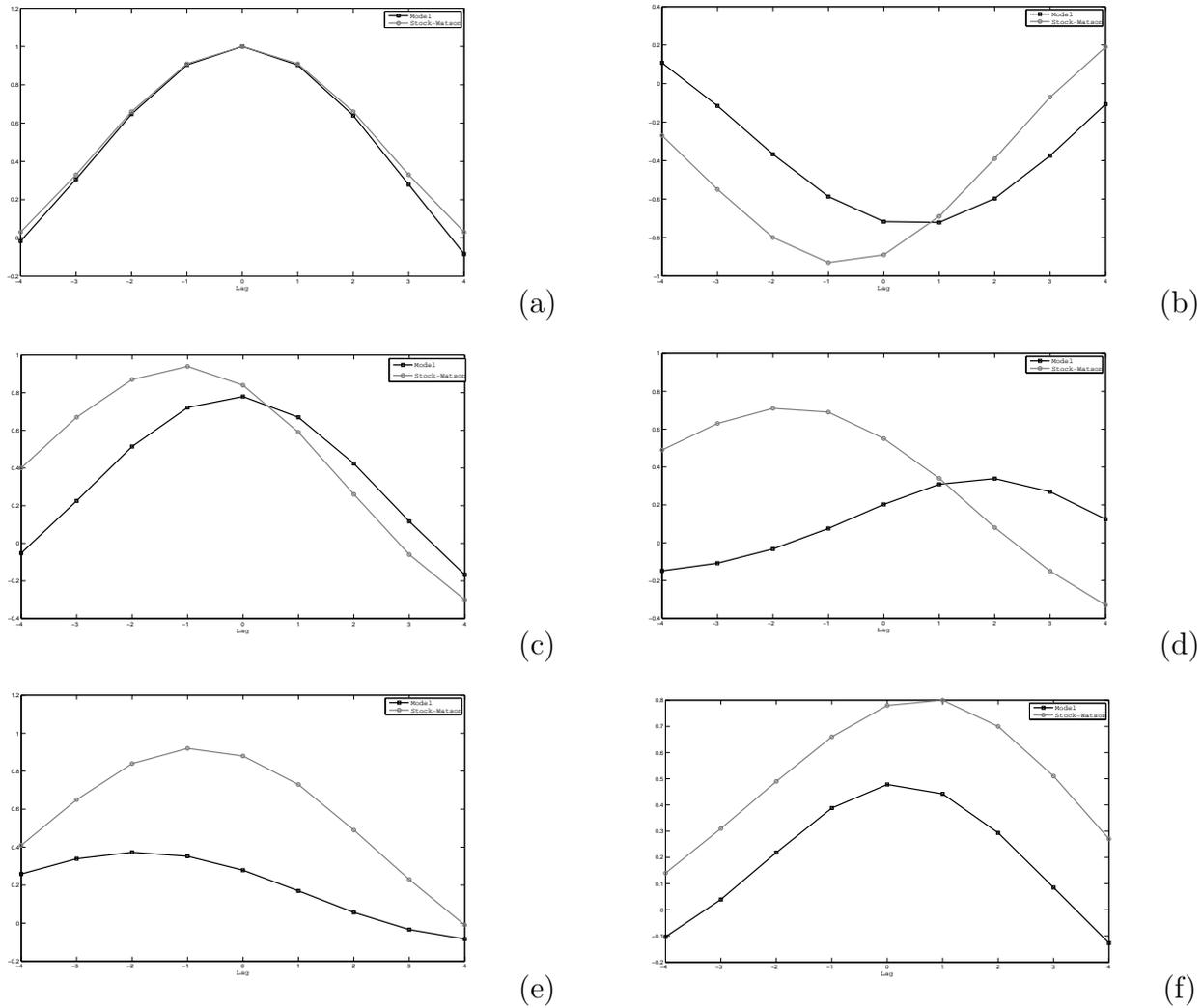
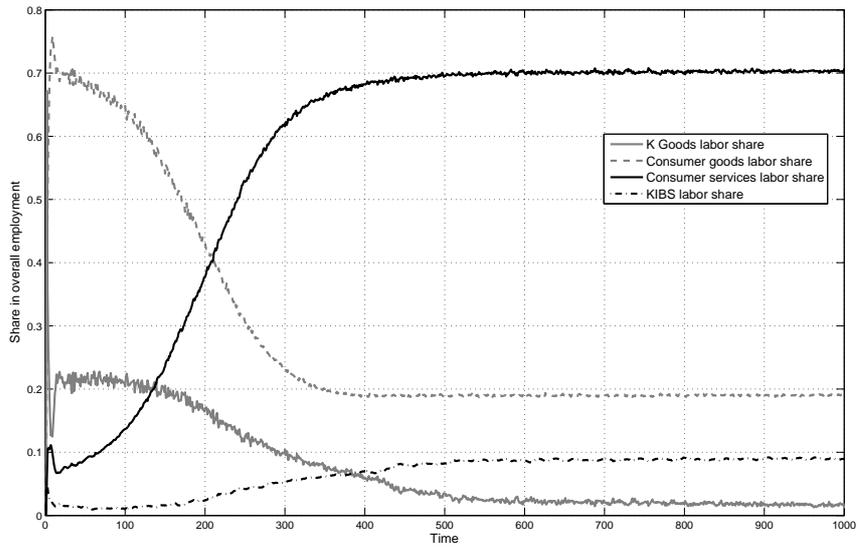


FIGURE 3.4 – Co-mouvement des variables agrégées du modèle avec le PIB ( $lag = 0$ ) et comparaison avec les résultats de Stock et Watson (1999 [137]) pour l'économie américaine. (a) PIB, (b) taux de chômage, (c) emploi industriel, (d) emploi tertiaire, (e) investissements en équipements matériels, (f) consommation de services.

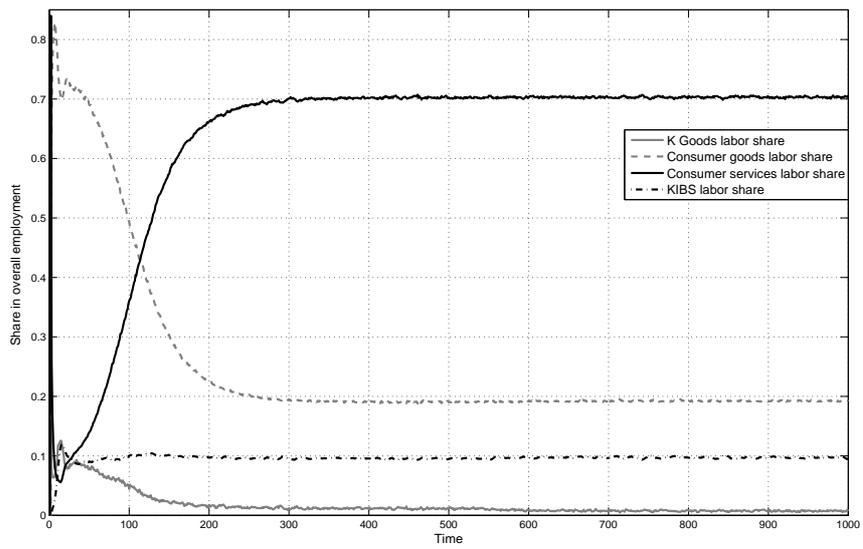
On constate dans la figure 3.4 que le profil des fluctuations du PIB produites par le modèle est très proche de celui du PIB américain. De plus, les variables agrégées manifestent toutes un co-mouvement cohérent avec le PIB. Ainsi toutes les variables étudiées sont pro-cycliques, à l'exception du taux de chômage qui présente un mouvement contra-cyclique satisfaisant. On notera cependant une co-évolution plutôt faible pour l'investissement en équipements, la consommation de services et l'emploi tertiaire, avec même un retard dans le co-mouvement de cette dernière avec

le PIB par rapport à la série correspondante de Stock et Watson. Ces différences ne sont pas nécessairement problématiques dans la mesure où notre modèle ne peut prétendre capter toute la complexité d'une économie réelle, qui comprend beaucoup plus de secteurs, dispose d'un système financier très élaboré et réalise de nombreux échanges avec l'extérieur. Néanmoins, cet exercice nous permet de considérer que les fluctuations conjoncturelles des variables agrégées du modèle peuvent être interprétées comme des cycles d'affaires.

Les grandes tendances décrites par les variables agrégées du modèle sont-elles cohérentes d'un point de vue économique? On peut répondre par l'affirmative à cette question. En effet, on constate dans la figure 3.1 un trend de croissance du PIB marqué par un fort ralentissement pour  $t \in [200; 300]$ . Comme l'illustre la figure 3.5 dans sa partie (a), cet intervalle correspond à une période de tertiarisation très rapide : l'emploi glisse des secteurs industriels progressifs vers le secteur stagnant des services à la consommations. Durant cette période, l'emploi dans les KIBS croît rapidement, mais sans être suffisant pour contrebalancer l'effet négatif sur la croissance de la raréfaction des emplois progressifs. Nous sommes donc face à la situation de stagnation asymptotique prédite par les modèles de Baumol (1967 [7]) et de Baumol et Wolff (1983 [14]). La figure 3.6 confirme l'improductivité des services à la consommation à cette période. Le rythme de croissance de la productivité de ces derniers ne rattrape en effet celui des secteurs industriels qu'à partir de la période 500 environ. Une observation précise de la figure 3.6 révèle cependant que cette croissance de la productivité dans les services de consommation demeure légèrement inférieure à celle des secteurs industriels. Il s'agit d'une conséquence de notre hypothèse selon laquelle  $\kappa_{Industrie} > \kappa_{Services}$ , avec  $\kappa_{Industrie}$  et  $\kappa_{Services}$ , respectivement les paramètres d'impact des KIBS sur la productivité des clients industriels et tertiaires.



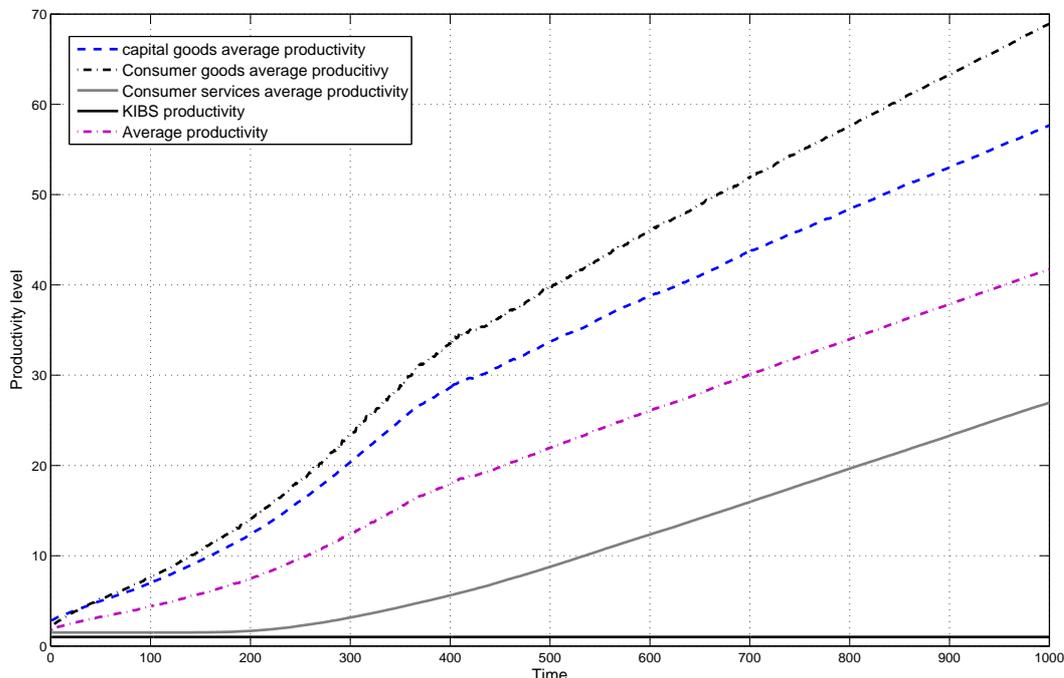
(a)



(b)

FIGURE 3.5 – Processus général de tertiarisation des emplois (a) avec  $\Theta = 0.5$ , (b) avec  $\Theta = 0.1$

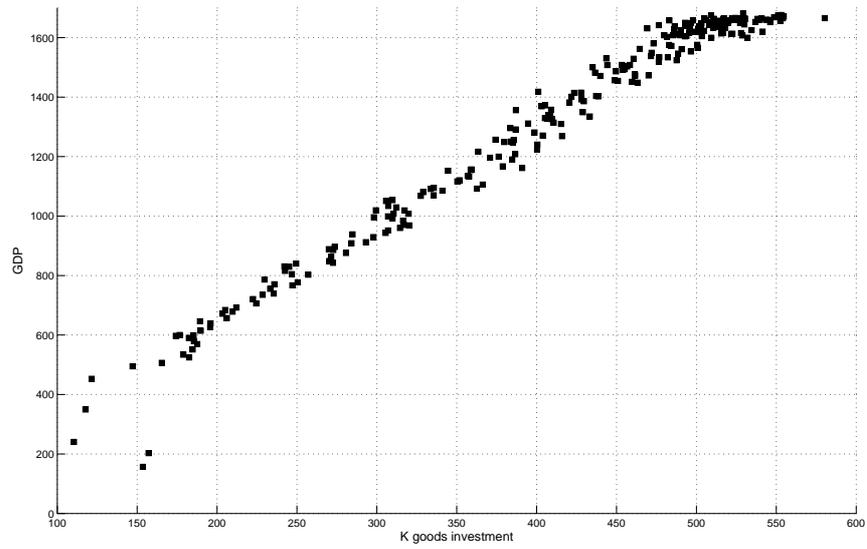
FIGURE 3.6 – Évolution des niveaux sectoriels de productivité.



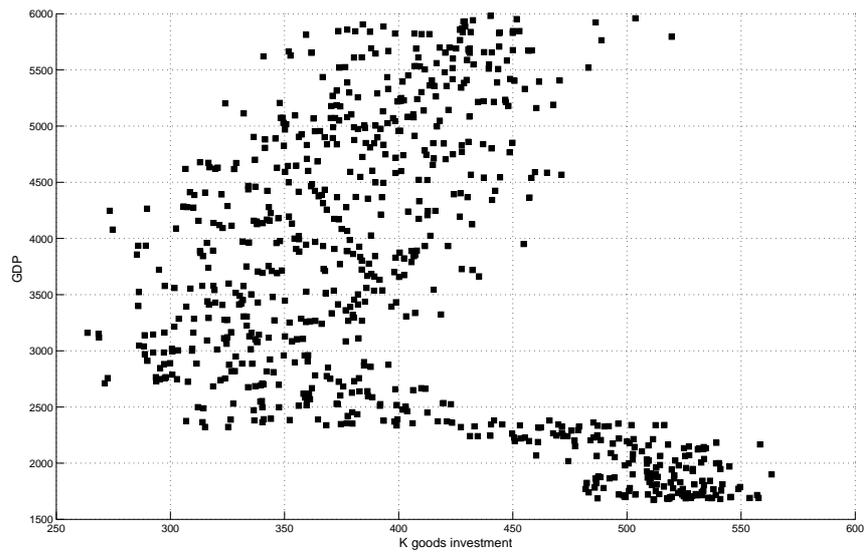
Nous avons souligné dans la section 2.2.4 que l'influence des investissements en intangibles sur l'accumulation du capital matériel était a priori indéterminée. En effet, d'une part l'investissement des firmes de biens de consommation en intangibles réduit leurs incitations à remplacer les machines existantes, tandis que d'autre part, l'investissement en intangibles réalisé par les firmes de biens de capital stimule cette incitation. Cette observation souligne le lien qui existe, dans notre modèle, entre les niveaux d'emplois dans les deux secteurs intermédiaires (les producteurs de machines-outils et les producteurs de KIBS) et l'investissement de remplacement des firmes de biens finaux. Cette intuition est vérifiée par la différence entre les dynamiques de changement structurel des parties (a) et (b) de la figure 3.5. Dans la partie (b), lorsque  $\Theta = 0.1$ , les firmes de biens de consommation sont trop peu sensibles à une hausse de la productivité des machines, et donc leurs investissements en KIBS leur donnent immédiatement de fortes incitations à substituer les capitaux intangibles aux capitaux matériels. Ainsi, plus l'investissement de remplacement est faible, plus la croissance de l'emploi dans les KIBS est rapide. Ce rôle crucial du pa-

ramètre  $\Theta$  sur le rythme de croissance du secteur des KIBS révèle que le processus de tertiarisation de notre économie artificielle repose fortement sur les comportements d'investissement des firmes industrielles.

Pour  $t > 300$ , le PIB entre dans une sorte de sentier de croissance stable (figure 3.1). La figure 3.6 montre que cette période est marquée par une rupture du trend de croissance de la productivité dans les secteurs industriels, tandis que la productivité des services à la consommation commence à croître à un rythme soutenu. Cette rupture s'explique par la substitution de l'accumulation des capitaux intangibles à l'accumulation des capitaux matériels dans l'explication de la croissance. Elle est illustrée par la figure 3.7, qui décompose la relation entre investissements en capitaux matériels et PIB en deux sous-périodes :  $t \leq 250$  et  $t > 250$ . Dans la première période, la relation est clairement positive et linéaire. La seconde période est plus complexe. On y observe deux nuages de points, l'un sur la partie basse et droite de la figure, et l'autre sur la partie haute et gauche. Ces deux nuages ne permettent pas d'esquisser de réelle relation entre le niveau du PIB et l'investissement en capitaux matériels, mais ils sont reliés par une période de transition où le niveau du PIB est négativement corrélé à celui de l'investissement matériel. Le premier nuage (bas-droite) et cette transition correspondent à la période  $t \in [250; 400]$ , lorsque le secteur des KIBS commence à se substituer à celui des machines-outils dans l'emploi. Tandis qu'il n'y a plus de relation claire entre les niveaux de PIB et d'investissement matériel après cette transition, la figure 3.9 révèle une corrélation positive très nette entre le niveau du PIB et le niveau de connaissance moyen dans le modèle pour les niveaux correspondants du PIB ( $PIB > 2500$ ). Le lien entre niveau des connaissances et innovation dans le modèle nous permet de dire que la croissance s'explique principalement par l'accumulation d'intangibles lorsque  $t > 400$ .



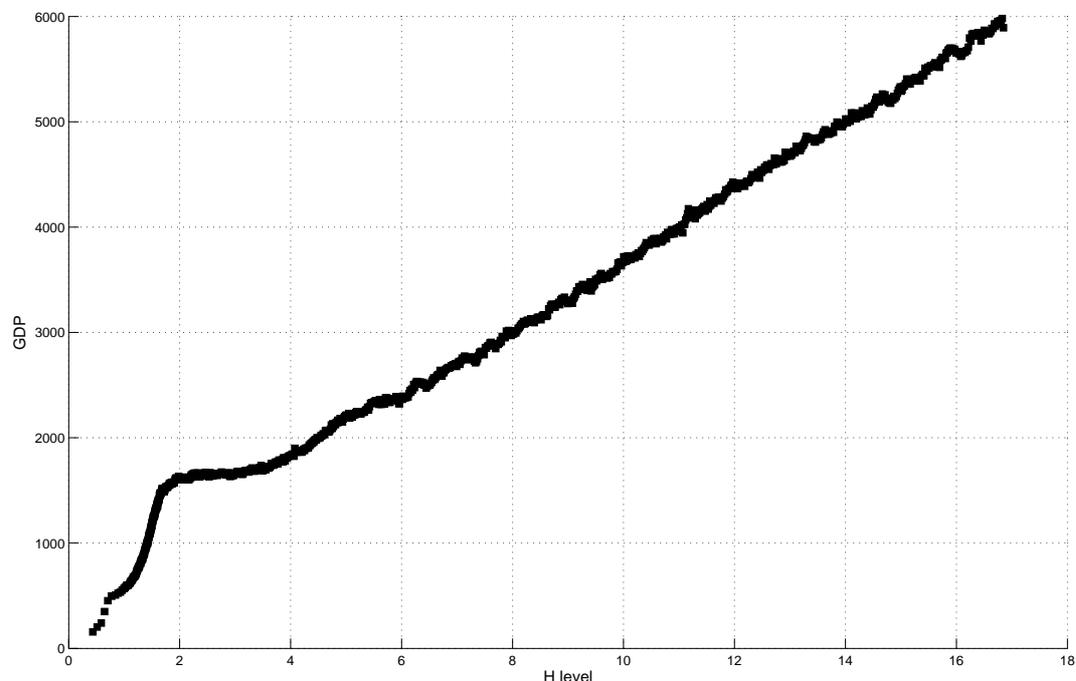
(a)



(b)

FIGURE 3.7 – Investissements en capitaux matériels et niveau du PIB réel, (a) pour  $t \in [0; 250]$ , (b) pour  $t \in [251; 1000]$

FIGURE 3.8 – Relation entre le niveau moyen de connaissances,  $H$ , et celui du PIB réel



Notre objectif dans cette section était double : évaluer la pertinence statistique des variables agrégées du modèle et en vérifier la cohérence en termes économiques. Ces variables se sont révélées robustes au changement de noyau pour les tirages aléatoires, leurs fluctuations conjoncturelles peuvent être interprétées en termes de cycles des affaires, et le modèle s'est révélé capable de reproduire un processus de tertiarisation compatible avec les faits stylisés de croissance de l'emploi dans les services aux entreprises et de montée en puissance du pouvoir explicatif des intangibles dans la croissance du PIB. En l'absence des KIBS, le PIB du modèle se révèle asymptotiquement stagnant (cf. figure 3.1 pour  $t \in [200 ; 300]$ ). Ce résultat est cohérent avec la littérature sur les intangibles qui considère que ces derniers sont un moteur de croissance essentiel dans les économies tertiaires (Corrado et al., 2009 [28]; Nakamura, 2001 [100]).

La tertiarisation obtenue dans le modèle apparaît très dépendante de l'industrie. On se demande néanmoins si, pendant le processus de tertiarisation, les services

finaux ne deviennent pas, grâce aux KIBS, un moteur plus important que l'industrie.

### 3.4.2 Vers l'émergence d'un moteur de croissance tertiaire

Pour répondre à la question du rôle des services dans la croissance, nous réalisons, pour différentes périodes, une analyse de la sensibilité du PIB et du niveau de l'emploi dans les services à différentes valeurs des paramètres  $\kappa_{Industrie}$  et  $\kappa_{Services}$ <sup>29</sup>. Si une variation de  $\kappa_{Services}$  a plus d'impact sur ces variables qu'une variation de  $\kappa_{Industrie}$ , alors on peut dire que le nouveau moteur de croissance du modèle (l'accumulation des intangibles) est principalement localisé dans les secteurs de services.

Une analyse de sensibilité permet également de tester la robustesse du modèle en observant si les valeurs du PIB et de l'emploi tertiaire se comportent de façon erratiques ou non face aux changements de valeurs des paramètres les plus importants du modèle.

Les intervalles considérés sont  $\kappa_{Industrie} \in [0.1, 0.5]$  et  $\kappa_{Services} \in [0.1, 0.5]$ . Ces intervalles sont séquencés en 10 valeurs. Les 100 combinaisons possibles ont toutes été calculées 50 fois. Les résultats présentés dans cette section sont les moyennes de ces simulations. Les périodes retenues sont  $t = 100$ ,  $t = 250$  et  $t = 1000$ . Elles correspondent respectivement aux époques industrielle, de tertiarisation et tertiaire de notre économie artificielle.

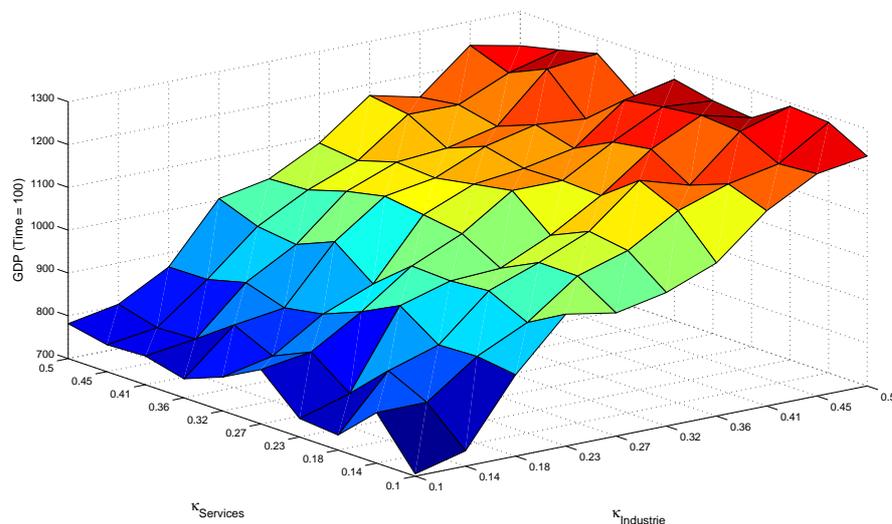
#### Résultats pour $t = 100$

Ces résultats sont illustrés par la figure 3.9. En premier lieu, on observe un impact positif très clair d'une augmentation de la valeur du paramètre  $\kappa_{Industrie}$  sur le PIB et l'emploi tertiaire, quelque soit la valeur de  $\kappa_{Services}$ . Ce dernier semble quant à lui sans effet. Nous pouvons dès lors conclure que les KIBS sont déjà un facteur de croissance et de tertiarisation des emplois dans la phase industrielle du modèle, mais seulement via leur effet sur l'industrie. À aucun moment, l'impact positif des KIBS

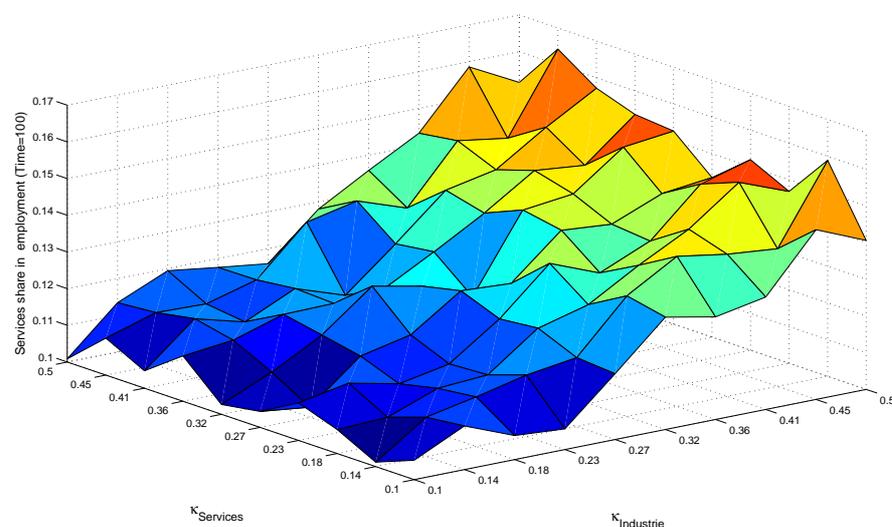
---

<sup>29</sup>.  $\kappa_{Industrie}$  et  $\kappa_{Services}$  sont respectivement les paramètres d'impact des KIBS sur la productivité des clients industriels et tertiaires.

sur la productivité des firmes de services n'agit significativement sur la croissance. En effet, à cette période, l'emploi tertiaire est trop faible pour qu'une hausse de la productivité dans les services puisse agir sur le niveau du PIB.



(a)



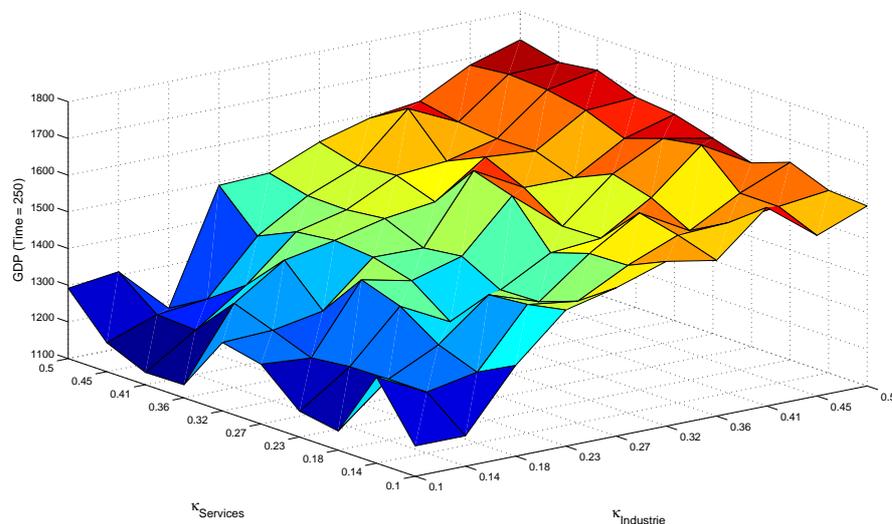
(b)

FIGURE 3.9 – Impact de  $\kappa_{Industrie}$  et de  $\kappa_{Services}$  pour  $t = 100$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi

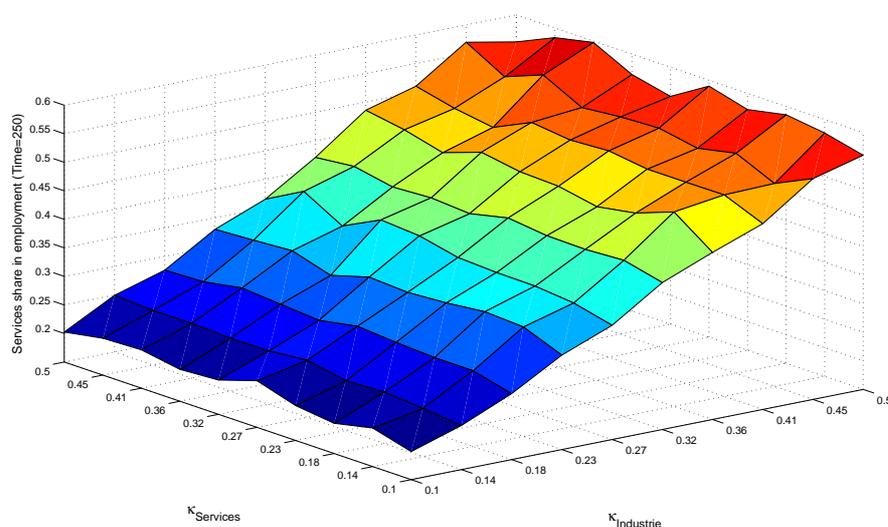
### Résultats pour $t = 250$

À cette période, l'emploi se déverse rapidement dans les secteurs de services. Nous observons toujours (figure 3.10) une relation positive entre  $\kappa_{Industrie}$  et le niveau du PIB, mais aussi une relation légèrement positive de  $\kappa_{Services}$  lorsque  $\kappa_{Industrie}$  est très

élevé (0.45 et 0.5), c'est-à-dire quand la part des services dans l'emploi atteint 60 % (partie (b) de la figure). Mais cette influence de  $\kappa_{Services}$  sur la croissance n'est pas suffisante pour affecter le niveau de l'emploi tertiaire.



(a)



(b)

FIGURE 3.10 – Impact de  $\kappa_{Industrie}$  et de  $\kappa_{Services}$  pour  $t = 250$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi

### Résultats pour $t = 1000$

Le processus de tertiarisation est terminé (figure 3.11 (b)) puisque les services représentent près de 80 % des emplois pour la plupart des combinaisons de  $\kappa_{Industrie}$  et de  $\kappa_{Services}$ . Cette importance des activités de services implique que, désormais,

$\kappa_{Services}$  a la plus grande influence sur le niveau du PIB. La croissance produite par le modèle dans sa phase tertiaire est donc prioritairement issue des activités de services. Nous avons déjà souligné dans la section précédente (3.4.1) le rôle dominant de l'accumulation des intangibles. Nous savons désormais que c'est l'impact de ces intangibles sur les activités de services qui est le premier facteur explicatif de la croissance, et qu'il surpasse l'impact (qui demeure positif) de ces intangibles sur les firmes industrielles.

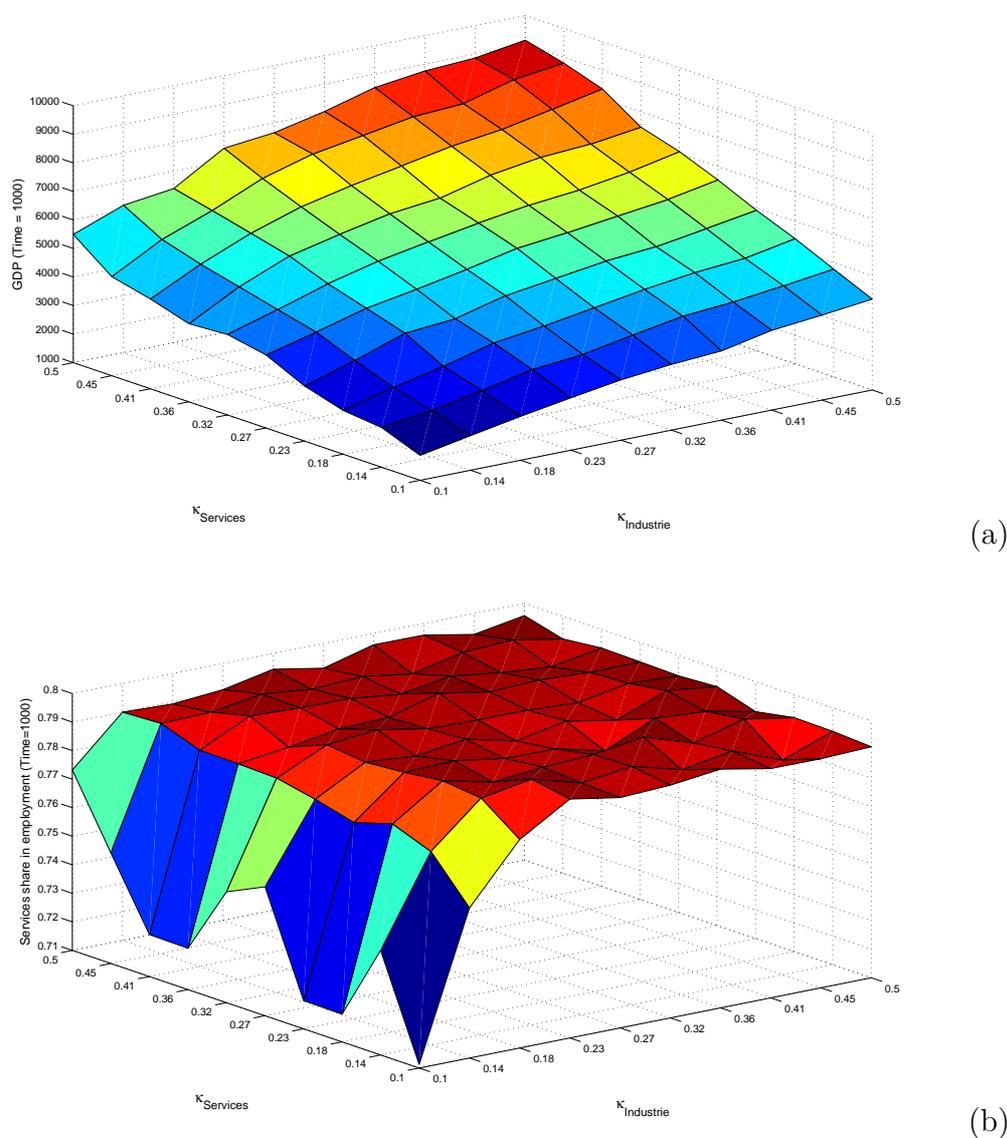


FIGURE 3.11 – Impact de  $\kappa_{Industrie}$  et de  $\kappa_{Services}$  pour  $t = 1000$ , (a) sur le niveau du PIB, (b) sur la part des services (KIBS et services de consommation) dans l'emploi

Nous apportons ici une précision supplémentaire à l'analyse effectuée dans la section 3.4.1 en montrant qu'au fil du processus de croissance, le canal par lequel les KIBS influencent le niveau du PIB se déplace de l'industrie vers les services. Nous pouvons aussi dire que les KIBS agissent sur le processus de tertiarisation, mais seulement par leur influence sur la productivité des firmes industrielles. Ainsi ce processus semble toujours particulièrement dépendant de l'industrie, même si les services finissent par jouer un plus grand rôle que l'industrie dans la croissance.

### 3.5 Conclusion

L'idée pessimiste selon laquelle la croissance des économies tertiaires est nécessairement a-écologique repose sur l'hypothèse d'improductivité des activités de service. Cette hypothèse entraîne en effet une croissance exponentielle du prix des services - la "maladie des coûts" -, empêchant toute croissance quantitative du secteur tertiaire, et finalement de l'économie, à long terme. Dans un tel cadre, le seul moyen pour les entreprises industrielles de continuer de croître est d'adopter des stratégies d'obsolescence planifiée (développement de la dimension esthétique des produits, réduction graduelle de leur durée de vie...) afin de susciter chez les consommateurs une accélération croissante du rythme de remplacement des biens.

Dans le présent chapitre, nous avons considéré la pertinence de cette hypothèse de services improductifs. Nous avons ainsi constaté qu'elle repose sur des indicateurs d'innovation (dépenses de R&D en sciences et techniques, croissance de la productivité du travail et dépôts de brevets) inadaptés au caractère intangible de la production tertiaire. Un indice de cette inadaptation est qu'ils conduisent au constat paradoxal d'un monde réel en croissance et de statistiques indiquant au contraire une croissance particulièrement faible. Ainsi Solow (1987 [132]) observe une large diffusion des TIC dans l'économie, sans que celle-ci se traduise par une croissance de la productivité globale des facteurs.

Un certain nombre d'auteurs (Prescott, 1998 [115]; Nakamura, 1997 [99], 2001

[100]; Corrado et al., 2009 [28]) ont récemment proposé une nouvelle interprétation du "paradoxe de Solow". Il pourrait ainsi s'expliquer par le fait que les comptabilités nationales appréhendent diverses formes de capitaux relativement nouvelles et intangibles (TIC jusqu'aux années 2000, dépenses de formation du personnel, dépenses de marketing...) comme des consommations intermédiaires plutôt que comme une forme d'investissement. Par définition, une consommation intermédiaire n'est pas accumuleable (elle disparaît une fois consommée) et elle est déjà incluse dans l'évaluation des facteurs traditionnels de la croissance (travail, capital et progrès technique mesuré par le résidu de Solow). Ainsi, considérer ces actifs immatériels comme des consommations intermédiaires revient à les exclure des statistiques de la croissance. À l'inverse, leur prise en compte comme des capitaux accumulables permet de réhausser les évaluations de la croissance, qui deviennent dès lors plus cohérentes avec les observations de diffusion du progrès technique.

Cet effet positif des capitaux intangibles sur la croissance remet en cause l'hypothèse des services improductifs, d'abord parce qu'un certain nombre de secteurs de services apparaissent particulièrement actifs dans l'accumulation de ces capitaux intangibles (banque, assurance, grande distribution, éducation<sup>30</sup>), ensuite parce que les services aux entreprises intensifs en connaissances<sup>31</sup> (KIBS) jouent un rôle fondamental dans leur production et dans leur diffusion.

Afin d'étudier les implications, pour la relation croissance-environnement, de cette nouvelle conception des services comme des activités productives, nous avons conçu un modèle multi-agents de croissance tertiaire. Ce modèle est capable de simuler la croissance d'une économie industrielle que celle d'une économie de services, ainsi que les phases de tertiarisation des emplois et du moteur de croissance de l'économie. Il parvient également à reproduire un certain nombre de faits stylisés conjoncturels, comme des cycles d'affaires et un investissement matériel pro-cyclique. Nous proposons de l'utiliser, dans le chapitre 4, pour réexaminer la question du

---

30. cf. Wolff (2002 [153]).

31. Il s'agit notamment des services de conseil, informatiques, de formation du personnel...).

découplage croissance-pollution.

FIGURE 3.12 – Fonctionnement général du modèle

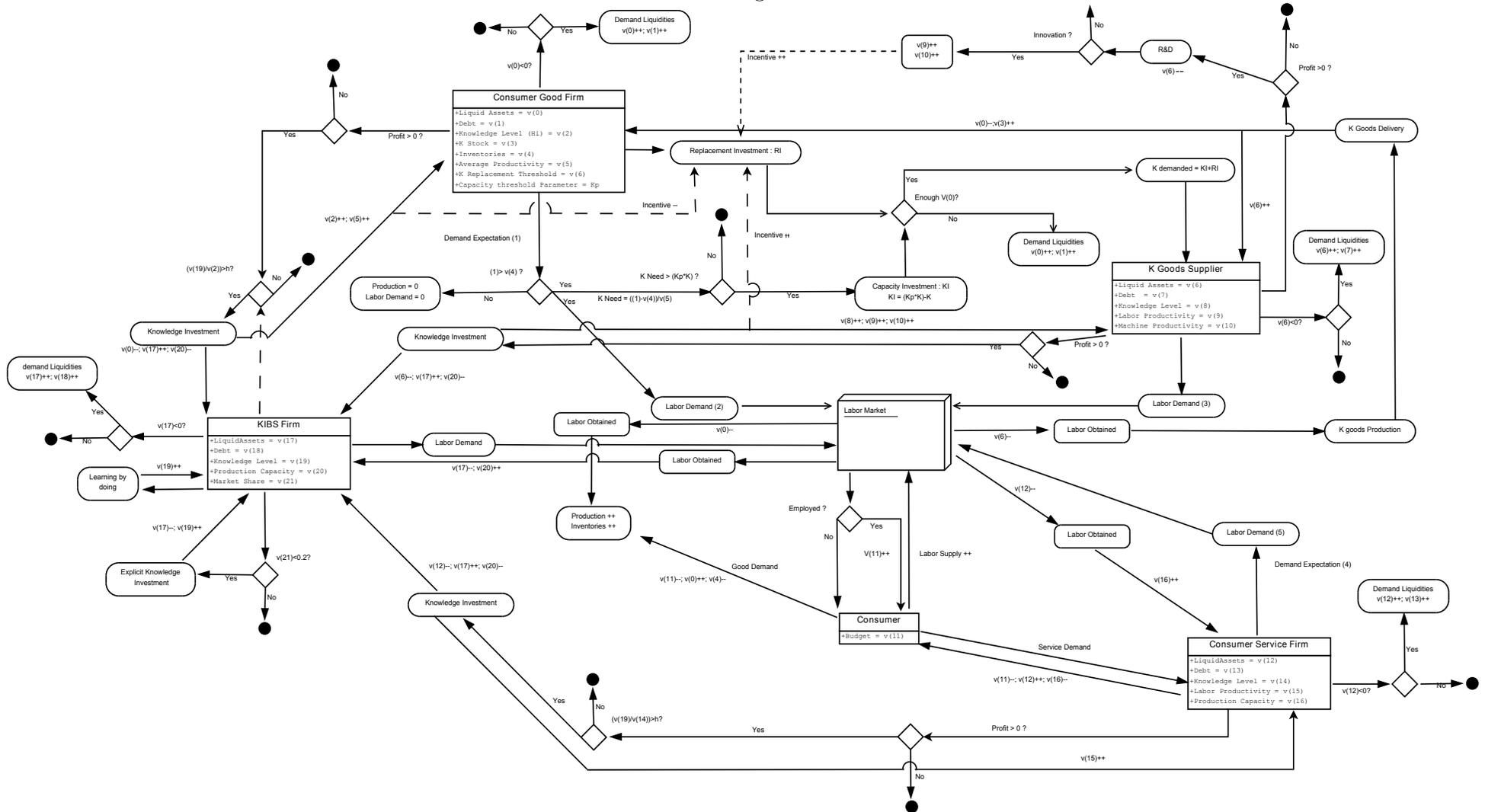


TABLE 3.4 – Cycle général du système multi-agents

Main Cycle
<p><i>Mix the agents inside each category</i></p> <p><i>Determine the capacity of production of KIBS firms</i></p> <p><i>Compute the average level of productivity within the economy</i></p> <p><i>Determine the level of wage</i></p>
<p><b>Consumer-goods Firms <math>j</math> :</b></p> <p>Demand Expectation</p> <p>Labor Demand</p> <p>Capacity Investment</p> <p>Replacement Investment</p> <p>Production and inventories formation</p>
<p><b>Consumer-service Firms <math>z</math> :</b></p> <p>Demand Expectation</p> <p>Labor Demand</p> <p>Production Capacity</p>
<p><b>K goods Suppliers <math>i</math> :</b></p> <p>Labor Demand</p> <p>K Goods Production</p> <p>K Goods Delivery</p>
<p><i>Compute Level and rate of unemployment</i></p>
<p><b>Consumers <math>c</math> :</b></p> <p>Choose and buy consumer-goods</p> <p>Choose and buy consumer-services</p>
<p><i>Compute market shares and profits</i></p>
<p><b>K Goods Suppliers :</b></p> <p>Innovation ?</p>
<p><i>Each firm try to invest in KIBS, if Profit &gt; 0</i></p>
<p><b>KIBS Firms :</b></p> <p>Compute Market Share and Profits</p> <p>learning by doing)</p> <p>Explicit Knowledge Investment</p>
<p><i>Compute meso and macro indicators</i></p> <p><i>Entry and exits of firms</i></p>

TABLE 3.5 – Conditions initiales et valeur des paramètres du modèle

Paramètre	Description	Valeur
$\mu$	Marge unitaire	0.3
$b$	Seuil pour l'investissement de remplacement	8
$\zeta_1$	Puissance de l'indice de compétitivité des firmes de secteurs intermédiaires	1
$\zeta_2$	Puissance de l'indice de compétitivité des firmes de secteurs finaux	1
$\beta$	Réactivité des anticipations de demande	0.5
$\eta$	Paramètre d'échelle dans l'innovation des firmes $i$	0.01
$\gamma$	Part de leurs ventes investies par les firmes $i$ en R&D	0.5
$\vartheta_{min}$	Part minimum du budget des consommateurs consacrée aux services	0.1
$\vartheta_{min}$	Part maximum du budget des consommateurs consacrée aux services	0.8
$\iota$	Paramètre d'échelle utilisé dans la loi d'Engel (voir l'équation 3.19)	0.5
$k$	Niveau maximum du ratio <i>Dettes/Ventes</i>	2
$A$	Durée d'un prêt (nombre de périodes)	10
$\kappa$	Impact maximum d'un investissement en intangibles sur la productivité d'une firme industrielles	0.5
$\kappa_{Services}$	Impact maximum d'un investissement en intangibles sur la productivité d'une firme de services $z$	0.25
$\Theta$	Part de leur stock de machines que les firmes $j$ considèrent dans leurs décisions de remplacement	0.5
$\sum i$	Nombre d'agents producteurs de machines	5
$\sum j$	Nombre d'agents producteurs de biens de consommation	10
$\sum g$	Nombre d'agents producteurs de KIBS	5
$\sum z$	Nombre d'agents producteurs de services de consommation	10
$\sum c$	Nombre d'agents consommateurs/ travailleurs	200

# Chapitre 4

## Les opportunités de découplage dans une économie de services progressive

### 4.1 Introduction <sup>1</sup>

Nous avons construit dans le chapitre précédent un système multi-agents de croissance tertiaire. Il s'agit désormais de l'utiliser pour répondre à la question qui ressort du chapitre 2 : les objectifs de croissance et de dé-pollution sont-ils compatibles dans une économie tertiaire ? Une première analyse réalisée dans un cadre dichotomique, c'est-à-dire dans lequel seules les activités industrielles connaissent des gains de productivité, nous a conduit à répondre négativement à cette question. Le modèle que nous avons élaboré dans le chapitre 2 a en effet permis de souligner l'importance pour la croissance des stratégies d'obsolescence planifiées pratiquées dans l'industrie dans le cadre d'une économie industrielle où la croissance est tirée par les secteurs de biens durables. De même, le modèle de croissance industrielle de Dosi et al. (2006 [43]) met en évidence le rôle fondamental des investissements de remplacement, et

---

1. Certains résultats de ce chapitre ont été publiés dans : B. Desmarchelier, F. Gallouj (2012), "Endogenous growth and environmental policy : are the processes of growth and tertiarization in developed economies reversible ? An evolutionary perspective", *Journal of Evolutionary Economics*, à paraître.

donc de la mise au rebut de machines-outils, pour générer de la croissance. Pour autant, les observations de dématérialisation progressive des sources de la croissance, faites notamment par Abramovitz (1993 [1]) et Corrado et al. (2009 [28]), nous incitent à revenir sur cette question du découplage : si les sources de la croissance sont de moins en moins matérielles, peut-on envisager un renoncement aux sources matérielles les plus polluantes sans pour autant entrer en décroissance ?

L'arbitrage entre les objectifs de croissance et d'environnement est souvent représenté par l'identité IPAT (Speth, 2008 [133]) (équation 4.1).

$$I = P.A.T. \quad \Leftrightarrow \quad I = P \times \frac{Y}{P} \times \frac{I}{Y} \quad (4.1)$$

Avec  $I$  le niveau de pollution,  $P$  celui de la population,  $A = \frac{Y}{P}$  le revenu par habitant et  $T = \frac{I}{Y}$  l'intensité environnementale. D'après l'identité, la croissance du niveau de vie ne s'accompagne pas forcément d'une pollution supplémentaire, à condition que cette croissance soit compensée par un rythme au moins équivalent de progrès technique favorable à l'environnement. Certaines observations des chapitres 1 et 2 indiquent clairement que le progrès technique n'est pas suffisant pour permettre une croissance économique sans progression du niveau de pollution. Ayres et al. (2004 [4]) montrent ainsi qu'en raison d'une forte croissance de la consommation de biens, le progrès technique n'a pas permis de réduire la masse (en millions de tonnes) de la production américaine sur la période 1930 – 1998. De même, De Bruyn et al. (1998 [30]) montrent que le taux de croissance annuel du PIB à partir duquel la pollution progresse peut être particulièrement faible, de l'ordre de 0.3 % aux États-Unis pour les émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui suggère un rythme de réduction de l'intensité environnementale (l'indice  $\frac{I}{Y}$  de l'équation IPAT) particulièrement faible pour le CO<sub>2</sub> aux États-Unis.

De telles observations conduisent certains auteurs à suggérer la décroissance comme solution à la pollution (Speth, 2008 [133]). Dans un ensemble de travaux

récents, Gadrey (2008 [59] ; 2010 [60]) envisage également la possibilité d'une décroissance associée à un déclin de l'emploi tertiaire. Gadrey (2008 [59] ; 2010 [60]) établit ces conclusions en ajoutant au modèle dichotomique de Baumol (1967 [7]) l'hypothèse d'une relation inverse entre la productivité environnementale<sup>2</sup> et la productivité du travail<sup>3</sup>. Pour Gadrey, la substitution du capital ( $K$ ) au travail ( $L$ ) dans la fonction de production de l'entreprise industrielle,  $Y = F(K, L)$ , assure à la firme industrielle une forte croissance de sa productivité du travail, et alimente donc ses externalités environnementales. D'après l'auteur, la taxation des externalités  $I$  leur confère un statut d'input dans la fonction de production de l'entreprise, qui devient  $Y = F(K, L, I)$ . La firme va donc désormais devoir arbitrer entre l'économie des ressources en travail ou en nature. Si le montant de l'éco-taxe est suffisamment dissuasif, il pourra devenir avantageux de substituer cette fois  $L$  à  $K$  afin de limiter l'usage du facteur  $I$ . La demande de travail des firmes industrielles pourrait donc augmenter de nouveau, à la condition qu'une main d'œuvre suffisante soit disponible. Selon Gadrey, celle-ci viendra des secteurs de services. En effet, comme nous l'avons souligné dans le chapitre 1, les services sont des activités polluantes. Cette pollution étant liée à la nature même des services, et en particulier à leur interactivité, il leur sera impossible de répondre à la taxe par une réduction de leurs émissions  $I$ . Leurs prix s'en trouveront donc augmentés, ce qui réduira la demande des consommateurs et devrait conduire les firmes de services à licencier du personnel, qui pourra trouver

---

2. La notion d'intensité environnementale,  $\frac{I}{Y}$  (cf. équation 4.1), est plus fréquente mais moins intuitive à utiliser que celle de productivité. Nous définissons la productivité environnementale comme l'inverse de l'intensité environnementale, soit  $\frac{Y}{I}$ . Une hausse de cet indice signifie que l'on a besoin de rejeter moins de substances polluantes  $I$  pour produire une quantité donnée  $Y$ . Dire que les productivités environnementale et du travail évoluent en sens inverse signifie qu'une hausse de la productivité du travail implique nécessairement une croissance des niveaux de pollution à quantité produite donnée, donc une baisse de la productivité environnementale.

3. L'hypothèse de relation inverse peut être illustrée par les propos suivants : "*de nombreuses transformations [écologiques] nécessaires de la production (de biens ou de services) s'accompagneront d'une réduction de la productivité du travail telle qu'on la mesure actuellement*" (Gadrey, 2008 [59] p. 13). Plus loin dans le texte, "*les produits durables, 'propres' ou 'verts' [...] exigent et exigeront plus de travail par unité produite que les produits pollués ou polluants issus des procédés productivistes*" (p. 14).

à s'employer dans l'industrie, nouvellement demandeuse de travail.

En dehors de la question des possibilités d'éco-innovation dans les services, ce raisonnement souffre de deux faiblesses. D'abord, il repose sur l'idée que la substitution capital-travail est la source majeure des gains de productivité, alors que nous avons constaté dans notre discussion des travaux sur les intangibles que le pouvoir explicatif des sources traditionnelles de la croissance, dont l'accumulation du capital physique, est de plus en plus remis en cause par l'accumulation des actifs immatériels (formation, logiciels...). En particulier, Corrado et al. (2009 [28]) observent une importance identique des capitaux matériels et intangibles sur la période 1995–2003 aux États-Unis.

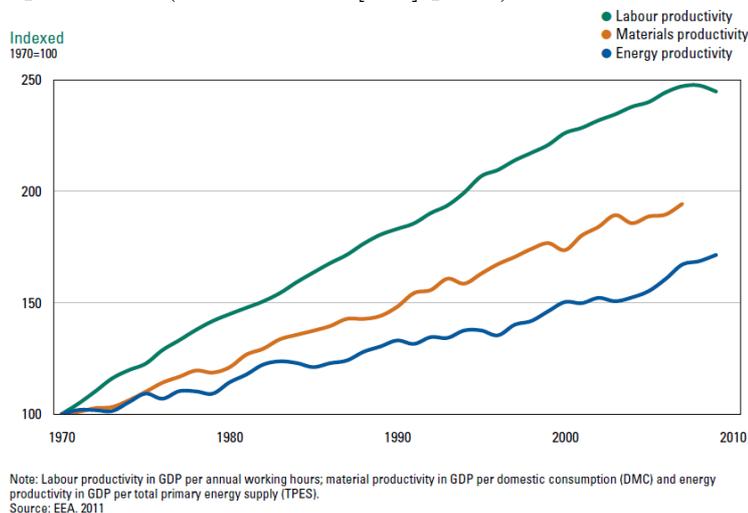
L'autre faiblesse du raisonnement de Gadrey est son hypothèse d'une relation inverse entre la productivité du travail et la productivité environnementale, alors que cette relation fait l'objet d'un vif débat. L'origine de ce débat remonte aux explications apportées au ralentissement du trend de croissance depuis les années 1970. En 1979, Denison ([32]) réalise une étude de comptabilité des sources de la croissance pour évaluer l'impact des réglementations écologiques prises aux États-Unis à partir de 1967. Il met en évidence un effet négatif : ces réglementations seraient responsables d'une baisse de 0.05 points de pourcentage du taux de croissance du PIB sur la période 1967–69, puis d'une baisse de 0.10, 0.22 et 0.08 points respectivement sur les périodes 1969–1973, 1973–1975 et 1975–1978. Christainsen et Haveman (1981 [26]) confirment ces résultats en évaluant que les réglementations environnementales américaines expliqueraient une baisse du taux de croissance du PIB comprise entre 0.12 et 0.21 points de pourcentage sur la période 1973–1977. Ils justifient cet impact négatif de plusieurs manières : d'abord, les réglementations écologiques toucheraient en priorité les firmes les plus capitalistiques et productives, ensuite il faut davantage de travail pour mettre en œuvre les équipements de contrôle de la pollution, sans que ces équipements se traduisent par la production et la mise en vente d'un produit nouveau, et enfin la firme touchée par la réglementation doit souvent faire appel à des services juridiques et administratifs, qui alourdissent encore les coûts sans pour

autant donner lieu à une production tangible supplémentaire.

En 1995, Porter et Van der Linde ([114]) contestent cette relation négative en considérant que, dans un univers dynamique, les réglementations environnementales peuvent pousser les firmes à s'engager dans des stratégies d'innovations favorables à la croissance. Hamamoto (2006 [72]) soutient cette hypothèse en observant l'effet indirect positif des réglementations environnementales sur la productivité des firmes japonaises durant les années 1980. En effet, ces réglementations ont poussé les entreprises à accélérer le remplacement de leurs machines par des nouvelles, à la fois plus écologiques et plus productives. Weber et Domazlicky (2001 [148]) identifient quant à eux une compensation à long terme entre l'effet négatif initial des réglementations sur la productivité du travail et un effet positif indirect en termes d'économies de coûts, notamment pour la santé humaine, liés au non-rejet de substances toxiques dans l'environnement. Une tentative de conclusion du débat est entreprise par Jaffe et al. (1995 [80]). Au terme d'une importante revue de littérature, ces auteurs concluent que les politiques environnementales n'ont qu'un impact limité, mais négatif, sur la croissance de la productivité du travail.

Une amélioration de la productivité environnementale se fait donc souvent au prix d'un ralentissement limité de la croissance de la productivité du travail, mais pas au prix de sa baisse en niveau, comme le suggérait pourtant Gadrey. Le rapport 2011 sur le découplage, publié par le Programme des nations Unies pour l'Environnement ([140]) (figure 4.1), confirme d'ailleurs la compatibilité de la croissance des productivités du travail, des matériaux et de l'énergie. On y observe ainsi leur croissance simultanée depuis 1970 pour l'UE-15 (figure 4.1).

FIGURE 4.1 – Croissance simultanée des productivité environnementale et du travail dans l’UE-15 depuis 1970 (UNEP, 2011 [140] p. 37).



Cette observation laisse envisager qu’une croissance du PIB ralentie, mais positive, pourrait être compatible avec une dynamique de dé-pollution. Il n’en reste pas moins que l’association que propose Gadrey entre croissance, pollution et avenir de l’emploi tertiaire enrichit notre interrogation initiale sur la possibilité d’un découplage croissance-pollution. En effet, si nos deux objections au propos de Gadrey nous suggèrent qu’un découplage est possible, l’analyse de l’évolution de l’emploi tertiaire relativement à l’industrie s’avère plus problématique, en particulier sous l’hypothèse de firmes de services polluantes et dotées de faibles capacités d’éco-innovation.

L’objectif de ce chapitre sera donc de vérifier l’intuition d’une compatibilité des objectifs de croissance et de dé-pollution, tout en questionnant l’incidence attendue d’une éco-taxe sur la répartition sectorielle des emplois. Dans cette double perspective, nous consacrons la première section à la prise en compte de la problématique environnementale dans le modèle de croissance tertiaire élaboré au chapitre précédent. Dans la seconde section, nous testons l’effet d’une politique d’éco-taxe sur un scénario de référence, puis nous envisageons des scénarios alternatifs dans la troisième section.

## 4.2 La dimension environnementale du modèle de croissance tertiaire

Dans le chapitre 3, nous avons construit un modèle de croissance d'une économie de services. Afin de tester notre hypothèse de découplage croissance-pollution à la suite de l'introduction d'une éco-taxe, et aussi pour en mesurer l'influence sur la répartition sectorielle des emplois, nous proposons d'amender le modèle pour qu'il puisse tenir compte des émissions de gaz à effets de serre (GES) produites par la croissance.

Chaque machine-outil  $k$  est désormais décrite par deux indices de productivité : sa productivité du travail  $a_{kt}$  et sa productivité environnementale  $b_{kt}$ . Soit  $y_{jt}$  la production d'une firme  $j$  de biens de consommation, son niveau d'émissions polluantes  $E_{jt}$  est donné par l'équation 4.2.

$$E_{jt} = \frac{y_{jt}}{\bar{B}_{jt}} \quad (4.2)$$

$\bar{B}_{jt}$  est la productivité environnementale moyenne des  $k$  machines de la firme  $j$ , soit  $\bar{B}_{jt} = \frac{\sum_k b_{kjt}}{K_{jt}}$ . En ce qui concerne la productivité environnementale du processus productif d'une firme  $i$ , productrice de machines-outils, nous considérons par commodité qu'elle est identique à celle de la machine qu'elle produit, soit  $b_{kit} = b_{it}$ . Le niveau d'émissions du producteur  $i$  est donc  $E_{it} = \frac{y_{it}}{b_{it}}$ , avec  $y_{it}$  son niveau de production.

Comme Gadrey (2008 [59]) et Fourcroy et al. (2012 [51]), nous considérons que la source principale de pollution des activités de services est leur dimension interactive. Le niveau d'émissions  $E_{zt}$  d'une firme  $z$ , fournisseur de services à la consommation, est supposé proportionnel au nombre de ses clients  $N_{zt}$  (équation 4.3).

$$E_{zt} = \phi \cdot N_{zt} \quad (4.3)$$

$\phi$  est un nombre réel positif. De la même façon, le niveau d'émission d'un agent  $g$ , producteur de KIBS, est donné par  $E_{gt} = \phi \cdot N_{gt}$ . Soit  $T \geq 1$  l'éco-taxe unitaire, elle représente la compensation à payer pour l'émission d'une unité de gaz à effet de serre (GES). Cette taxe porte sur le processus de production des entreprises. Si  $E_t$  est le niveau d'émissions d'une firme quelconque, les coûts supplémentaires à payer pour cette firme seront donc  $T \times E_t$ . Nous faisons l'hypothèse que la taxe est répercutée par l'entreprise sur son prix de vente. Pour une firme  $i$ , le nouveau prix est donné par l'équation 4.4.

$$P_{it} = (1 + \mu) \left( \frac{W_t}{a_{it}} + D \times \frac{T}{b_{it}} \right) \quad (4.4)$$

$D$  est une variable binaire qui prend la valeur 0 sans éco-taxe et la valeur 1 lorsque la taxe est mise en place. De cette façon, nous sommes en mesure d'introduire l'éco-taxe en cours de simulation. Par analogie, le prix du bien final d'une firme  $j$  est donné par  $P_{jt} = (1 + \mu) \left( \frac{W_t}{\bar{A}_{jt}} + D \times \frac{T}{\bar{B}_{jt}} \right)$ .

Faire porter l'éco-taxe sur le processus de production est problématique dans le cas des firmes de services, puisque leur production effective sur la période courante n'est pas connue à l'avance et aussi parce que notre hypothèse d'absence de biens de capital dans ces firmes implique qu'elles n'ont pas d'indice de productivité environnementale. Nous devons donc reconstruire cet indice à partir des valeurs passées d'émissions et de production des firmes de services. Le prix pratiqué par une firme de services finaux  $z$  (également valable pour une firme de KIBS  $g$ ) est donné par l'équation 4.5.

$$P_{zt} = (1 + \mu) \left( \frac{W_t}{a_{zt}} + D \times \frac{T \times E_{zt-1}}{y_{zt-1}} \right) \quad (4.5)$$

Dans le scénario de référence, nous faisons l'hypothèse que la décision d'investissement des agents  $j$  sera affectée par l'éco-taxe. Une machine  $k$  sera désormais remplacée par une machine du fournisseur  $i$  si la condition 4.6 est satisfaite. Ainsi désormais, un écart suffisant de productivité environnementale peut aussi motiver un investissement de remplacement.

$$\frac{P_{it}}{\left(\frac{W_t}{a_{kjt}} + D \times \frac{T}{b_{kjt}}\right) - \left(\frac{W_t}{a_{kit}} + D \times \frac{T}{b_{kit}}\right)} \leq b \quad (4.6)$$

Cette nouvelle règle de remplacement appelle un nouvel indice de compétitivité dans le choix d'un fournisseur  $i$  puisque la productivité environnementale des machines devient un indice de coût aussi pertinent que le niveau du salaire. La chance d'une firme  $i$  d'être choisie par une firme  $j$  sera donc désormais proportionnelle à l'indice (4.7).

$$C_{it} = \left(\frac{a_{it}}{P_{it}} + D \times \frac{b_{it}}{1 + T}\right)^\iota \quad (4.7)$$

Dans le scénario de référence, le nouvel intérêt des firmes  $j$  pour la productivité environnementale des biens de capital va produire un changement de trajectoire technologique<sup>4</sup> de la part des producteurs  $i$ . Soit  $\gamma$  la part de ses recettes que la firme  $i$  consacre à la R&D et  $\eta$  un paramètre d'échelle, le changement de trajectoire technologique de  $i$  se traduit dans le modèle par le pseudo-code du tableau 4.1.

---

4. Dosi (1982 [41]) définit une trajectoire technologique comme "*the pattern of 'normal' problem solving activity on the ground of a technological paradigm*" (p. 152). Le paradigme technologique est quant à lui défini comme "*an 'outlook' which defines the relevant problems, a 'model' and a 'pattern' of inquiry*" (p. 152). Le changement de trajectoire technologique peut donc nécessiter au préalable un changement de paradigme. Nous abordons la question de la pertinence de l'hypothèse de changement de trajectoire technologique dans le contexte des éco-innovations dans la section 3.

TABLE 4.1 – Pseudo-code de la R&D d'un producteur de machines-outils  $i$

---


$$si \quad (p_{it} \times y_{it}) > 0 \ \&\& \ D == 0 \ (\text{=Sans éco-taxe})$$

$$R\&D_{it} = \gamma \cdot p_{it} \cdot y_{it}$$

$$si \quad 1 - e^{-\eta \cdot R\&D_{it}} > U(0; 1)$$

$$et \ si \quad v[0] = U(-0.5; 0.5) > 0$$

$$a_{it+} = v[0]$$

$$v[1] = U(-0.5; 0.5)$$

$$b_{it+} = v[1]$$

---


$$si \quad (p_{it} \times y_{it}) > 0 \ \&\& \ D == 1 \ (\text{=Avec éco-taxe})$$

$$R\&D_{it} = \gamma \cdot p_{it} \cdot y_{it}$$

$$si \quad 1 - e^{-\eta \cdot R\&D_{it}} > U(0; 1)$$

$$et \ si \quad v[0] = U(-0.5; 0.5) > 0$$

$$b_{it+} = v[0]$$

$$v[1] = U(-0.5; 0.5)$$

$$a_{it+} = v[1]$$


---

Autrement dit, avant la mise en place de la taxe ( $D == 0$ ), une innovation est retenue si elle accroît la productivité du travail  $a_{it}$ , indépendamment de l'incidence en termes de productivité environnementale<sup>5</sup>  $b_{it}$ ; tandis qu'avec l'éco-taxe ( $D == 1$ ) c'est la productivité environnementale qui est considérée en priorité. Ce renversement des priorités pourrait paraître exagéré compte tenu du fait que les firmes  $j$  accordent autant d'importance aux deux productivités dans leur choix d'un fournisseur  $i$ . Mais rappelons-nous (chapitre 3) que l'émergence du secteur des KIBS réduit l'incitation des firmes  $j$  à réaliser des investissements de remplacement suite à une augmentation de  $a_{it}$ . Cette hypothèse de changement de trajectoire technologique est

---

5. Cette priorité donnée à la productivité du travail, mais sans pour autant impliquer une baisse de la productivité environnementale, est compatible avec l'observation empirique d'une croissance ralentie de cette dernière par rapport à la productivité du travail (cf. figure 4.1).

retenue afin de nous approcher du cadre proposé par Gadrey (2008 [59]). Il convient cependant de noter que, face à l’ambiguïté de la relation entre productivité du travail et productivité environnementale, nous avons opté pour une relative indépendance entre  $a_{it}$  et  $b_{it}$ , bien que le renversement de priorité implique que la croissance de la productivité du travail sera ralentie au profit de la productivité environnementale en cas d’éco-taxe. Cette hypothèse est conforme à la conclusion de la revue de littérature sur la question entreprise par Jaffe et al. (1995 [80]).

Enfin, nous faisons l’hypothèse que les comportements d’achat des consommateurs ne sont pas modifiés par l’introduction de l’éco-taxe. Cette hypothèse découle de trois autres hypothèses. (1) D’abord les firmes reportent le montant de la taxe sur leurs prix de vente, ce qui réduit toutes choses égales par ailleurs le pouvoir d’achat des consommateurs. (2) Ensuite, toutes les firmes qui peuvent éco-innover le font, ainsi les préférences des consommateurs n’accélèrent ni ne ralentissent ces efforts d’éco-innovation (dans l’hypothèse où les préférences des consommateurs peuvent avoir un impact sur les innovations des entreprises). Enfin (3), nous l’avons souligné au chapitre 2, les consommateurs des économies tertiaires recherchent la consommation maximum, et la sortie d’une telle norme de consommation est difficile<sup>6</sup>.

### 4.3 Résultats du scénario de référence

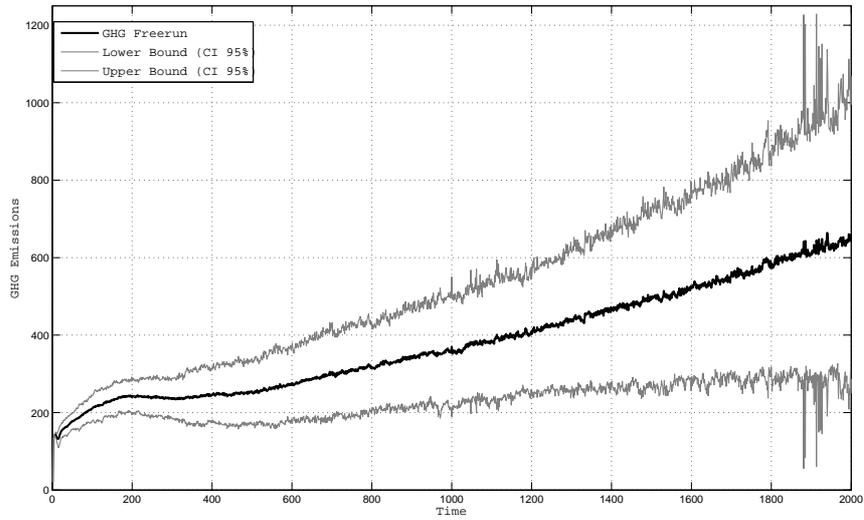
Les amendements au modèle initial, introduites dans la section précédente, correspondent à une situation idéale où les entreprises industrielles réagissent à l’éco-taxe par un changement de trajectoire technologique. Pour rester dans un cadre proche de celui proposé par Gadrey (2008 [59]), nous considérons que les firmes de services polluent en raison de leur dimension interactive, mais qu’elles ne sont pas en mesure de réagir à la taxe par une éco-innovation. La demande pour les services devrait donc s’en trouver réduite. Parallèlement, le poids de l’éco-taxe sur le prix des biens de consommation sera de moins en moins fort grâce aux changements de trajectoire technologique. Ces deux tendances devraient rendre possible une hausse

---

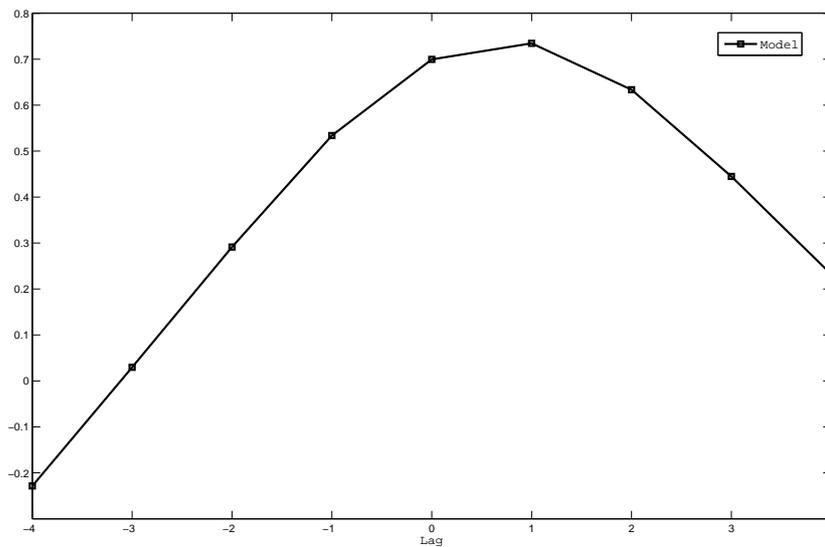
6. Nous abordons ce point au chapitre 5.

relative de l'emploi industriel, à condition que la croissance de la demande de biens soit supérieure à celle de la productivité du travail dans l'industrie. L'hypothèse sur la relation entre productivité du travail et productivité environnementale est donc a priori déterminante quant au sens des mouvements de l'emploi attendus entre les différents secteurs. Les résultats présentés dans ce chapitre proviennent tous d'une moyenne de 50 simulations, réalisées chacune avec un noyau différent pour les tirages aléatoires.

Le calcul du modèle sans éco-taxe permet d'analyser la dynamique temporelle des émissions de GES qu'il produit. Les émissions sont-elles croissantes? La figure 4.2 (a) permet de nous en assurer. L'intervalle de confiance des émissions est très large et a même tendance à augmenter avec le nombre de périodes, ce qui suggère une dynamique dépendante des tirages aléatoires du modèle. Ce constat découle de notre hypothèse d'évolution plus ou moins stochastique des coefficients  $b_{kt}$  de productivité environnementale. La tendance générale demeure cependant celle de la croissance, qui est donc principalement tirée par la croissance des quantités de biens et de services produites. La partie (b) de la figure illustre la corrélation des mouvements cycliques des émissions avec le cycle des affaires qui caractérise le PIB du modèle. La figure est obtenue en filtrant le logarithme des émissions à l'aide du filtre de Baxter et King, puis en calculant le coefficient de corrélation de la série de GES retardée ou avancée par rapport à la série filtrée du PIB de la période courante. Nous ne disposons pas d'une telle série pour les émissions réelles de GES, mais le mouvement global de celle produite par le modèle semble pertinent puisqu'il est largement pro-cyclique avec un retard d'une période : un pic d'activité à une période donnée se traduit par un pic des émissions à la période suivante.



(a)



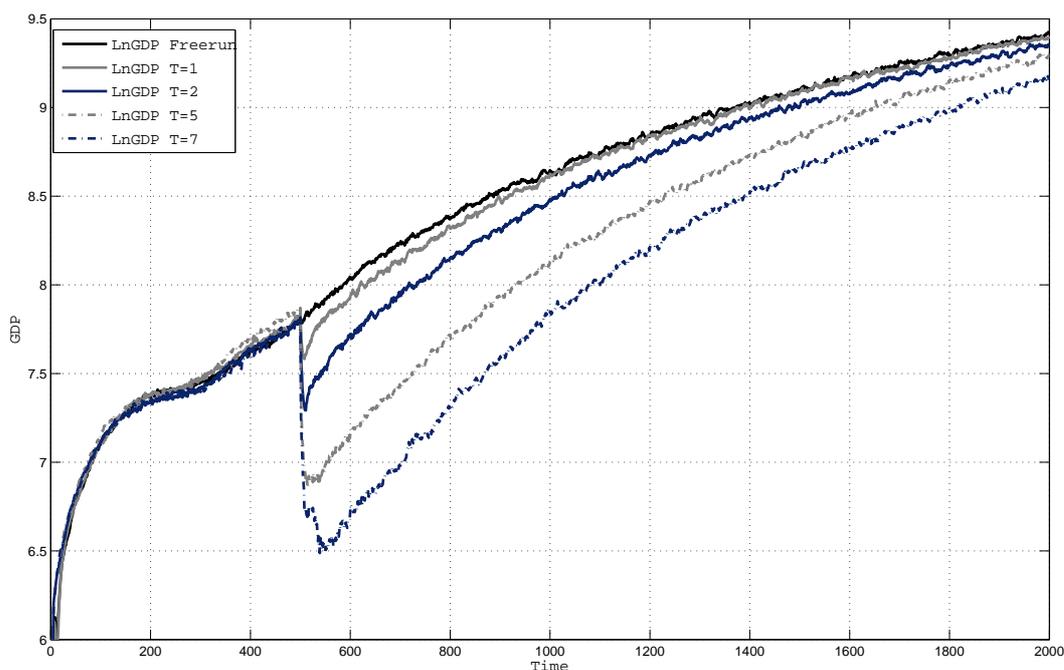
(b)

FIGURE 4.2 – (a) Dynamique des émissions de GES dans le modèle sans éco-taxe, (b) corrélation du cycle des émissions avec le cycle du PIB.

L'éco-taxe est introduite à la période 500 du modèle, car nous avons vu au chapitre 3 que le mouvement de tertiarisation est alors presque terminé. Quatre niveaux d'éco-taxe ont été testés ( $T = 1$ ,  $T = 2$ ,  $T = 5$ ,  $T = 7$ ). La figure 4.3 en présente l'effet sur le logarithme du PIB. La courbe nommée "Freerun" correspond au scénario de référence du chapitre 3, donc sans taxe. On observe que l'éco-taxe déclenche une récession immédiate d'autant plus profonde que la taxation est importante. Ce

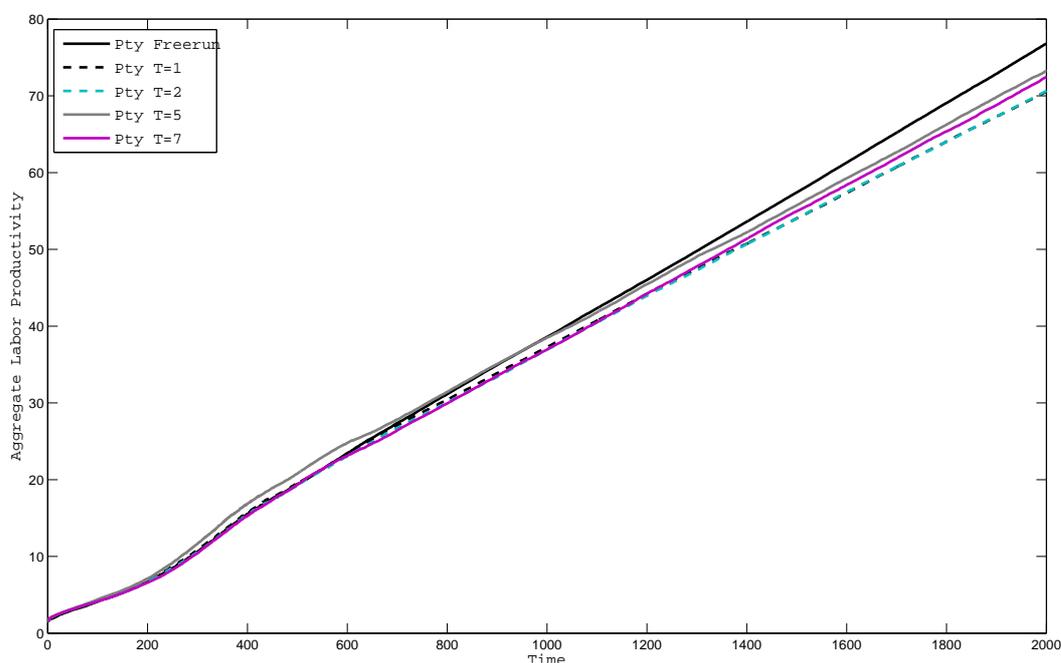
phénomène était attendu : puisque nous supposons que les entreprises répercutent les coûts supplémentaires sur leurs prix, le pouvoir d'achat des consommateurs s'en trouve immédiatement réduit. Ce n'est pourtant pas le scénario de décroissance qui émerge à long terme puisque la croissance redémarre dans tous les cas de figure. Finalement, la taxe se traduit à long terme par un niveau de PIB plus faible que pour la série "freerun", mais elle se révèle a priori sans conséquence observable sur le trend de croissance. En effet, pour  $t \geq 1800$ , l'incidence de  $T = 1$  et  $T = 2$  sur la croissance du PIB est complètement résorbée et les deux séries de PIB semblent évoluer parallèlement à la série "freerun". En effet, l'éco-taxe a, par hypothèse, entraîné une baisse du rythme des gains de productivité du travail permis par les machines-outils, mais cette baisse survient à un moment où c'est surtout les KIBS qui génèrent de la croissance. Les analyses du chapitre 3 ont en effet montré que l'influence de l'accumulation du capital sur le PIB est plutôt faible pour  $t > 400$ , si bien que le changement de trajectoire technologique dans la production de biens de capital n'a qu'une influence marginale sur la croissance du PIB à long terme (une fois passé le choc de l'introduction de la politique d'éco-taxe).

FIGURE 4.3 – Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur le PIB en logarithme.



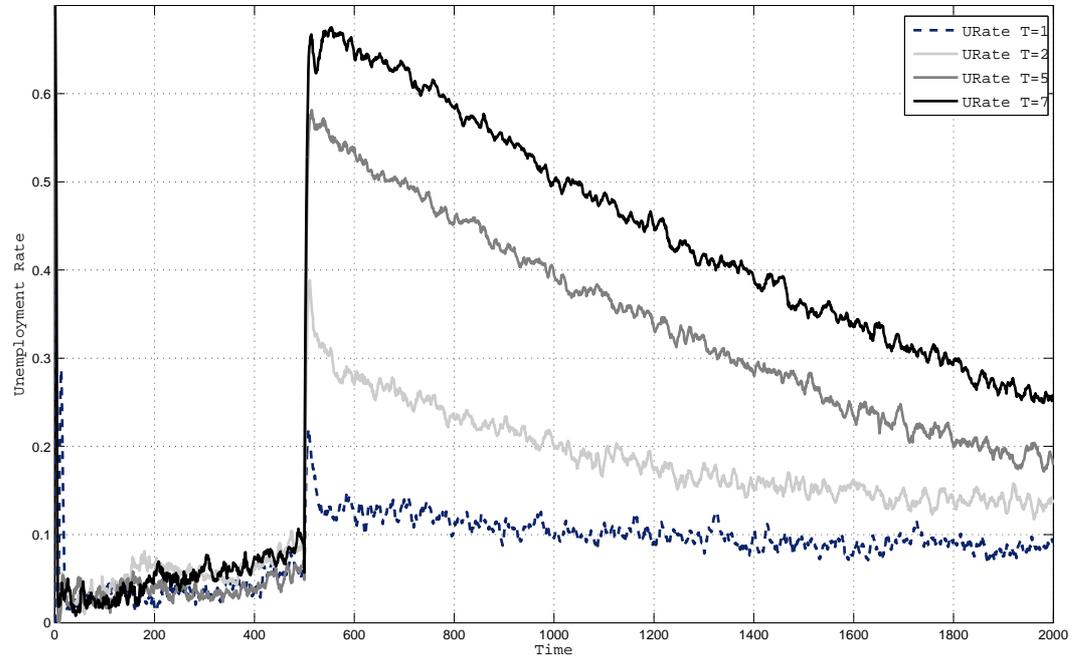
Une comparaison de l'évolution de la productivité agrégée du travail avec et sans éco-taxe peut permettre d'évaluer plus précisément son incidence sur le trend de croissance. La figure 4.4 illustre un ralentissement avec éco-taxe. Ce ralentissement s'explique par le changement de trajectoire des producteurs de machines-outils (tableau 4.1), ralentissement qui demeure mesuré grâce à l'action compensatrice des KIBS sur la productivité du travail (cf. chapitre 3).

FIGURE 4.4 – Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur la productivité agrégée.



Ces dynamiques de récession brutale et de ralentissement limité de la croissance de la productivité à long terme devraient se traduire sur le marché du travail par une hausse brutale du taux de chômage et par sa résorption progressive, avec un niveau asymptotique moyen plus important que les 2 % relevés sans éco-taxe au chapitre 3. Les dynamiques de la figure 4.5 sont cohérentes avec nos anticipations. On observe notamment que le taux de chômage à long terme est d'autant plus important que le niveau de la taxe est élevé. Le coût social de cette politique peut donc devenir très élevé, de même que la pression sur les finances publiques si l'économie considérée dispose de mécanismes d'allocations chômage.

FIGURE 4.5 – Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur le taux de chômage.



Afin d'expliquer la reprise de la croissance, nous observons l'incidence de l'éco-taxe sur la répartition sectorielle des emplois (figure 4.6). Plus la taxe est importante et plus elle est favorable à l'emploi dans les services. Ce résultat est surprenant si l'on considère l'incapacité d'éco-innover de nos firmes de services. La partie (b) de la figure 4.6 détaille les mouvements d'emploi à un niveau d'agrégation plus faible pour  $T = 5$ . On observe que ce sont les secteurs de produits finaux qui sont pénalisés par la mise en place de l'éco-taxe. En effet, son report sur les prix de vente vient réduire fortement le pouvoir d'achat des consommateurs. Par contre, la demande de machines-outils est fortement stimulée dans la mesure où la taxe incite les firmes de biens de consommation à moderniser plus rapidement leurs stocks de machines (cf. Hamamoto, 2006 [72]), si bien que la part du secteur des biens de capital dans l'emploi augmente brutalement lorsque  $t = 500$  et se résorbe peu à peu ensuite. Le secteur des KIBS voit quant à lui sa part augmenter très fortement. Ce phénomène s'explique de deux manières : d'abord parce que l'emploi dans les KIBS ne peut diminuer que graduellement<sup>7</sup>, ensuite parce que la demande de KIBS progresse glo-

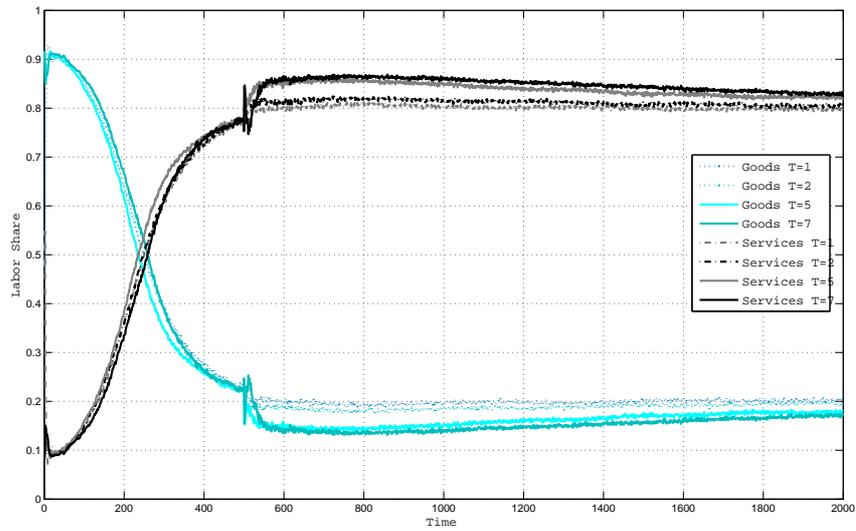
7. On rappelle l'hypothèse de rétention de la main d'œuvre dans ce secteur énoncée au chapitre

bablement du fait d'entreprises de biens de capital temporairement plus rentables et donc davantage consommatrices de KIBS. Cette demande provenant des firmes de biens de capital produit des recettes supplémentaires dans les KIBS, augmentant leurs investissements en R&D. Ceci a pour effet d'accroître leur niveau de connaissances  $H$ , stimulant en retour la demande du reste de l'économie. Un cercle vertueux de croissance se met donc en place grâce aux KIBS.

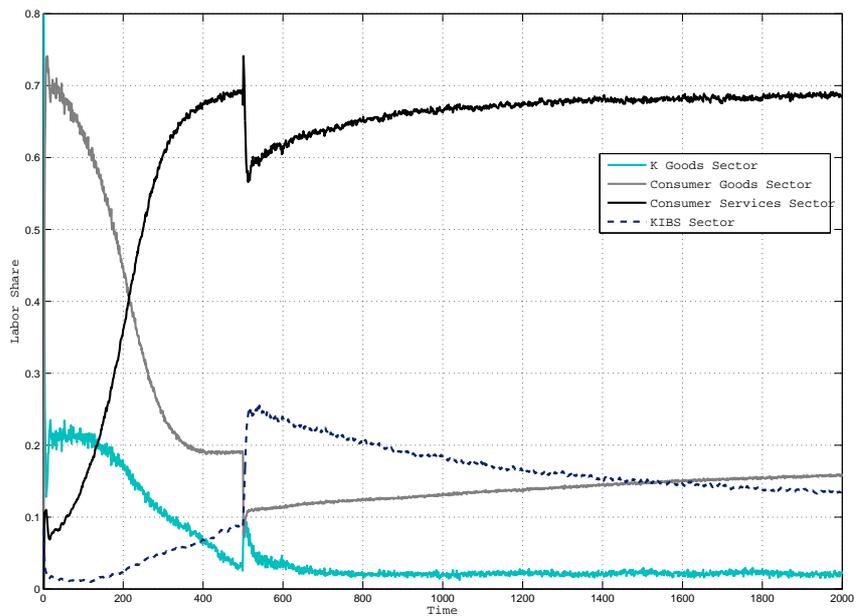
Contrairement aux pronostics de Gadrey (2008 [59]), l'économie échappe à la décroissance. Par ailleurs, la façon dont la reprise économique s'amorce dépend finalement peu de la relation entre la productivité du travail et la productivité environnementale des biens de capital. En effet, nous avons vu au chapitre 3 que les KIBS sont le moteur principal de la croissance à partir de  $t = 500$ , c'est-à-dire au moment où la taxe est mise en place. On peut ainsi affirmer qu'un scénario de décroissance paraît particulièrement difficile à mettre en œuvre dans le cas d'une économie où la source principale de la croissance réside dans l'accumulation de capitaux intangibles, car dans ce cas les gains de productivité sont diffusés très largement dans tous les secteurs de l'économie.

---

3 à la suite de Gallouj, 2002 [63]



(a)



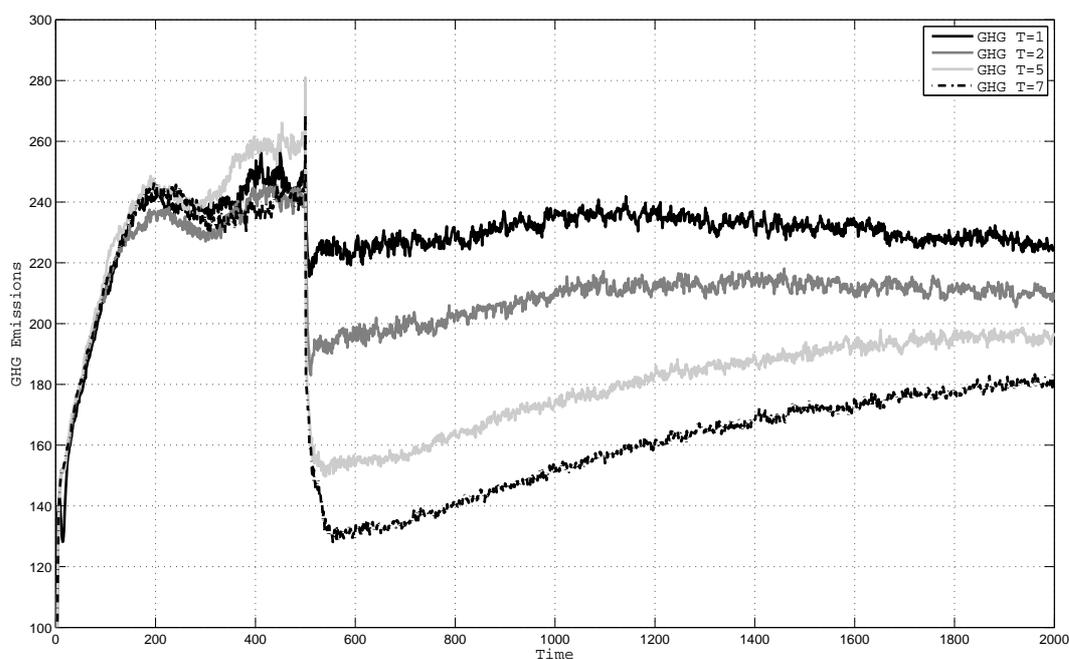
(b)

FIGURE 4.6 – (a) Impact des différents niveaux d'éco-taxe sur la répartition des emplois entre biens et services, (b) effet de  $T = 5$  sur la répartition des emplois entre les quatre secteurs du modèle.

La croissance est globalement préservée, mais est-elle pour autant moins polluante? La figure 4.7 nous permet de répondre par l'affirmative. On y observe une baisse brutale des émissions en  $t = 500$ , baisse qui s'explique par la récession engendrée par l'éco-taxe. Une croissance faible des émissions accompagne ensuite la sortie

de crise jusqu'à une stabilisation à long terme. On remarque alors que, tout comme pour les niveaux de PIB à long terme, celui des émissions est d'autant plus faible que l'éco-taxe est importante, à la différence près que le PIB continue de croître, tandis que les émissions restent constantes. Étant donné les niveaux plus élevés du chômage, un arbitrage peut être fait entre les coûts sociaux et les avantages environnementaux d'une politique d'éco-taxe. Une possibilité pour minimiser les coûts sociaux pourrait être d'utiliser les recettes fiscales nouvelles pour financer des allocations chômage, mais la stimulation de la croissance liée à une telle mesure pourrait à son tour accroître les dommages causés à l'environnement.

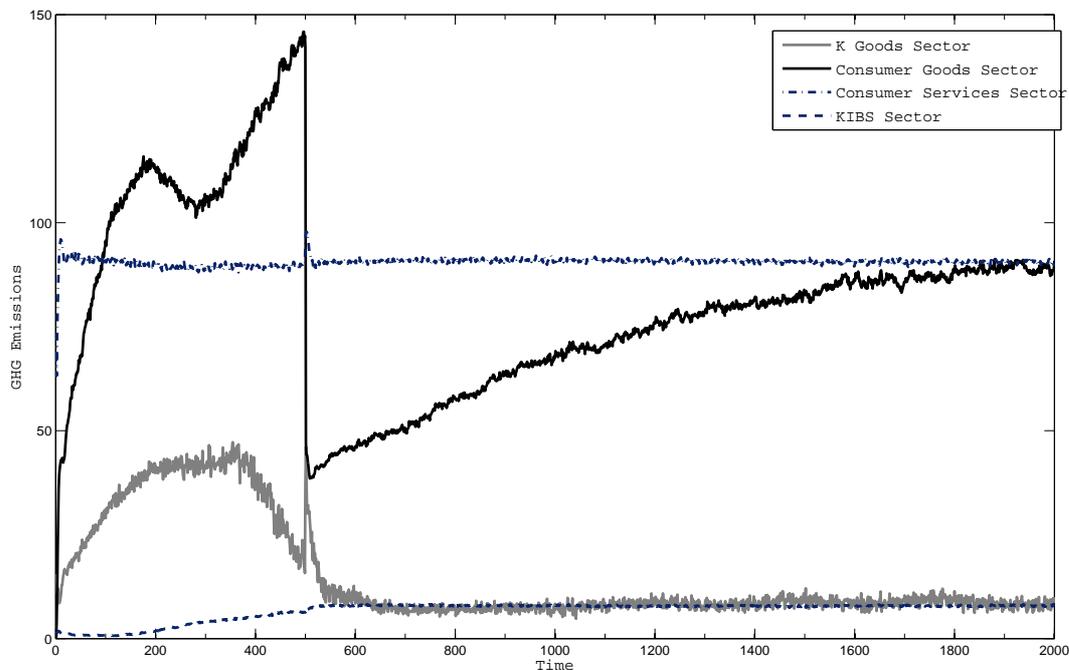
FIGURE 4.7 – Évolution des émissions de GES pour les différents niveaux d'éco-taxe



Une distinction sectorielle des niveaux d'émissions (figure 4.8) montre que se sont les secteurs industriels qui supportent tout l'effort de dépollution dans notre modèle, tandis que les services finaux deviennent la principale source de pollution. Ce résultat est fortement lié à notre hypothèse d'absence d'éco-innovation dans les services. Cette remarque souligne la nécessité de disposer d'une théorie de l'éco-innovation dans les services. Mais avant d'aborder ce point (chapitre 5), nous proposons de tester dans quelle mesure les résultats présentés dans cette section sont dépendants

de notre hypothèse de réactivité des agents industriels.

FIGURE 4.8 – Évolution des émissions de GES des différents secteurs dans le scénario de référence et pour  $T = 5$ .



## 4.4 Scénarios alternatifs

Jusqu'à présent, nous avons supposé que les agents industriels répondent à l'introduction de la taxe environnementale par un changement de trajectoire technologique (tableau 4.1). Il s'agit d'une hypothèse particulièrement optimiste. Dosi et Grazzi (2006 [46]) abordent cette question en prenant le point de vue de la longue période. Selon eux, la tendance à substituer du capital matériel au travail (le capital est plus efficace mais aussi plus polluant) constitue un paradigme technologique au sens de Dosi (1982 [41]), c'est-à-dire "*un ensemble de procédures, une définition des problèmes pertinents et de la connaissance spécifique liée à leur solution*"<sup>8</sup> (p. 148). Pour Dosi et Grazzi, la dé-pollution est un objectif subordonné aux impératifs de gains de productivité dans le paradigme technologique courant. Notant par ailleurs

---

8. Traduction personnelle.

qu'un changement de paradigme est un événement "*extraordinaire*" (p. 12), ils considèrent l'émergence d'une croissance soutenable à long terme comme très improbable. L'hypothèse d'une éco-taxe vecteur d'un changement de paradigme apparaît alors comme "*une idée tirée par les cheveux avec peu de support empirique*"<sup>9</sup> (p. 14).

Des scénarios alternatifs doivent donc être envisagés. Nous proposons ainsi deux alternatives, l'une où l'éco-taxe n'induit aucun changement de comportement des agents<sup>10</sup>, l'autre est un scénario idéal où les agents changent leurs comportements (et donc de paradigme et de trajectoire technologique) sans avoir besoin d'une éco-taxe. Dans cette section, nous fixons  $T = 5$ .

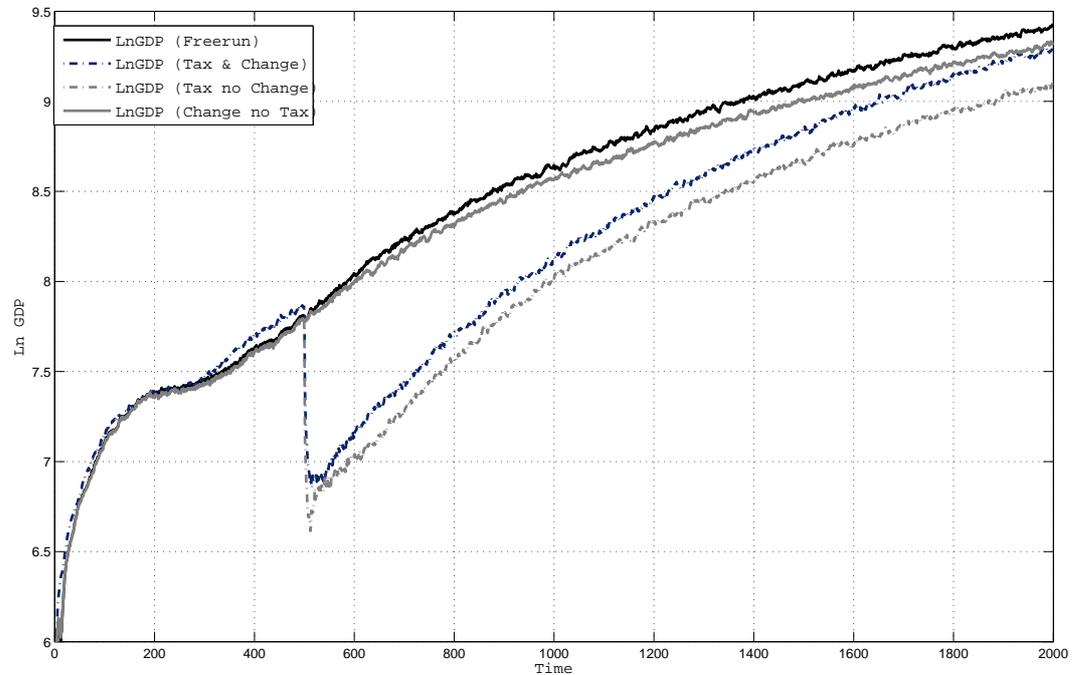
L'évolution du logarithme du PIB des deux alternative est comparée à celle produite dans notre scénario de référence (taxe et changement de trajectoire) dans la figure 4.9. Le scénario de référence et le scénario idéal produisent un résultat identique à long terme : tous deux produisent une croissance légèrement ralentie par rapport à la série "freerun", à la différence près que le scénario idéal sans taxe évite l'événement de récession en  $t = 500$ . Cette récession est particulièrement marquée dans l'alternative où la politique n'est pas suivie par une adaptation des agents. On y voit la conséquence de l'absence du renouvellement en masse des stocks de machines-outils. Dans ce cas de figure, la croissance de long terme semble comparable avec celle de la série "freerun", mais pour un PIB en niveau bien inférieur à toutes les alternatives possibles. Cette production inférieure s'explique par l'impossibilité pour les firmes industrielles de compenser la hausse des prix liée à l'éco-taxe par une progression importante de la productivité environnementale des biens de capital.

---

9. Traduction personnelle.

10. Dans ce cas, les firmes industrielles ne modifient pas leurs critères de choix d'un fournisseur de machines-outils ni ne modifient leur règle d'investissement de remplacement. Les fournisseurs ne modifient pas non plus leur trajectoire d'innovation.

FIGURE 4.9 – Évolution du logarithme du PIB dans les différents scénarios (avec  $T = 5$ ).

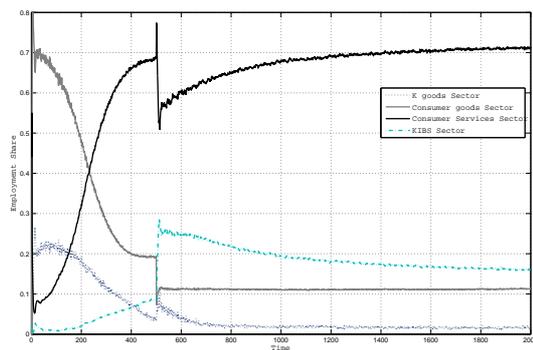
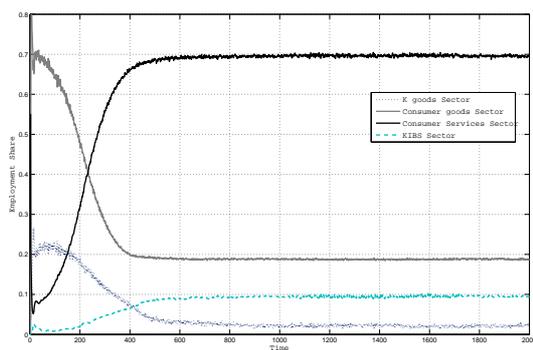
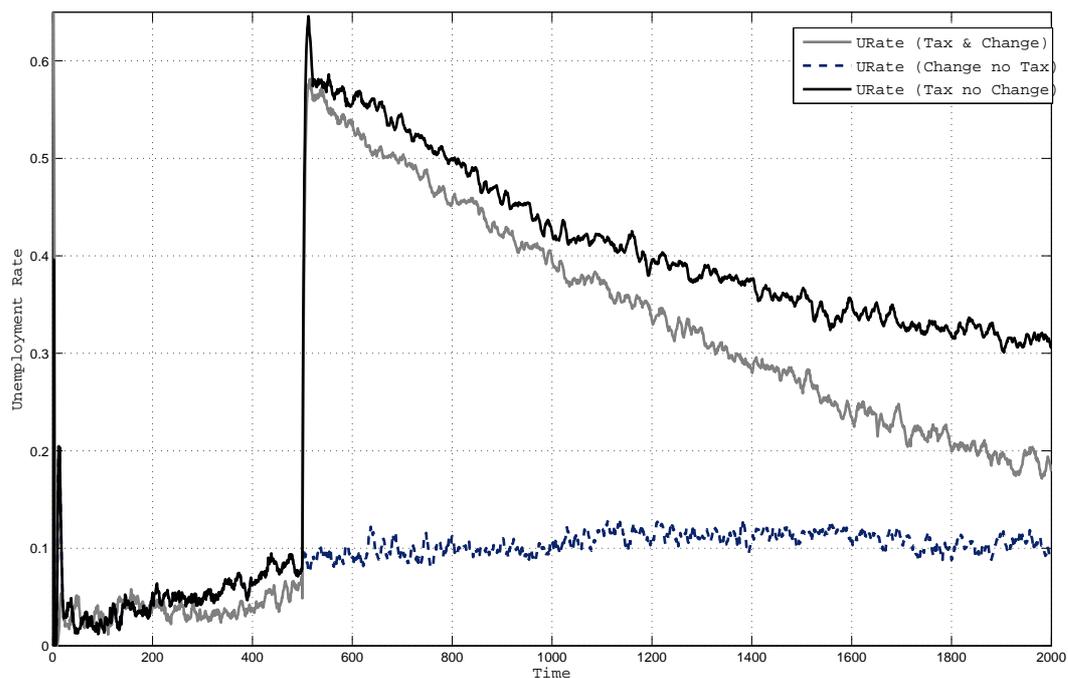


Les conséquences sociales de l'éco-taxe peuvent donc s'avérer particulièrement coûteuses, puisqu'en l'absence d'une réponse adéquate des agents industriels, la demande finale sera particulièrement affectée par la hausse des prix. La figure 4.10 illustre ces coûts en faisant apparaître un taux de chômage de long terme de 30 % pour ce scénario. En comparaison, le taux de chômage de long terme dans le cas d'une adaptation sans taxe est d'environ 10 %, et d'un peu moins de 20 % lorsque la taxe est combinée à une réponse adaptative. Au niveau de la répartition sectorielle des emplois (figure 4.11), le scénario sans adaptation est particulièrement défavorable à l'industrie. Il s'agit d'une conséquence de la baisse de la demande réelle pour les produits de ce secteur. Quand à la situation idéale d'adaptation de l'industrie sans taxe, aucun mouvement d'emplois entre secteurs n'est apparent.

Enfin, au niveau écologique (figure 4.12), aucun des scénarios alternatifs n'est satisfaisant. En effet, le scénario idéal d'adaptation sans taxe ne permet pas de

réduire les émissions par rapport à leur niveau pour  $t = 500$ , et la situation d'une taxe sans réponse adaptative ne parvient qu'à retarder la croissance des émissions.

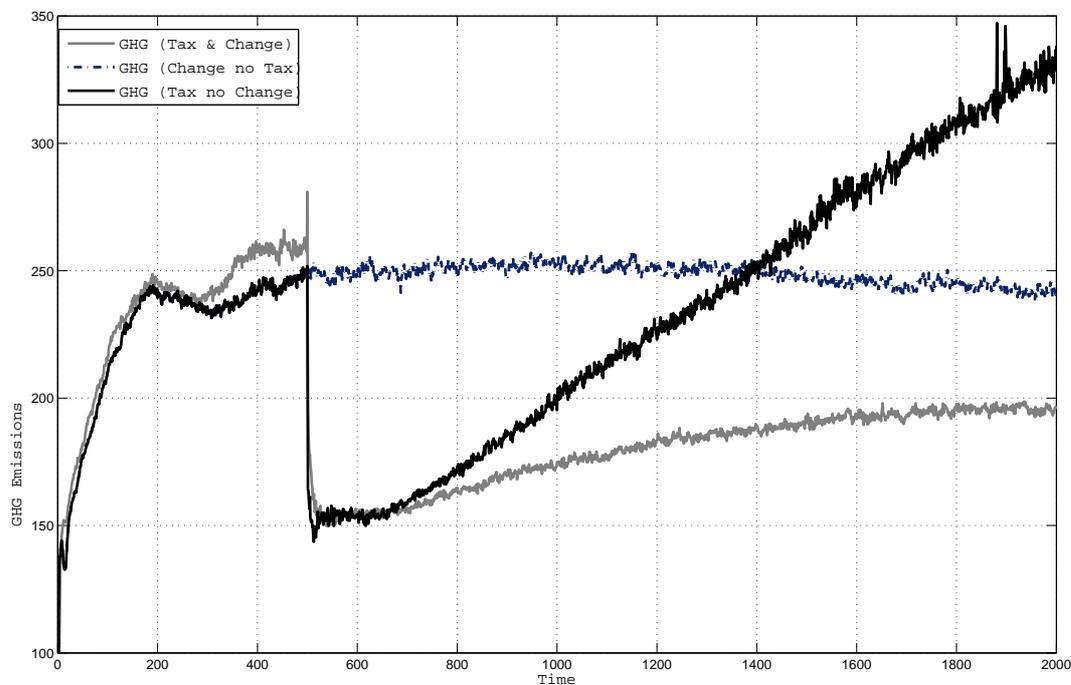
FIGURE 4.10 – Évolution du taux de chômage dans les différents scénarios (avec  $T = 5$ ).



(a)

FIGURE 4.11 – Évolution de la répartition sectorielle des emplois (a) avec adaptation des agents mais sans éco-taxe, (b) lorsque  $T = 5$  mais sans réponse des agents.

FIGURE 4.12 – Évolution des émissions de GES dans les différents scénarios (avec  $T = 5$ ).



## 4.5 Conclusion

Nous tirons trois grandes conclusions des analyses menées dans ce chapitre. (1) D’abord, il semble particulièrement difficile de provoquer une dynamique de décroissance dans une économie de services progressive où les gains de productivité sont diffusés dans tous les secteurs de l’économie grâce aux KIBS. (2) Ensuite, une politique d’éco-taxe a de fortes chances de favoriser l’emploi dans les secteurs de biens et de services intermédiaires. Temporairement, l’incidence peut être positive dans les secteurs producteurs de machines-outils, tandis qu’à long terme, ce sont les services aux entreprises qui sont favorisés. Ainsi, une telle politique semble plutôt aller dans le sens de la poursuite du mouvement de tertiarisation. (3) Enfin, l’éco-taxe apparaît comme un moyen très efficace pour réduire la pollution à court terme, au prix d’une récession et d’une hausse considérable du chômage. Quant à son efficacité à long terme, elle dépend fortement de la réponse que pourront y apporter les agents en

termes d'engagement dans une trajectoire technologique plus écologique.

Pour Dosi et Grazzi (2006 [46]), la dynamique de décroissance relèverait d'un changement de paradigme technologique, dont la survenue paraît hautement improbable. Pour notre part, nous avons analysé dans les chapitre 1 et 2 combien l'économie de services est étroitement liée à la société de consommation, voire même à la société consumériste. En adoptant le point de vue des théories demand-pull et interactives de l'innovation (Kline et Rosenberg, 1986 [90]), la production d'écovolutions dans un tel contexte paraît très difficile à envisager. Il s'agit alors de savoir à quelle(s) condition(s) le verrouillage dans des stratégies d'innovations a-écologiques peut être levé. Il s'agit de l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre 5

## Les stratégies d'éco-innovation face au verrouillage consumériste. Vers la recherche d'une solution de politique publique

### 5.1 Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons souligné le rôle fondamental de l'éco-innovation dans la conciliation des objectifs de croissance et de dé-pollution. En effet, sans un renversement de la priorité donnée aux gains de productivité du travail au profit d'une croissance de la productivité environnementale, les politiques d'éco-taxes risquent d'être inefficaces et de provoquer un chômage de masse durable. Le chapitre 4 a également permis de mettre en évidence l'importance de la question de l'éco-innovation dans les services : en son absence, la pollution des services représenterait un seuil en deçà duquel les émissions ne pourraient descendre. Tout comme la question de la pollution des services, celle de l'éco-innovation dans ces activités est peu abordée dans la littérature (Djellal et Gallouj, 2009 [38]). Aussi, le "*pendule analytique*" proposé par Gallouj (1994 [61] ; 2002 [62]), qui distingue les approches assimilatrices, différenciatrices et intégratives de l'innovation dans les services peut

nous servir à rendre compte de la diversité des possibilités d'éco-innovation dans les services<sup>1</sup>.

Dans une perspective assimilatrice, l'éco-innovation est réalisée dans les services par l'acquisition de nouvelles technologies moins polluantes (nouveaux procédés de chauffage, véhicules électriques...). Les formes d'éco-innovation sont alors semblables à celles rencontrées traditionnellement dans l'industrie, avec notamment la distinction déjà mentionnée (chapitre 1) entre les technologies de bout de chaîne (ou additives) et les technologies propres (ou intégrées) (Oltra et Saint Jean, 2005[105], 2011 [106]; Frondel et al., 2007 [57]). Dans une perspective différenciatrice, l'éco-innovation correspond à toute solution non-technologique qui permet de réduire l'impact environnemental du service (tourisme vert, livret d'épargne développement durable, usage de produits locaux dans la restauration...). Pour le point de vue intégrateur, il s'agit de reconnaître l'existence simultanée de ces deux types d'innovations, à la fois dans les secteurs industriels et de services (Gallouj et Weinstein, 1997 [65]). Le développement récent de l'économie de la fonctionnalité montre la pertinence de cette perspective dans l'étude du phénomène d'éco-innovation. Dans une telle démarche, les biens sont plutôt mis en location que vendus (Van den Bergh et Janssen, 2004 [144]; Faucheux et al., 2006 [48]), le but étant pour le consommateur de satisfaire un besoin de service plutôt qu'un besoin de possession matérielle. Cette stratégie est l'antithèse de l'obsolescence planifiée décrite au chapitre 2 : puisque l'entreprise demeure propriétaire du produit, elle doit s'assurer de sa bonne maintenance, de sa durée de vie et aussi prévoir son recyclage dès la phase de conception du produit. Dans la mesure où l'économie de la fonctionnalité s'inscrit dans une dynamique de réduction de la matérialité des biens par l'enrichissement de leurs contenus en services, on peut parler d'éco-innovation intégrative : les leviers technologiques et non-technologiques sont actionnés. Ces quelques exemples montrent que l'éco-innovation peut aussi exister dans les secteurs de services, et qu'il est pertinent d'aborder le phénomène dans une perspective intégratrice, puisque la frontière entre

---

1. Pour une application de cette grille analytique aux éco-innovations dans les services, voir Djellal et Gallouj (2009 [38]; 2012 [40]).

biens et services devient floue lorsqu'on s'intéresse aux formes récentes de l'éco-innovation.

Les chapitres 2 et 4 nous ont permis d'identifier deux obstacles majeurs à l'éco-innovation (dans l'industrie, mais aussi dans les services) : le verrouillage des consommateurs dans une norme de consommation compulsive (chapitre 2), et le verrouillage de la trajectoire d'innovation des firmes dans un paradigme qui accorde la priorité à la croissance de la productivité du travail (chapitre 4). Ces deux verrouillages (demande et technologie) ont longtemps été abordés séparément par les théories de l'innovation en raison de la distinction traditionnelle entre innovations science-push et demand-pull. Pour Kline et Rosenberg (1986 [90]), cette distinction n'est pertinente que dans le cadre d'une conception linéaire dans laquelle l'innovation est le produit de phases successives de recherche, d'invention, d'innovation et de production. Cette conception est "*artificielle*" (p. 290) selon ces deux auteurs dans la mesure où les différentes phases du processus d'innovation sont soumises à l'influence constante de nombreux retours d'information en provenance des phases amont et aval du processus.

Notre objectif dans ce chapitre est de proposer des solutions de politique publique aux verrouillages qui empêchent l'éco-innovation. Dans cette perspective, la conception non-linéaire de Kline et Rosenberg (1986 [90]) est particulièrement intéressante, car elle nous invite à considérer les verrouillages identifiés comme inter-connectés. Notre propos se concentrera principalement sur l'éco-innovation dans les services, mais en adoptant une perspective intégratrice de façon à ne pas perdre en généralité. La première section nous permet de poser les bases théoriques d'un modèle multi-agents d'éco-innovation non-linéaire qui s'inscrit dans la perspective intégratrice. Dans la seconde section, nous construisons le modèle et évaluons la pertinence de ses propriétés émergentes. Enfin, la troisième section nous permet de tester la capacité des politiques d'éco-taxe et d'information des consommateurs à favoriser l'émergence de produits (biens ou services) écologiques.

## 5.2 Retours sur les deux verrouillages et leur liaison

Cette section s'inscrit d'abord dans une tradition, récente en économie évolutionniste, qui modélise l'évolution des technologies et/ou des designs de produits par les modèles biologiques d'adaptation. Ces modèles nous serviront de point de départ à la réflexion sur l'imbrication des verrouillages technologiques et de demande. Dans un deuxième temps, nous explorons les principaux travaux en matière de dynamiques d'opinions, que nous tenterons de relier aux modèles d'adaptation afin de représenter les obstacles potentiels à l'éco-innovation en matière de demande.

### 5.2.1 Les modèles d'adaptation : de la biologie évolutionniste à l'économie évolutionniste

On peut dater l'origine des modèles d'adaptation aux travaux de John Holland sur les algorithmes génétiques (Holland, 1992<sup>2</sup> [77]). Il s'agit de programmes informatiques dont l'objet initial était de simuler les mécanismes d'évolution et de sélection des organismes vivants, mais qui ont rapidement été utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, dont la solution exacte est soit inconnue, soit tellement coûteuse en temps de calcul qu'il est préférable d'en rechercher une solution approchée par une heuristique. L'analogie que fait l'économie évolutionniste entre les mécanismes de sélection naturelle et marchande et les phénomènes d'adaptation et d'innovation a permis d'étendre l'application de cette classe de modèles à la question de l'évolution des technologies et des designs de produits (Frenken, 2006 [54]; Frenken et al., 1999 [55]; Valente, 2008 [142]). Cette section présente les principes de ces modèles en biologie et discute de la pertinence des applications économiques existantes.

Kauffman (1993 [86]; 1995 [87]) propose de simuler l'évolution d'une population d'agents artificiels placés sur un espace des génomes possibles (*"genotype space"*

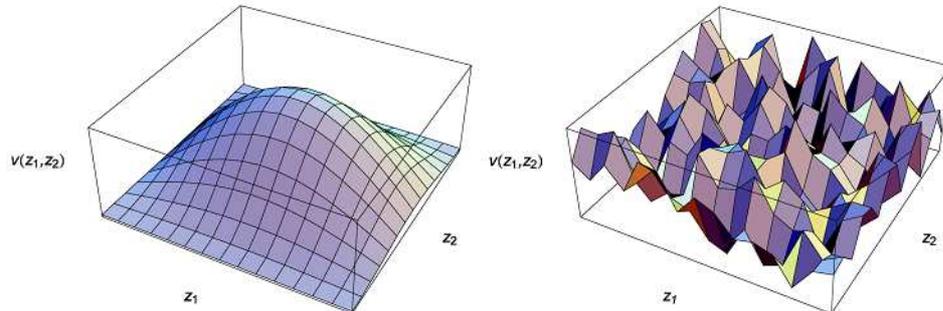
---

2. La première édition de l'ouvrage de John Holland date de 1975.

dans le texte (p. 43)). Un génome particulier est modélisé par une chaîne binaire de longueur  $N$  où chaque nombre 0 ou 1 correspond à l'état d'un gène qui compose le génome. L'ensemble des  $2^N$  combinaisons possibles de gènes forme l'espace des génomes, ou espace d'adaptation, sur lequel vont pouvoir évoluer les agents. À chaque génome est associée une valeur de fitness ou d'adaptation, obtenue initialement en calculant la moyenne arithmétique de  $N$  tirages aléatoires dans une loi de probabilité. Pour le dire autrement, à chaque gène  $i$  d'un génome  $S$  est associée une valeur de fitness  $w_i$ . La fitness du génome dans son ensemble est alors donnée par  $W(S) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$ . Kauffman (1993 [86]) indique que les différents gènes exercent des influences les uns sur les autres, influences qu'on nomme "*interactions épistatiques*" (p. 41). Selon-lui, ces interactions et leurs influences sur la fitness totale du génome sont mal connues des biologistes, si bien qu'il est pertinent d'assigner aléatoirement à chaque gène un nombre  $K$  d'autres gènes d'un même génome sur lesquels il exerce une influence. Ainsi, chaque fois qu'une mutation intervient sur un gène, la contribution du gène à la fitness du génome ainsi que celle de ses  $K$  gènes dépendants sont modifiées par un nouveau tirage aléatoire.

La surface d'adaptation (fitness landscape) ainsi formée est entièrement déterminée par les deux paramètres  $N$  et  $K$ , d'où le nom de "modèle NK" donné au modèle de Kauffman. L'objectif des agents est de trouver le génome qui maximise la surface de fitness. Leur plus ou moins bonne réussite est conditionnée par leur heuristique de recherche et par la complexité de la surface à optimiser. En effet, plus le paramètre  $K$  est important, et plus la surface approchera d'une forme aléatoire, donc caractérisée par de multiples extrémums locaux (cf. figure 5.1), dotés chacun d'un faible bassin d'attraction. Dans une telle configuration, l'optimum global est particulièrement difficile à identifier pour des agents qui ne disposent que d'une connaissance locale de leur environnement.

FIGURE 5.1 – Cas extrêmes de surfaces d’adaptation parfaitement covariantes ( $K = 0$ ) et aléatoire ( $K = N - 1$ ) (Chang et Harrington, 2006 [25] p.1291)



En termes économiques, chacun des optimums locaux peut s’interpréter comme un verrouillage technologique (Frenken, 2006 [54]). Dans la perspective environnementale qui est la nôtre, on peut dire que le but d’une politique est de permettre aux entreprises de sortir de leur verrouillage technologique en transformant les solutions les plus écologiques en attracteurs visibles, c’est-à-dire en extremums dotés d’un fort bassin d’attraction.

Le paramètre  $K$  conditionne également la richesse de la spéciation permise par le modèle : lorsqu’il s’approche de son maximum théorique,  $K = N - 1$ , la surface de fitness a de plus en plus d’extremums. Dans cette situation, une population d’agents placés sur le même génome en  $t = 0$  pourra donner lieu à une grande variété de sous-populations, bloquées sur des génomes sous-optimaux différents, à l’issue du processus de recherche individuelle. Cette spéciation peut s’interpréter, en termes économiques, comme une phase de diversification des designs pour un même produit. Un parallèle existe avec la stratégie d’obsolescence planifiée envisagée au chapitre 2 : les entreprises industrielles proposaient toutes un bien homogène en  $t = 0$  alors qu’ensuite, certaines ont changé d’heuristique au profit de stratégies d’obsolescence planifiée, qui ont elles-mêmes conduit à une diversification des designs et à l’augmentation de la pression exercée sur l’environnement naturel.

Dans son ouvrage de 1995 ([87]), Kauffman propose d’envisager la surface de fitness comme une surface de coûts que des agents-entreprises cherchent à minimiser. Si

leur heuristique de recherche leur donne une connaissance locale de l'environnement avec en même temps la possibilité d'effectuer des "sauts" sur la surface, alors la trajectoire de coûts obtenue par les agents sur une surface non-totalement aléatoire est semblable aux observations réelles de courbes d'apprentissage : les coûts diminuent à un rythme décroissant. Ce phénomène vient du fait que, sur une telle surface, un agent a plus de chances d'obtenir des coûts plus faibles par un saut long (une innovation radicale) que par une recherche locale en début de simulation. Ces sauts longs amènent rapidement les agents à découvrir un attracteur performant, qui leur fait progressivement préférer la recherche locale (les innovations incrémentielles)<sup>3</sup>. D'autres applications du modèle NK ont rapidement été mises en œuvre en économie. March (1991 [94]) montre ainsi l'intérêt pour les firmes de disposer d'employés aux capacités de socialisation rapide et au taux de turnover élevé lorsque l'environnement cognitif, symbolisé par une surface aléatoire, change en cours de simulation. La question de l'adaptation des firmes à un environnement (une surface) dynamique a aussi été abordée par Levinthal (1997 [92]), qui montre que leur survie repose dans un tel contexte sur leur capacité à mener des innovations radicales (des sauts longs sur la surface d'adaptation). Plus récemment, Kauffman, Lobo et Macready (2000 [88]) essaient de déterminer l'heuristique de recherche optimale pour une firme évoluant sur une surface d'adaptation non-totalement aléatoire. Ils confirment alors l'optimalité de la stratégie qui consiste à débiter par des innovations radicales, qui sont peu à peu remplacées par des innovations incrémentielles.

---

3. Kauffman (1995 [87]) propose l'explication intuitive suivante d'une telle dynamique : dans un premier temps, si l'agent est placé aléatoirement sur la surface, alors on peut espérer que sa performance initiale sera plutôt proche de la moyenne. En présence d'une surface légèrement co-variante, le voisinage immédiat a de fortes chances de proposer des solutions légèrement plus performantes que la situation initiale, tandis qu'en même temps environ la moitié des localisations possibles offrent une performance meilleure que la moyenne. Ainsi, une solution éloignée tirée aléatoirement a de fortes chances de se révéler plus performante que le voisinage immédiat, d'où la pertinence des innovations radicales en début de simulation. Ensuite, à mesure que l'agent s'approche d'un extremum performant, c'est la recherche locale (les innovations incrémentales) qui se révèlent les plus performantes, d'où le ralentissement progressif de la trajectoire de baisse des coûts.

Ces exemples d'applications montrent la capacité du modèle NK à traiter des questions d'évolutions de technologies. En ce sens, il paraît être un bon outil pour aborder le verrouillage des firmes dans les technologies ou les produits polluants. Pour autant, nous émettons des réserves à l'usage du modèle NK original, dans la mesure où on peut penser que la construction d'une surface par tirages aléatoires est, certes justifiée en biologie, mais peu réaliste dans le cadre d'un problème d'économie. Ainsi, Valente (2008 [142]) propose de remplacer les tirages aléatoires par une fonction mathématique déterministe. Cette solution offre l'avantage de donner au modélisateur un contrôle total de la complexité du problème d'optimisation. Il s'agit ainsi d'une méthode particulièrement utile pour tester l'efficacité de différentes heuristiques de recherche pour les agents, mais sa pertinence économique est toujours limitée car la justification de la spécification de la fonction se révèle difficile. La conception interactive de l'innovation défendue par Kline et Rosenberg (1986 [90]) nous incite à nous orienter vers une théorie de la demande pour construire la surface de fitness.

Frenken (2006 [54]) fournit des pistes intéressantes pour envisager un tel rapprochement avec la conception interactive de l'innovation. En s'inspirant de Lancaster (1966 [91]) et de Saviotti et Metcalfe (1984 [126]), il propose de considérer les dimensions de l'espace de recherche des firmes, non plus comme un génome abstrait, mais comme un espace des caractéristiques spécifiques aux produits dont il étudie l'évolution (machines à vapeur, ordinateurs personnels...). Il ouvre ainsi la voie à des applications empiriques précises. Il propose également une construction de la surface d'adaptation à partir des préférences de consommateurs hétérogènes, mais classés en groupes homogènes. Ainsi, la fitness  $W_g(S)$  d'un design  $S$  évalué par les consommateurs d'un groupe  $g$  est donnée par l'équation 5.1.

$$W_g(S) = \sum_{f=1}^F \beta_{fg} \cdot w_f(S) \quad (5.1)$$

Le design  $S$  est composé de  $F$  caractéristiques de services,  $\beta_{fg}$  est l'importance accordée par les consommateurs du groupe  $g$  à la caractéristique  $f$ , tel que  $\sum_{f=1}^F \beta_{fg} = 1$  et  $\beta_{fg} \geq 0$ . La surface d'adaptation varie donc selon le groupe de consommateurs,

et le "*designer*" (Frenken, 2006 [54] p. 45) du produit devra arbitrer entre ces groupes hétérogènes.

Chez Frenken, un produit est donc défini par un espace de caractéristiques et plusieurs surfaces de fitness (une par groupe de consommateurs). Chang et Harrington (2000 [23]; 2004 [24]; 2006 [25]) proposent quant à eux un modèle à surface unique, calculée comme une fonction de profit et définie directement par les préférences de consommateurs hétérogènes. Ils répondent à un problème réel particulier, celui d'établir le degré de centralisation optimal des décisions dans une firme de grande distribution composée d'une société mère et de différentes filiales. Chacune des filiales opère sur son propre marché, et donc fait face à son propre problème de maximisation (sa propre surface) de profit. La profit du groupe est formé par la somme des profits des filiales. Concrètement, chaque filiale évolue dans un espace de  $N$  activités, composées chacune de  $R$  pratiques commerciales<sup>4</sup>. L'espace d'adaptation est donc de taille  $R^N$ . Chaque filiale cherche la combinaison de pratiques qui maximise sa surface de profit, calculée à partir d'une somme des fonctions de demande  $q_i$  des consommateurs individuels  $i$ . Soit  $W_i = w_1 \dots w_n$ , le vecteur des pratiques commerciales préférées par l'agent  $i$  et  $Z_j = z_1 \dots z_n$ , les pratiques de la firme  $j$ , la fonction de demande de  $i$  est donnée par l'équation 5.2.

$$q_i = (\beta/p)^{1/(1-\beta)} [\Gamma - \sqrt{\sum_i (z_j - w_i)^2}]^{\gamma/(1-\beta)} \quad (5.2)$$

Avec  $\beta \in (0; 1)$ ,  $\gamma > 1$  et  $\Gamma$  tel que  $\Gamma - \sqrt{\sum_i (z_j - w_i)^2} > 1$  (Chang and Harrington, 2006[25]). On remarque que  $\sqrt{\sum_i (z_j - w_i)^2}$  représente une mesure de distance entre le vecteur des pratiques de la firme (son choix de "design" de service) et le vecteur des pratiques préférées d'un consommateur  $i$ . Plus la filiale s'approchera du vecteur idéal d'un consommateur, plus celui-ci demandera des quantités importantes de produits. Mais le vecteur préféré par un agent n'est pas forcément celui préféré

---

4. "Ces pratiques représentent tous les éléments qui influencent l'attrait du magasin pour les consommateurs. Elles peuvent inclure les types de produits proposés [...] le nombre de produits proposés [...] et les régimes d'indemnisation [service après-vente]" (Chang and Harrington, 2006 [25] p. 1429, traduction personnelle).

par tous. Ainsi, le calcul d'une fonction de demande agrégée permet à Chang et Harrington de représenter l'arbitrage de la firme entre ces préférences hétérogènes, tout en évitant de recourir à la construction de surfaces multiples pour une même firme. Cependant, la spécification de la fonction 5.2 indiquent que, quelque soit le vecteur  $Z_j$  choisi par la firme  $j$ , une quantité non nulle lui sera demandée par chaque consommateur. Ainsi, ce modèle n'est applicable qu'aux situations de monopole avec des consommateurs captifs. En effet, si plusieurs firmes opèrent sur un même marché/une même surface, tout consommateur demanderait une quantité positive de produits à chaque firme du marché.

Au total, les modèles de Frenken (2006 [54]) et de Chang et Harrington (2000 [23]) constituent un pas important vers la formalisation d'un modèle d'innovation interactif au sens de Kline et Rosenberg (1986 [90]). Mais des insatisfactions demeurent à cet égard. D'abord, le modèle de Chang et Harrington se limite aux seules situations de monopole. Le second motif d'insatisfaction réside dans le caractère statique des préférences des consommateurs. En effet, celles-ci leurs sont attribuées de façon exogène durant la phase d'initialisation du modèle, à la fois chez Frenken et chez Chang et Harrington. Une dynamique est bien envisagée par ces derniers, mais elle prend la forme d'un tirage aléatoire en cours de simulation. Or, nous avons vu au chapitre 2 que le verrouillage des consommateurs dans une norme de consommation compulsive n'est pas un phénomène aléatoire puisqu'il est particulièrement dépendant des phénomènes de comparaison interpersonnelles. Nous retenons donc l'idée d'une surface fondée sur les préférences des consommateurs, mais nous proposons d'utiliser une théorie de la dynamique de ces préférences.

### **5.2.2 Influences interpersonnelles et dynamiques des préférences**

Dans la microéconomie standard (Varian, 2004 [145]), les préférences du consommateur sont fixes ou bien variables en fonction du revenu (cf. loi d'Engel). Par ailleurs, le concept d'agent représentatif exclut toute hétérogénéité des préférences

et toute possibilité de dynamique issue d'interactions personnelles. Une telle théorie ne peut donc expliquer des phénomènes sociaux émergents (effets de mode, diffusion d'innovations ...), en particulier si ces phénomènes sont constatés sur une période suffisamment courte pour que le niveau de revenu soit considéré comme fixé.

Les théories évolutionnistes du consommateur, en revanche, accordent une grande importance à la dynamique des préférences individuelles ( Witt, 2001 [151]; Janssen et Jager, 2001 [82]; 2002 [83]; Cantono et Silverberg, 2009 [22]; Nelson et Consoli, 2010 [101]). Malgré leur diversité, ces contributions reposent toutes sur un principe commun : les consommateurs évoluent dans un univers multi-agents, souvent dans un réseau social plus ou moins régulier, dans lequel les préférences et les connaissances individuelles sont soumis à l'influence constante d'un certain voisinage. Ce principe est (1) compatible avec la théorie de diffusion des innovations proposée par Rogers (1995 [123]), (2) souvent formalisé par un automate cellulaire et (3) il peut être combiné aux théories socio-psychologiques de la dynamique des opinions (French, 1956 [53]; Friedkin, 1986 [56]; Hegselmann et Krause, 2002 [74]; 2005 [75]). Nous examinons successivement ces trois points.

Rogers (1995 [123]) se propose d'expliquer le fait stylisé bien établi selon lequel un produit dont la diffusion est un succès voit sa part de marché et le nombre de ses unités vendues suivre une trajectoire temporelle de forme logistique. Il explique cette trajectoire par trois caractéristiques fondamentales des individus/consommateurs : (1) ils sont hétérogènes, particulièrement en termes de préférences et d'aptitude à accepter la nouveauté<sup>5</sup>, (2) ils sont influençables, (3) la plupart d'entre-eux sont homophyles, c'est-à-dire qu'ils tendent à entrer en contact avec d'autres individus relativement similaires en termes de goûts, de statut social, d'opinions etc. Le réseau global formé par les consommateurs doit donc être considéré comme un agrégat de différents sous-réseaux, chacun étant composé d'individus similaires. Dans le cas

---

5. Rogers (1995 [123]) classe la population des consommateurs en cinq catégories, rangées par ordre décroissant d'ouverture à la nouveauté : les innovateurs, les adopteurs précoces, la majorité en avance, la majorité en retard et les retardataires.

théorique extrême où tous les consommateurs sont homophyles, les différents sous-réseaux sont indépendants les uns des autres, rendant la diffusion d'une innovation particulièrement difficile. Par contre, si un certain nombre d'agent hétérophyles sont présents dans la population, ils peuvent servir de ponts entre les sous-réseaux et devenir des "leaders d'opinion" en influençant la décision des membres de nombreux sous-réseaux d'adopter ou non une innovation. Lorsqu'une masse critique d'individus ont été persuadés, une dynamique auto-entretenu (= la phase de décollage) de diffusion d'une innovation se met en place. Le verrouillage des consommateurs, ou à l'inverse l'adoption rapide d'une innovation, dépend donc de la proportion d'agents homophyles et/ou hétérophyles dans la population.

Cette théorie précise les conditions de l'influence interpersonnelle. Elle permet en ce sens de compléter les théories évolutionnistes du consommateur qui mettent fréquemment l'accent sur le rôle déterminant de ce type d'influences dans les choix individuels. Ainsi pour Witt (2001 [151]), la satisfaction des besoins humains requiert l'usage d'outils, dont on suppose au préalable qu'ils sont en mesure de répondre au besoin ressenti. Cette "*consumption knowledge*" est acquise "*by communicating with, and observing and imitating, other consumers*" (p. 28). L'idée d'influence se retrouve aussi chez Nelson et Consoli (2010 [101]). Pour ces derniers, les préférences individuelles ne sont jamais réellement à l'équilibre, elles sont constamment conditionnées par de nombreux facteurs, y compris les amis, les réseaux sociaux personnels, l'âge, les accidents etc.

Une façon commode de représenter des agents dont les préférences et les choix changent constamment sous l'influence d'un certain voisinage est d'utiliser un automate cellulaire (Hegselmann et Flache, 1998 [73]; Hegselmann et Krause, 2002 [74]; 2005 [75]; Janssen et Jager, 1999 [81]; Cantono et Silverberg, 2009 [22]). Dans le cas d'un automate à deux dimensions, il s'agit d'une matrice dans laquelle chaque cellule peut prendre plusieurs états différents en fonction de celui des cellules de son voisinage. Dans le cas présent, chaque cellule peut représenter un consommateur individuel dont les préférences représentent les divers états possibles. Ces dernières

sont constamment soumises à l'influence des préférences des autres agents situés dans un voisinage déterminé, si bien que l'automate est toujours en mouvement. Un automate cellulaire peut donc représenter formellement à la fois le concept d'absence d'équilibre (Nelson et Consoli, 2010 [101]) et celui de réseaux d'influences (Rogers, 1995 [123]; Witt, 2001 [151]).

Si l'automate cellulaire s'impose, il reste à définir la règle de mouvement des préférences individuelles. À partir des travaux précurseurs de French (1956 [53]) sur les influences interpersonnelles, un certain nombre d'auteurs (Friedkin, 1986 [56]; Hegselmann et Krause, 2002 [74]; 2005 [75]) ont proposé de représenter l'opinion d'un individu par une somme pondérée de sa propre opinion passée et de celle de ses voisins. Cette méthode a l'avantage de la simplicité et de la flexibilité (une grande diversité de méthodes de pondération sont possibles, et les coefficients de pondération peuvent être calculés par des équations dynamiques). En termes généraux, on suppose qu'un agent  $i$  est entouré de  $j = n$  voisins. Soit  $x_{it}$  son opinion à la période  $t$  et  $a_{ij}$  l'importance accordée par  $i$  à l'opinion du voisin  $j$ ,  $x_{it}$  est donné par l'équation 5.3.

$$x_{it} = \sum_{j=1}^{j=n} a_{ij} \cdot x_{jt-1} \quad (5.3)$$

Avec  $a_{ij}$  tel que  $\sum_{j=1}^{j=n} a_{ij} = 1$ .

Il peut être démontré que cette équation amène nécessairement un consensus à partir du moment où chaque paire d'agents attribue une pondération positive à l'opinion d'un troisième agent. Cette propriété est essentielle pour expliquer la diffusion réussie d'une innovation. De plus, il est aisé de produire des cas où elle n'est pas vérifiée, de sorte que l'on peut représenter des situations de verrouillage des consommateurs dans la demande de certains produits. Cette flexibilité nous conduit à retenir l'équation 5.3 pour représenter l'évolution des préférences des consommateurs au sein d'un automate cellulaire à deux dimensions.

## 5.3 Un modèle d'éco-innovation interactif et intégrateur

Dans cette section, on construit un modèle d'innovation interactif et intégrateur, que nous appliquons à l'éco-innovation dans les services. Le modèle est construit en deux étapes : d'abord, on définit l'espace d'adaptation et son hypersurface de fitness, ensuite on choisit une heuristique de recherche réaliste et performante. Dans une troisième sous-section, nous évaluons la pertinence économique des dynamiques émergentes du modèle.

### 5.3.1 Espace d'adaptation et hypersurface de fitness

Comme chez Frenken (2006 [54]), nous définissons les dimensions de l'espace de recherche des entreprises par les caractéristiques de services<sup>6</sup> du produit vendu. Ces caractéristiques, qui décrivent à la fois des biens et des services (Gallouj et Weinstein, 1997 [65]), peuvent appartenir à trois grandes catégories (Saviotti et Metcalfe, 1984 [126]) :

1. **Les caractéristiques principales**, qui motivent l'achat.
2. **Les caractéristiques complémentaires**, qui déterminent la performance des caractéristiques principales.
3. **Les externalités**, qui sont les caractéristiques non-désirées.

Pour Gadrey (2008 [59]), il y a deux sources majeures de pollution dans les services : l'environnement matériel nécessaire à la prestation (outils, ordinateurs, bâtiments...) et les externalités induites par la nature interactive des services. Le processus de production d'un service nécessite en effet des déplacements (du support, des outils et des personnes) qui sont source d'externalités. La dimension interactive peut demander en particulier des rencontres en face-à-face, qui seront d'autant plus polluantes que leur fréquence est élevée et que les protagonistes sont géographiquement éloignés. On note cependant que l'interactivité n'implique pas systématiquement des

---

6. On entend ici par "caractéristique de service" toute caractéristique qui procure de l'utilité au consommateur.

rencontres personnelles (particulièrement quand elle est basée sur l'usage des TIC<sup>7</sup>), ainsi nous considérons comme plus pertinent d'envisager la mobilité comme source de pollution plutôt que l'interactivité, notion plus générale.

Par analogie avec Soviotti et Metcalfe (1984 [126]), on peut considérer la caractéristique de mobilité  $z_{kt}$  du service proposé par une firme  $k$  à la fois comme une caractéristique principale et complémentaire. Dans certains services (commerce, services à la personne...), la proximité est en effet un facteur de choix décisif, tandis qu'elle est un facteur secondaire dans d'autres cas<sup>8</sup>. Le niveau d'externalités  $y_{kt}$  est quant à lui l'addition des deux sources identifiées :  $v_{kt}$ , les externalités produites par la matérialité du service, et  $f(m_{kt})$ , les externalités produites par la mobilité. Nous distinguons deux formes de mobilité :  $z_{kt}$  est la mobilité propre du client, et  $m_{kt}$  qui représente la mobilité totale (du prestataire, du client et du support de la prestation), de sorte que  $m_{kt} > z_{kt}$ . La fonction  $f(.)$  permet de convertir cette mobilité totale en externalités via une opération de standardisation. En définissant  $m_{Min}$  et  $m_{Max}$  respectivement les niveaux de mobilité minimum et maximum permis par les technologies et les habitudes existantes,  $f(.)$  est définie par l'équation 5.4.

$$f(m_{kt}) = 10 \times \frac{m_{kt} - m_{min}}{m_{max} - m_{min}} \quad (5.4)$$

En plus de ces caractéristiques, il est important de considérer le niveau du prix  $x_{kt}$ , puisque ce dernier est un levier d'action important des politiques environnementales. Il ressort ainsi que, dans une perspective écologique, la définition d'un service en termes de caractéristiques peut s'envisager à travers le vecteur 5.5.

$$\begin{pmatrix} x_{kt} \\ y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt} \\ z_{kt} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

---

7. Dans ce cas, c'est l'environnement matériel qui devient la source première de pollution. Plus généralement, même dans le cas de la mobilité, c'est toujours l'usage de systèmes matériels (moyens de transport) qui est source de pollution.

8. Le choix d'un établissement de formation peut par exemple être prioritairement dirigé par sa réputation et secondairement par son éloignement par rapport au lieu de résidence.

Ces trois caractéristiques constituent les axes pertinents de l'espace d'adaptation d'une firme de service lorsqu'elle envisage des questions d'éco-innovation. Il existe, dans un certain sens, une relation épistatique entre  $y_{kt}$  et  $z_{kt}$  puisque par définition  $m_{kt} > z_{kt}$ . Les modèles d'adaptation sont de nature discrète, donc chaque dimension est définie par un nombre fini de variantes. Par convention, il existe 10 variantes pour chaque dimension telles que  $x_{kt} \in [1; 10]$ ,  $y_{kt} \in [1; 10]^9$  et  $z_{kt} \in [1; 10]$ . Cet espace offre donc  $10^3$  possibilités de design de produit. Les valeurs attribuées à chaque design peuvent permettre de les classer et de les comparer. Ainsi un design  $\begin{pmatrix} 5 & 3 & 2 \end{pmatrix}$  est plus cher, moins polluant et requiert moins de mobilité de la part du client qu'un design  $\begin{pmatrix} 4 & 6 & 4 \end{pmatrix}$ .

Une hypersurface de fitness est définie au dessus de cet espace d'adaptation à 3 dimensions. Le modèle comprend à cette fin une population de 400 consommateurs représentés dans un automate cellulaire de taille  $20 \times 20$ . En début de simulation, un vecteur de préférences initiales  $\begin{pmatrix} x_{it} & y_{it} & z_{it} \end{pmatrix}$  est attribué à tout individu  $i$ . Si  $RND(0; 1)$  représente un tirage aléatoire dans une loi uniforme définie sur  $[0; 1]$ , ces préférences initiales sont attribuées par la procédure suivante.

$$\begin{aligned}
 & x_i = RND(1; 10) \\
 \text{if } x_i > 5 \text{ then } & \begin{pmatrix} y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RND(1; 5) \\ RND(1; 5) \end{pmatrix} \\
 \text{if } x_i \leq 5 \text{ then } & \begin{pmatrix} y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RND(6; 10) \\ RND(6; 10) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

On suppose donc que les consommateurs qui sont prêts à payer les prix  $x_t$  les plus élevés sont aussi les plus soucieux de la qualité environnementale et de la proximité

---

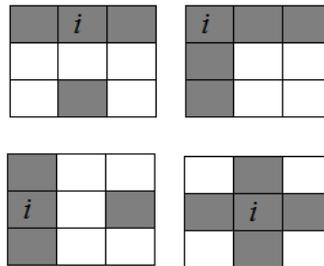
9. Dans certains cas, nous aurons  $y_{kt} \in [2; 20]$ . Ce point sera examiné plus loin.

du produit qu'ils demandent. Par hypothèse, chaque consommateur ne peut demander qu'un bien ou service par période, et il choisit systématiquement le produit dont le design est le plus proche possible de son propre vecteur de préférences, donc le produit disponible qui lui procure l'utilité maximum. Le modèle défini jusqu'ici nous permettra de simuler divers scénarios : si les consommateurs ne considèrent qu'une seule source d'externalités, alors  $y_i \in [1; 10]$  et  $y_k \in [1; 10]$ . Par contre, s'ils évaluent les deux sources nous avons  $y_i \in [2; 20]$  et  $y_k \in [2; 20]$ . En l'absence de politique environnementale cependant, les consommateurs ignorent la caractéristique  $y$  des services vendus.

Le vecteur de préférences  $\begin{pmatrix} x_{it} & y_{it} & z_{it} \end{pmatrix}$  d'un consommateur  $i$  n'est pas statique. Sa dynamique dépend des préférences des agents situés dans un voisinage de Von Neumann (figure 5.2) de telle sorte que les voisins  $j$  dont les préférences affectent celles d'un agent de référence  $i$  sont ceux situés immédiatement au-dessus de  $i$ , en-dessous, à sa droite et à sa gauche.

La figure 5.2 révèle que nous avons choisi de coller les bornes de l'automate entre elles. Dans ces conditions, l'automate a les caractéristiques topologiques d'un tore.

FIGURE 5.2 – Voisinage de Von Neumann



La dynamique des préférences de l'agent  $i$  est donnée par l'équation 5.6.

$$\begin{pmatrix} x_{it} \\ y_{it} \\ z_{it} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_i x_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j x_{jt-1} \\ \beta_i y_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j y_{jt-1} \\ \beta_i z_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j z_{jt-1} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Avec  $\beta_i \in (0.1; 0.9)$ , un paramètre indiquant le degré d'indépendance d'un agent  $i$  par rapport à ses quatre voisins. La valeur de fitness<sup>10</sup>  $U_{lt}$  d'un design  $l$  est donnée par l'équation 5.7.

$$U_{lt} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N \left[10 - \frac{1}{3} \cdot (|x_{it-1} - x_l| + |y_{it-1} - y_l| + |z_{it-1} - z_l|)\right] \quad (5.7)$$

Avec  $(x_l \ y_l \ z_l)$  les coordonnées du design  $l$  dans l'espace d'adaptation à trois dimensions et  $N = 400$ , le nombre total de consommateurs. Cette équation signifie que plus un design  $l$  est proche du vecteur de préférences d'un nombre important de consommateurs, plus la performance du design est élevée, ce qui en accroît l'attractivité du point de vue des firmes  $k$ .

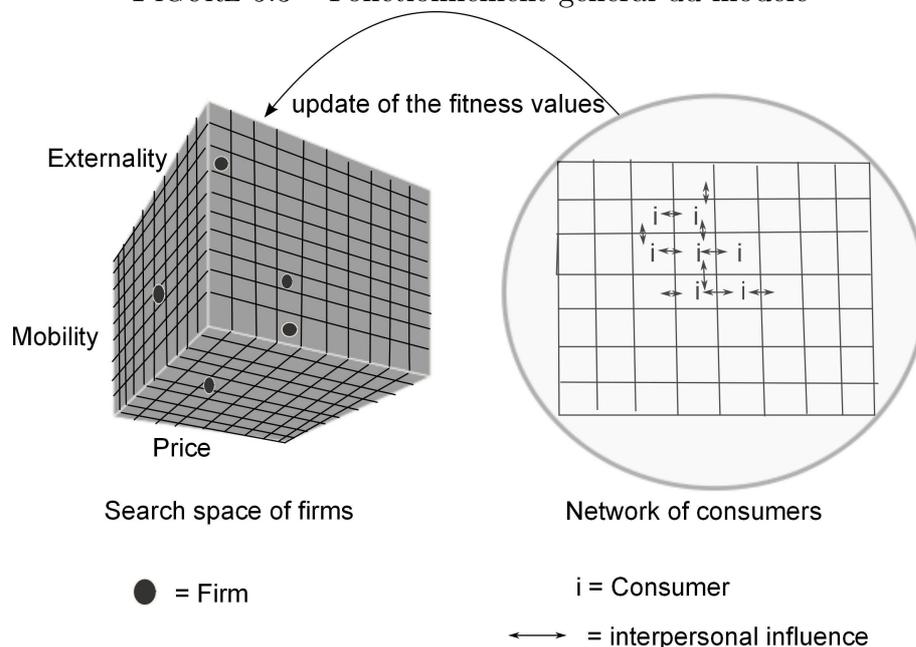
La forme totale de l'hypersurface de fitness ainsi obtenue est inconnue, mais nous savons par définition qu'elle est bornée telle que  $U_{lt} \in [1; 10]$  puisque chaque distance  $|x_{it-1} - x_l|$  est au moins égale à 0 et au plus égale à 9. Cette remarque nous permettra de juger de la performance de l'heuristique de recherche des firmes  $k$ , que nous définissons dans la prochaine sous-section.

Pour résumer, les préférences des consommateurs évoluent entre chaque période selon l'équation 5.6. Cette évolution vient modifier en temps réel la forme de l'hypersurface de fitness grâce à l'équation 5.7. Ce fonctionnement général est résumé par la figure 5.3. Il s'agit maintenant de définir l'algorithme de recherche des firmes, dont la tâche sera de découvrir le design qui possède la fitness la plus grande.

---

10. Dans notre modèle, la "fitness" d'un design représente son niveau d'utilité moyen parmi la population des consommateurs.

FIGURE 5.3 – Fonctionnement général du modèle



### 5.3.2 Heuristique de recherche et règle d'entrées et sorties

Le modèle d'innovation que nous construisons est appliqué à la problématique environnementale dans les services. Dans ces conditions, l'heuristique de recherche des firmes doit tenir compte des spécificités de l'innovation dans les services. Dans le chapitre 3, nous avons montré l'importance des investissements en capitaux intangibles pour la croissance, investissements qui sont largement réalisés dans les firmes de services<sup>11</sup>. Nous faisons par conséquent l'hypothèse que ces firmes sont capables d'innover et qu'elles le font régulièrement, de sorte que notre heuristique permettra aux firmes du modèle d'effectuer des recherches à chaque période.

Dans notre modèle les firmes sont rationnelles, dans le sens où elles cherchent à maximiser la fitness du design qu'elles proposent sur le marché. Cette rationalité

11. Ainsi, Wolff (2002 [153]) montre que ce sont les secteurs de services qui ont la main d'œuvre la mieux formée, la plus impliquée dans les tâches intensives en connaissances et qui investissent le plus en matériel informatique, ce qui lui fait dire que les secteurs de services ne sont pas technologiquement inertes.

s'exerce cependant dans un contexte d'information limitée : les firmes ne savent pas quel design maximise cette fitness. Le modèle comprend 10 entreprises  $k$ , dont la position initiale en  $t = 0$  est attribuée de façon aléatoire. Kauffman (1995 [87]) propose une heuristique de recherche performante qui produit des résultats économiques pertinents (courbes d'apprentissage et innovations radicales suivies d'innovations incrémentielles). Nous calquons donc notre heuristique sur la sienne : ainsi nos firmes ont une connaissance locale de leur environnement, tout en ayant la possibilité d'effectuer des sauts longs pour explorer des zones inconnues (tableau 5.1).

---

TABLE 5.1 – Heuristique de recherche d'une firme  $k$

---

$$if(MS_{kt} \leq \bar{M}S_t)$$

Observe les 6 possibilités d'innovations incrémentielles offertes par le voisinage immédiat

Mémorise leurs valeurs de fitness

Choisit un design aléatoirement parmi les  $10^3$  designs possibles

Mémorise sa valeur de fitness

Compare les fitness

Déplaces-toi vers le design le plus performant

---

$MS_{kt}$  et  $\bar{M}S_t$  représentent respectivement la part de marché de la firme  $k$  et la moyenne des parts de marché constatées à la période  $t$ . Autrement dit, une firme dont la part de marché est plus importante que la moyenne n'est pas incitée à innover<sup>12</sup>. Cette hypothèse reflète l'idée que le résultat d'une innovation en termes de parts de marché est incertain. En effet, toutes les firmes recherchent le même design, celui dont la fitness est maximale. Si elles découvrent toutes ce design, la part de marché qu'une firme  $k$  peut espérer est  $\bar{M}S_t$ . Ainsi, il peut être avantageux pour une firme  $k$  de tenir une position, jugée sous-optimale du point de vue de la fitness globale, si elle lui assure  $MS_{kt} > \bar{M}S_t$ . On dira dans ce cas qu'elle exploite une niche de marché.

Au niveau des entrées et sorties des entreprises, nous faisons l'hypothèse d'une population constante. Une firme est retirée du modèle dès qu'elle rencontre une part de marché nulle. Elle est dès lors immédiatement remplacée par un nouvel entrant, qui peut être innovant ou imitateur. Selon Levinthal (1997 [92]), la probabilité pour

---

12. Une hypothèse similaire est formulée par Winter (1984 [150]) : chez cet auteur, une firme n'investit en R&D que lorsque son niveau de profit périodique est inférieur à un certain niveau.

que l'entrant soit un imitateur est d'autant plus grande que la charge génétique<sup>13</sup> de la population des firmes est élevée. Soit  $U_{tMax}$  la fitness maximale des designs proposés par les firmes en place et  $\bar{U}_t$  leur fitness moyenne, la charge génétique  $L_t$  d'une population d'entreprises est alors donnée par l'équation 5.8.

$$L_t = \frac{U_{tMax} - \bar{U}_t}{U_{tMax}} \quad (5.8)$$

Autrement dit, plus une firme offre un design performant par rapport à ses concurrentes, plus le nouvel entrant sera tenté de copier le design à succès. Dans un souci de donner un fondement économique au modèle, nous préférons à la charge génétique l'indice de Herfindahl-Hirshman (HHI) pour décider du caractère innovant ou non du nouvel entrant. Concrètement, un tirage aléatoire dans une loi uniforme  $U(0;1)$  est réalisé à chaque nouvelle entrée. Si  $U(0;1) > HHI$ , alors l'entrée est innovante. Ainsi, plus le marché est proche d'une situation de monopole plus la probabilité d'un entrant imitateur est importante. L'imitateur copiera le meilleurs design. L'entrant innovateur choisit quant à lui 5 designs aléatoirement parmi les  $10^3$  possibles, puis il compare leur fitness avec celle de la firme dominante. Le design adopté est celui qui offre la plus forte fitness.

Les entrées seront donc de moins en moins innovantes à mesure que le marché devient mature, et donc à mesure que les firmes en place se rapprochent du design à la fitness maximum. Le modèle incorpore donc, dans sa conception, un mécanisme de verrouillage progressif des designs proposés par les firmes. Ce verrouillage est le produit d'une imbrication entre des possibilités "technologiques" et marchandes limitées pour les nouveaux designs.

### 5.3.3 Évaluation des dynamiques émergentes

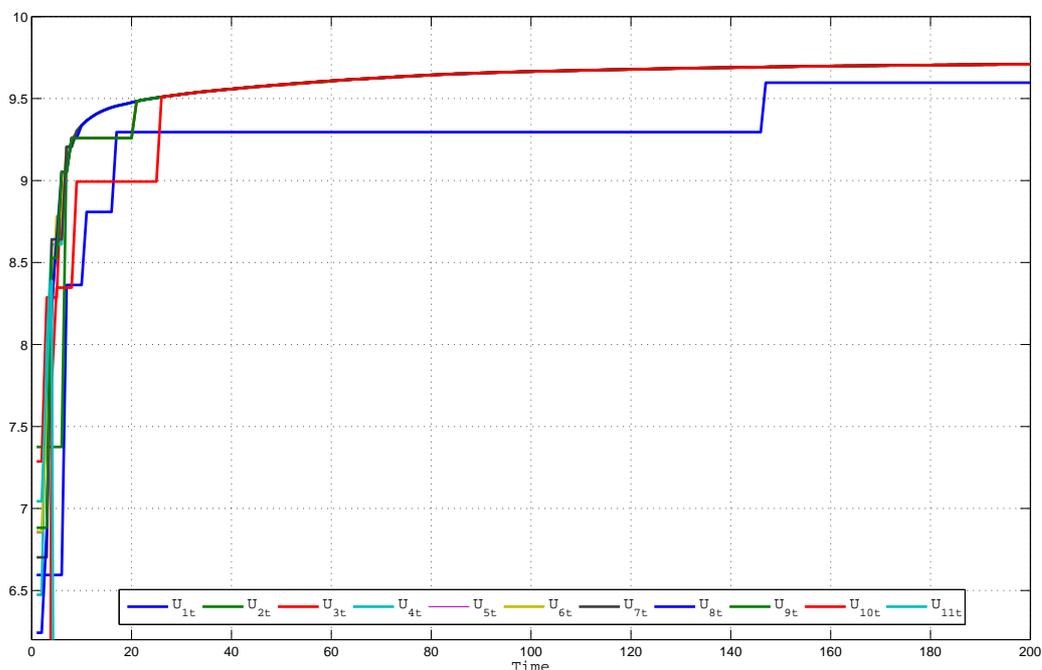
L'évolution de la fitness  $U_{kt}$  des designs proposés par les  $k$  firmes du modèle est représentée sur la figure 5.4 pour une simulation de 200 périodes. Les innovations radicales donnent lieu à des mouvements brutaux de la valeur de fitness, tandis que

---

13. "*genetic load*" dans le texte.

les innovations incrémentielles la modifient à la marge. Sur cette base, nous pouvons dire que la figure montre que le modèle est capable de reproduire le fait stylisé bien établi selon lequel les innovations radicales surviennent surtout au début du cycle de vie d'un secteur. On observe également que toutes les entreprises ne proposent pas le même design à long terme : la firme 1 semble en effet bloquée dans la fourniture d'un design sous-optimal, mais avantageux en termes de parts de marché.

FIGURE 5.4 – Évolution de la fitness/ performance des designs proposés par les firmes du modèle



Selon Bleda et Valente (2009 [19]), les phases de concurrence et de monopole se substituent régulièrement l'une à l'autre sur un marché de produits hétérogènes. La figure 5.5 reproduit certaines propriétés émergentes du modèle obtenues au cours de la même simulation que celle de la figure 5.4. On observe sur la partie (a) que les parts de marché, d'abord très différentes, s'homogénéisent rapidement sous l'effet d'une convergence des designs (parties (c) et (d)). L'adoption par la firme 1 d'un prix  $x_{1t}$  et d'une mobilité  $z_{1t}$  respectivement supérieur et inférieur à ceux des autres designs lui assure une position dominante pour  $t \in [20; 140]$ . Cette position avait

été anticipée dans la figure 5.4. Cependant, l'évolution endogène des préférences des consommateurs (équation 5.6) réduit peu à peu cet avantage compétitif, faisant tendre le marché vers une nouvelle situation de concurrence. En  $t = 145$ , la firme 1 réagit en baissant son prix (c), ce qui lui assure de nouveau une position dominante (a). Ces dynamiques concurrentielles de succession des phases de concurrence et de monopole sont synthétisées par l'indice HHI ( figure 5.5 partie (b)). On notera également la capacité du modèle à faire émerger progressivement un dominant design (parties (c) et (d)).

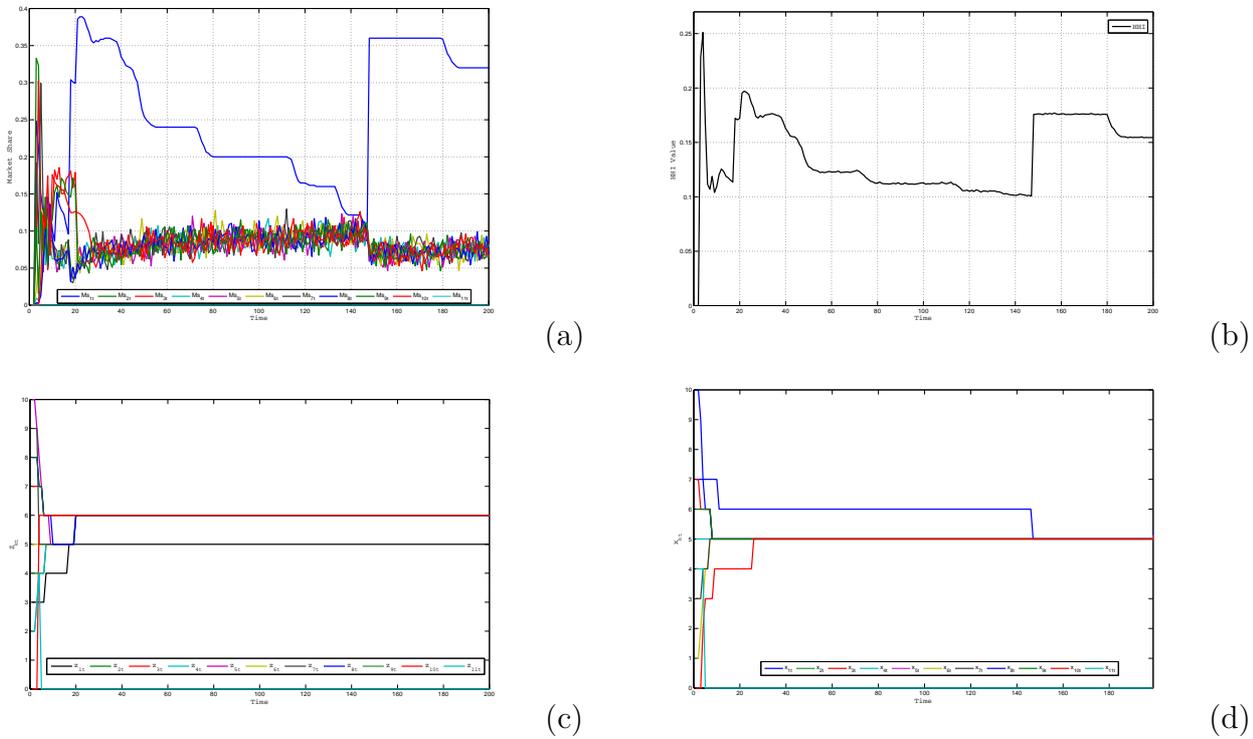


FIGURE 5.5 – (a) Dynamique des parts de marché, (b) évolution de l'indice HHI, (c) homogénéisation du degré de mobilité  $z_{kt}$ , (d) homogénéisation des prix  $x_{kt}$

## 5.4 Politiques environnementales et éco-innovations des entreprises de services

Le modèle d'innovation qui vient d'être construit semble en mesure de reproduire les effets de la concurrence sur le design des produits. Il s'agit désormais d'observer l'influence de diverses politiques sur la dimension écologique du dominant design

émergent. Dans le prolongement de l'interrogation formulée dans le chapitre 4 quant à l'efficacité d'une éco-taxe sur la trajectoire d'innovation des firmes, nous proposons d'introduire une telle politique. Par ailleurs, puisque nous disposons désormais d'un modèle qui accorde un rôle important aux préférences des consommateurs dans la détermination du design optimal, nous mettons également en œuvre une politique d'information des agents consommateurs. On se demande alors si une politique environnementale peut pousser les firmes à adopter un design de produit plus écologique, et laquelle de ces deux politiques est plus efficace au regard de cet objectif. Nous commençons cette section par rendre compte des mécanismes de la mise en œuvre de ces deux politiques, puis nous présentons les résultats de simulations répétées.

#### 5.4.1 Mise en œuvre des politiques environnementales

Par hypothèse, en l'absence de politique publique, la dimension d'externalité,  $y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt}$ , n'est pas valorisée par le marché, elle n'est donc pas prise en compte par les consommateurs. Ainsi, en l'absence de politique, la tolérance  $y_{it}$  des consommateurs  $i$  envers les externalités (1) n'entre pas dans leur décision d'achat, et (2) elle est totalement fixe, donc non soumise à l'influence du voisinage.

Nous envisageons les politiques environnementales comme un moyen de modifier l'hypersurface de fitness qui évalue l'espace des designs. Une politique efficace doit permettre de créer un puissant attracteur qui pousse les firmes  $k$  à proposer les designs les plus écologiques possibles. Afin d'évaluer les mérites respectifs des deux politiques envisagées, nous créons un indice de pollution moyenne  $\bar{y}_t$ . En notant  $ms_{kt}$  la part de marché d'une firme  $k$ ,  $\bar{y}_t$  est donné par l'équation 5.9.

$$\bar{y}_t = \sum_{k=1}^{10} ms_{kt} \cdot y_{kt} \quad (5.9)$$

#### La politique d'éco-taxe

Comme dans l'analyse réalisée dans le chapitre 4, l'éco-taxe est entièrement répercutée par les firmes  $k$  sur leur prix de vente  $x_{kt}$ . Le niveau de l'éco-taxe  $T$  est par hy-

pothèse exactement égal au niveau des externalités perçues par les pouvoirs publics. Ainsi, trois situations sont possibles selon que  $T$  porte sur l'externalité liée à la matérialité du service, sur celle issue de sa mobilité ou bien sur les deux sources d'externalités à la fois ; soit respectivement  $T = v_{kt}$ ,  $T = f(m_{kt})$  et  $T = y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt}$ . L'éco-taxe que nous envisageons va donc avoir pour effet de modifier l'échelle des prix. Cet effet est résumé dans le tableau 5.2.

	Prix $x_{kt}$
Sans éco-taxe, $T = 0$	$x_{kt} \in [1; 10]$
$T = v_{kt}$	$x_{kt} \in [2; 20]$
$T = f(m_{kt})$	$x_{kt} \in [2; 20]$
$T = y_{kt}$	$x_{kt} \in [3; 30]$

TABLE 5.2 – Effet de l'éco-taxe sur l'échelle des prix

### La politique d'information des consommateurs

Sans politique d'information, les externalités  $y_{kt}$  ne sont pas évaluées par les consommateurs et leurs tolérances aux externalités  $y_{it}$  sont inactives et statiques. La politique d'information est un moyen de corriger ce manque de clairvoyance. Comme pour l'éco-taxe, l'information peut porter sur  $v_{kt}$ ,  $f(m_{kt})$  ou  $y_{kt}$ .

Une telle politique peut avoir un effet direct sur les agents les plus sensibles aux externalités, et un effet indirect via l'influence que peuvent exercer les consommateurs écologiques sur ceux qui ne le sont pas encore.

- **L'effet direct** : Nous définissons un seuil  $E$  tel que si  $y_{it} \leq E$ , l'individu  $i$  tient compte dans sa décision d'achat de l'information qu'il a reçue. Par ailleurs, cette tolérance  $y_{it}$  devient dynamique grâce à l'équation 5.6, s'il existe des consommateurs écologiques dans le voisinage de l'agent  $i$ .
- **L'effet indirect** : Les consommateurs  $j$  tels que  $y_{jt} \geq E$  peuvent eux aussi devenir écologiques si  $n_t \geq K$ , avec  $n_t$  le nombre de voisins écologiques et  $K$  le nombre minimum de voisins nécessaires pour influencer les agents  $j$ .

## 5.4.2 Résultats des simulations<sup>14</sup>

Chaque simulation dure 1000 périodes et les politiques environnementales sont introduites en  $t = 200$ . En raison des paramètres  $E$  et  $K$ , une très grande variété de scénarios sont possibles. Ainsi, pour chacun des trois niveaux d'information des pouvoirs publics sur les externalités ( $v_{kt}$ ,  $f(m_{kt})$  ou  $y_{kt}$ ), les 41 cas de figure représentés dans le tableau 5.3 ont été calculés, soit un total de 123 scénarios. Chacun d'entre eux a été répété 20 fois, les résultats présentés sont des moyennes calculées sur ces 20 répétitions.

TABLE 5.3 – Récapitulatif des scénarios simulés pour chacun des trois niveaux d'information possibles des pouvoirs publics sur les externalités des designs de produits

	Information policy				information and eco-tax				eco-tax
	K=0	K=1	K=2	K=3	K=0	K=1	K=2	K=3	
E=1									
E=2									
E=5									
E=7									
E=10									

Les résultats des différents scénarios sont présentés dans les figures 5.6 à 5.9. Afin de faciliter leur interprétation, nous classons les différents scénarios en deux catégories : les situations où la diffusion des comportements parmi les consommateurs est difficile ( $E \leq 5$  &  $K \geq 2$ , courbes noires), et celles où cette diffusion est aisée (les autres cas, indiqués par des courbes rouges).

### Résultats lorsque les politiques ne portent que sur la pollution matérielle

Ces résultats sont reportés sur la figure 5.6. La comparaison des parties (a) et (b) nous indique que l'usage d'une éco-taxe permet d'atteindre un niveau d'externalités moyennes  $\bar{y}_t$  plus faible qu'avec la seule politique d'information. Sur les deux parties de la figure, ce sont globalement les situations à faible capacités réactives de la population ( $E \leq 5$  &  $K \geq 2$ , courbes noires) qui permettent d'atteindre le plus faible niveau d'externalités. La partie (b) de la figure révèle que dans ce cas

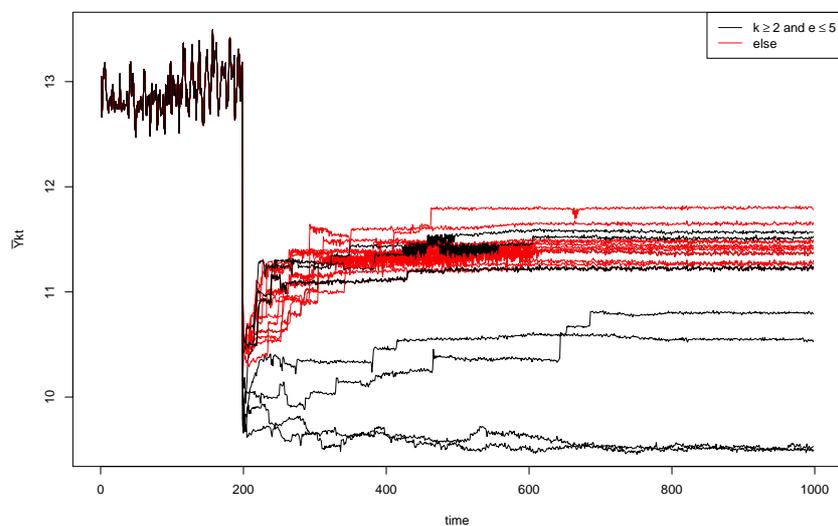
14. Je remercie Thomas Delclite, doctorant au Clersé, pour son aide dans la représentation graphique des résultats de cette section.

précis, l'écart-type de  $\bar{y}_t$  est particulièrement élevé.

Ces deux phénomènes (efficacité supérieure et écart-type important pour  $E \leq 5$  &  $K \geq 2$ ) s'expliquent par l'action de l'équation 5.6, qui œuvre plutôt dans le sens d'une homogénéisation et d'une "moyennisation" des préférences des agents-consommateurs. Plus particulièrement, lorsque la diffusion des comportements écologiques est difficile, l'écart-type de  $\bar{y}_t$  nous révèle qu'il existe différents designs dominants à long terme, designs qui ont des caractéristiques écologiques opposées. Cette situation apparaît préférable à celle où un dominant design émerge, car celui-ci serait compatible avec des préférences moyennes au sujet des externalités. En effet, à mesure que les comportements écologiques se diffusent, des individus de moins en moins concernés par les externalités prennent part au débat public. Leur rétroaction sur les préférences des agents déjà écologiques vient tempérer la réticence de ces derniers à accepter des externalités modérées, ce qui fait disparaître la niche de marché dans les produits très écologiques. Autrement dit, nos simulations nous indiquent qu'il peut être préférable de faire face à une population bi-polaire, avec d'une part des consommateurs très écologiques, et d'autre part des consommateurs qui ignorent la dimension environnementale des produits qu'ils achètent.

L'éco-taxe permet, quant à elle, de faire émerger à coup sûr un dominant design plutôt écologique. En effet, une éco-taxe permet de rendre moins chers les produits écologiques. Elle rend donc les préoccupations environnementales des consommateurs aisés compatibles avec la recherche des prix bas de ceux qui le sont moins. En ce sens, cette politique dispose d'un avantage considérable sur l'information des consommateurs. Ragot (2000 [119]) confirme cette efficacité d'une taxe environnementale. Dans le cadre d'un modèle d'équilibre général calculable à produits hétérogènes, il montre en effet qu'une éco-taxe peut modifier la structure du panier de consommation de l'agent individuel grâce à la baisse du prix relatif qu'elle implique pour les produits les plus écologiques.

(a)



(b)

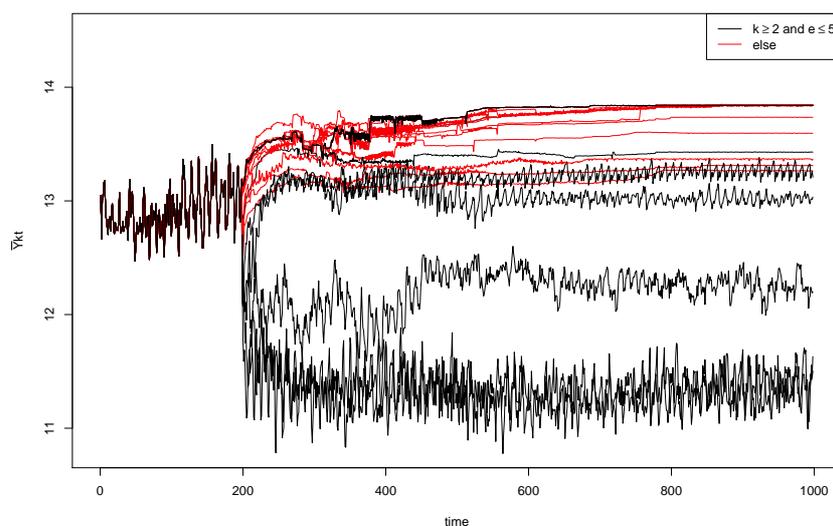


FIGURE 5.6 – Politiques sur la matérialité  $v_{kt}$ . Évolution de l'indice de pollution  $\bar{y}_t$  (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information.

### Résultats lorsque les politiques ne portent que sur la pollution issue de la mobilité

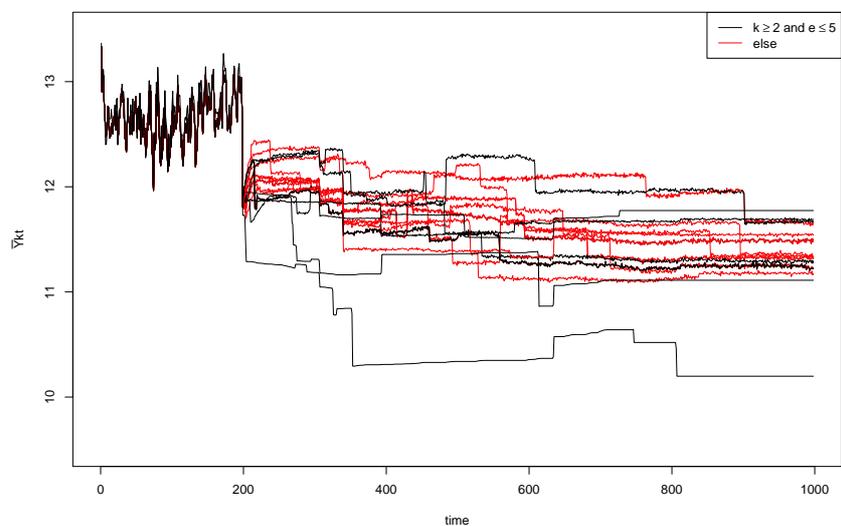
La figure 5.7 présente les résultats des simulations conduites sous l'hypothèse de politiques taxant et/ou informant sur les externalités  $f(m_{kt})$  liées à la mobilité du

produit. La distinction des résultats entre population à diffusion facile et difficile apparaît moins pertinente à la vue de cette figure.

On observe toujours que l'ajout d'une éco-taxe permet de réduire l'écart-type de  $\bar{y}_t$ , et qu'elle réussit donc toujours à faire émerger un dominant design plutôt écologique. La partie (b) de la figure révèle que les caractéristiques cognitives de la population jouent, encore une fois, un rôle important dans la réussite d'une politique d'information, mais contrairement à l'information sur  $v_{kt}$ , on observe ici que la diffusion difficile ( $E \leq 5$  &  $K \geq 2$ ) produit les plus mauvais résultats. Nous expliquons cette relation inverse par le lock-in des consommateurs dans un design de mobilité du client  $z_{kt}$  avant l'instauration de la politique d'information. Puisque  $m_{kt} \geq z_{kt}$ , les possibilités de design écologique sont réduites pour les firmes dans le domaine de la mobilité, si bien qu'il devient préférable de faire face à des consommateurs "moyens" qu'à une population hétérogène, mais prête à accepter des externalités fortes.

La partie (a) montre quant à elle que l'éco-taxe est un bon moyen de limiter l'impact des caractéristiques cognitives des consommateurs sur le niveau moyen d'externalités  $\bar{y}_t$ .

(a)



(b)

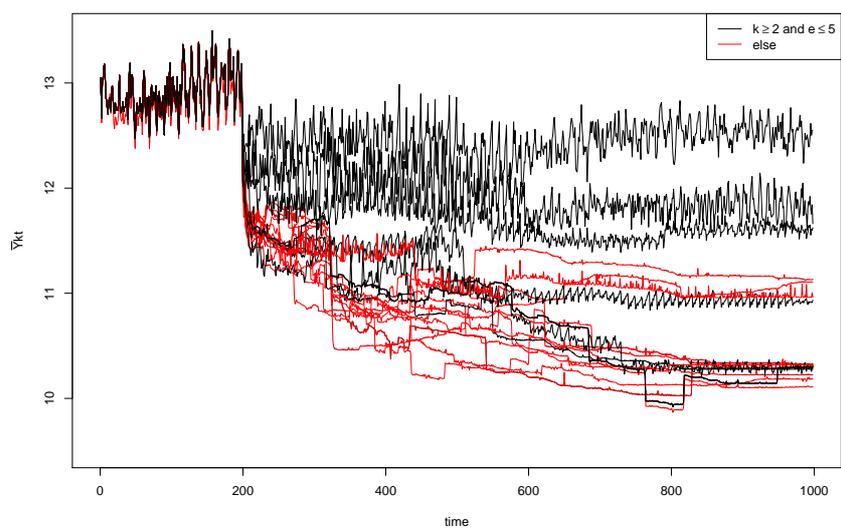


FIGURE 5.7 – Politiques sur la mobilité  $f(m_{kt})$ . Évolution de l'indice de pollution  $\bar{y}_t$  (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information.

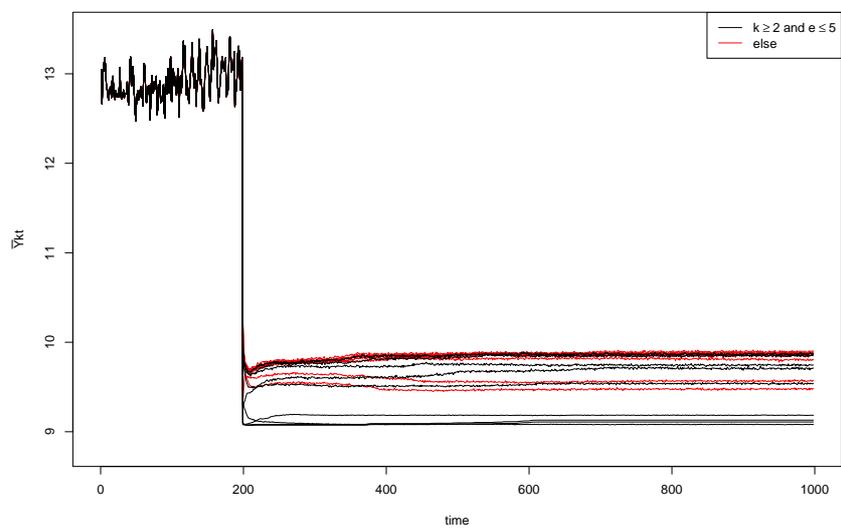
### Résultats lorsque les politiques portent sur toutes les sources d'externalités

Bien entendu, ce scénario (figure 5.8) permet d'atteindre des niveaux d'externalités plus faibles que les deux cas de figure précédents. Les enseignements qui

ressortent des parties (a) et (b) sont les mêmes que lorsque les politiques portent sur  $f(m_{kt})$ , démontrant l'importance de la prise en compte de toutes les sources de mobilité lorsqu'on aborde la pollution des productions tertiaires.

La figure 5.9 montre l'évolution de  $\bar{y}_t$  lorsqu'on n'utilise que l'éco-taxe sur  $v_{kt}$ ,  $z_{kt}$  et sur  $y_{kt}$ . On observe des résultats plus significatifs lorsque la taxe porte sur la matérialité plutôt que sur la mobilité, ce qui confirme un lock-in pré-existant des consommateurs sur la question de la mobilité. Enfin, le niveau le plus bas d'externalités est atteint lorsque l'éco-taxe porte sur toutes les sources d'externalités. On remarquera que c'est ce dernier cas qui produit le moins de pollution, tous scénarios confondus. Cette remarque jette un doute sur l'efficacité réelle des campagnes d'informations des consommateurs.

(a)



(b)

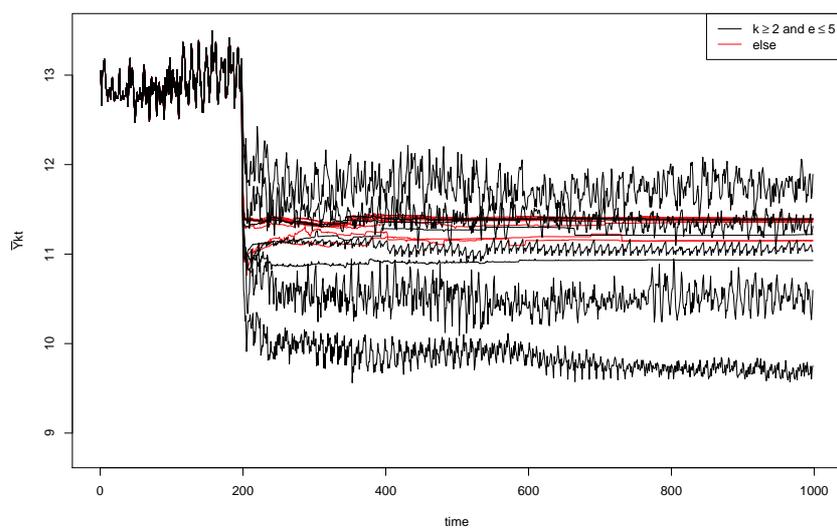
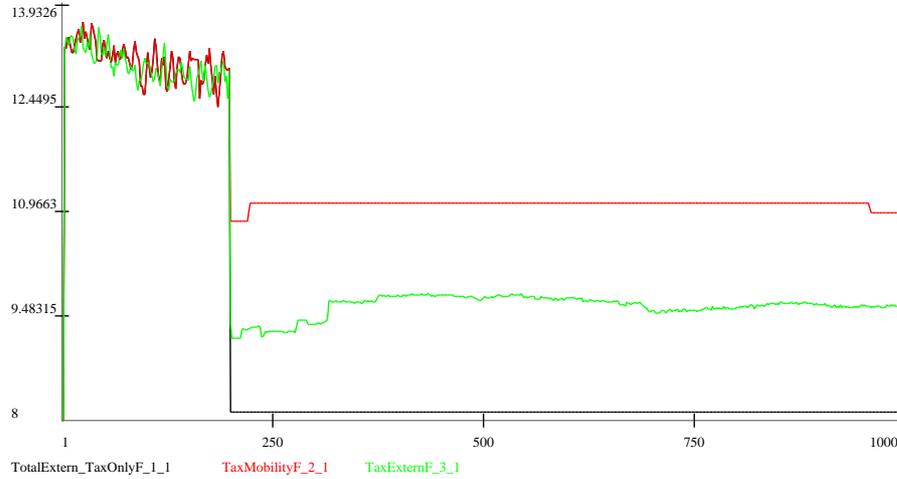


FIGURE 5.8 – Politiques sur toutes les externalités  $y_{kt}$ . Évolution de l'indice de pollution  $\bar{y}_t$  (a) avec éco-taxe et politique d'information, (b) avec seulement la politique d'information.

FIGURE 5.9 – Évolution de l'indice de pollution  $\bar{y}_t$  avec seulement l'éco-taxe appliquée sur  $v_{kt}$  (courbe verte), sur  $z_{kt}$  (courbe rouge) et sur  $y_{kt}$  (courbe noire).



## 5.5 Conclusion

Dans le chapitre 4, nous avons montré que la croissance d'une économie tertiaire peut être compatible avec une dynamique de réduction des émissions polluantes, à condition que les entreprises opèrent un changement de trajectoire technologique en faveur d'un accroissement de leur productivité environnementale plutôt que de leur productivité du travail. Dans le présent chapitre, nous avons examiné dans quelle mesure une politique publique peut provoquer un tel changement. De plus, dans la mesure où les secteurs de services assurent la majeure partie de la production des économies tertiaires, et aussi parce qu'ils sont capables d'innover (cf. chapitre 3), on se demande si une politique publique peut stimuler et orienter l'éco-innovation des firmes de services.

Pour tenter d'apporter une réponse plausible à ces questions, nous avons construit un modèle d'éco-innovation intégratif, c'est-à-dire valable aussi bien pour les firmes industrielles que pour les firmes de services.

Au fil des chapitres précédents, nous avons pu identifier deux obstacles à l'éco-

innovation, à savoir le verrouillage des consommateurs dans une logique consumériste, et le verrouillage des entreprises dans une trajectoire technologique et/ou un design de produits a-écologique(s). En nous appuyant sur la vision non-linéaire de l'innovation proposée par Kline et Rosenberg (1986 [90]), nous avons lié ces deux obstacles (demande et technologie) dans la conception de notre modèle d'éco-innovation. Ainsi nous avons représenté la dimension technologique du problème d'éco-innovation de la firme par un ensemble limité de designs possibles pour ses produits, tandis que nous avons modéliser la contrainte de demande par un réseau de consommateurs dont les préférences des membres évoluent en fonction d'un jeu d'influences interpersonnelles. Ces préférences donnent lieu à une évaluation de la "performance" des différents designs, performance que les firmes vont chercher à maximiser et qui peut aboutir à leur verrouillage dans des designs peu écologiques.

Nous avons testé l'effet de deux politiques publiques sur le choix de design des entreprises : une éco-taxe sur le produit et une information des consommateurs sur les externalités des produits qu'ils consomment. Plusieurs enseignements ressortent de nos exercices de simulation. D'abord, l'éco-taxe apparaît beaucoup plus efficace que l'information des consommateurs, car elle ne dépend pas des caractéristiques cognitives de la population des consommateurs. Il semble par ailleurs qu'une éco-taxe soit en mesure de produire un changement de trajectoire des entreprises, en termes de designs des produits, favorable à l'environnement. Cette observation renforce la conclusion formulée dans le chapitre 4 sur les possibilité d'un découplage croissance-pollution dans une économie tertiaire, d'autant plus que nous montrons que les éco-innovations peuvent aussi survenir dans les secteurs de services.

Un résultat général ressort aussi de nos simulations. Il semble en effet que si une politique d'information porte sur une externalité liée à une caractéristique technique du produit qui est déjà prise en compte par les consommateurs, alors il vaut mieux chercher à faire émerger un dominant design "moyennement" écologique. Dans un tel cas de figure, un dominant design très écologique est en effet peu probable puisque les consommateurs ont déjà fait émergé un "dominant design". À l'inverse, si la politique

d'information porte sur une externalité liée à une caractéristique du produit qui n'est pas déjà prise en compte par les consommateurs, alors il vaut mieux rechercher la coexistence de plusieurs designs de produits plus ou moins écologiques. Il faut alors entretenir un marché de niche dans les produits les plus écologiques. Ces conclusions découlent de la tendance à l'homogénéisation, autour d'un point de vue moyen, des préférences et des opinions des individus en interaction (French, 1956 [53] ; Friedkin, 1986 [56]).

# Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons tenté de fournir une explication au phénomène, à priori paradoxal, de la tertiarisation polluante. Selon-nous, ce phénomène s'explique par le comportement adaptatif des agents économiques : face à la relative saturation de la demande de biens de consommation lors de la tertiarisation de l'économie, les firmes industrielles sont tentées d'adopter des stratégies d'obsolescence planifiée, c'est-à-dire de développement de l'aspect esthétique des produits et de réduction de leur durée de vie. Ces stratégies permettent d'accroître le rythme de renouvellement des achats des consommateurs, tout en produisant un changement de culture des individus, qui passent rapidement de l'ascétisme à la consommation démonstrative.

Malgré ce cercle vicieux, croissance et environnement ne sont pas nécessairement des objectifs incompatibles dans une économie de services. Les simulations multi-agents que nous avons réalisées nous ont en effet permis d'établir les résultats suivants :

1. Une politique de taxe environnementale peut inciter les entreprises à adopter des designs de produits plus écologiques.
2. Tout comme les firmes industrielles, les firmes de services sont capables d'innovations environnementales.
3. Une trajectoire technologique favorable à l'innovation environnementale peut, dans une économie où les services sont générateurs de gains de productivité, permettre un découplage croissance-pollution.

La validité de ces conclusions optimistes repose sur celle des modèles utilisés. Deux méthodes différentes peuvent être adoptées pour tester la qualité d'un mo-

dèle multi-agents (Pyka et Fagiolo, 2007 [118]). Une méthode ex-ante, c'est-à-dire mise en œuvre pendant la phase de conception du modèle, consiste à construire ce dernier uniquement à partir d'hypothèses réalistes quant au comportement des agents individuels. Nous avons parfois eu recours à cette méthode dans les chapitres 2 et 5. Ainsi, dans le modèle élaboré dans le chapitre 2 où les algorithmes d'achat des consommateurs ont été conçus à partir de travaux qualitatifs de sociologie de la consommation (Packard, 1960 [108]) et d'histoire de l'art (Whiteley, 1987 [149]; Meikle, 2001 [97]). De même, dans le chapitre 5, la dynamique des préférences des consommateurs est fondée sur des travaux de sociologie (Friedkin, 1986 [56]; French, 1956 [53]), afin de garantir un comportement plausible des consommateurs. La seconde méthode de validation d'un modèle multi-agents est appliquée ex-post, c'est-à-dire après la construction du modèle. Elle consiste à tester la capacité de ses variables agrégées à reproduire, en termes statistiques, des faits stylisés réels. Nous avons adopté cette perspective dans le modèle de croissance construit et utilisé dans les chapitres 3 et 4. Ainsi, par exemple, nous avons montré que certaines des fluctuations du PIB produites par le modèle peuvent être interprétées comme des cycles d'affaires.

Ces stratégies de validation renforcent la confiance que l'on peut avoir dans les modèles utilisés, mais elles ne doivent pas faire oublier qu'un modèle de simulation ne constitue pas une démonstration ayant un degré d'universalité comparable à celui d'un théorème mathématique. En effet, tout exercice de simulation fait intervenir des paramètres avec des valeurs particulières, des fonctions mathématiques totalement spécifiées et, dans le cas précis des simulations multi-agents, des règles de comportement pré-déterminées et spécifiques aux agents. Plus généralement, tout modèle dynamique rencontre le problème important de l'équivalence temporelle entre une période de calcul du modèle et une unité temporelle réelle. Ainsi par exemple, l'usage du filtre de Baxter-King dans le chapitre 3 repose sur l'hypothèse qu'une période du modèle correspond à un trimestre réel. Cette hypothèse nous semble peu vraisemblable.

Cette question de l'équivalence temporelle en appelle une autre dans le cas des politiques environnementales : celle du délai de réaction des agents et de la transition de l'économie vers une production plus écologique. En effet, notre modèle d'innovation environnementale du chapitre 5 suggère, certes, qu'une politique d'éco-taxe peut inciter les entreprises à adopter un design plus écologique pour leurs produits, mais la période de transition vers un tel design peut être, dans la réalité, beaucoup trop longue (par exemple, une période du modèle peut très bien représenter plusieurs dizaines d'années). Nous pensons donc que la conception de modèles de simulations à temporalité précise devrait constituer un élément important de validation des modèles. Il demeure néanmoins que l'intérêt de la simulation multi-agents réside surtout dans sa capacité à faire apparaître des phénomènes émergents, et donc à mettre en lumière l'existence de processus parfois méconnus ou surprenants. C'est le cas notamment du modèle de ségrégation proposé par Schelling (1971 [128]) : indépendamment de la question du temps, le fait de montrer qu'une population d'individus plus ou moins tolérants conduit à la ségrégation raciale est déjà, en soit, un exercice intéressant.

Enfin, en dépit de nos réserves quant aux résultats des politiques environnementales dans les modèles que nous avons construits, cette thèse a permis de mettre en évidence l'importance de la recherche en économie des services pour l'économie de l'environnement. En effet, nous avons vu que l'hypothèse de services improductifs conduit à l'incompatibilité des objectifs de croissance et d'environnement, alors qu'ils ne paraissent plus contradictoires sous l'hypothèse de services productifs. De même, la question de l'innovation environnementale dans les services devrait faire l'objet d'études approfondies, car en l'absence de telles innovations, la pollution des firmes de services pourrait bien empêcher, à terme, toute dynamique de réduction des émissions polluantes.

# Bibliographie

- [1] Moses Abramovitz. The search for the sources of growth : areas of ignorance, old and new. *The Journal of Economic History*, 53(2) :217–243, 1993.
- [2] Cristiano Antonelli. *The Economics of Localized Technological Change and Industrial Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [3] Cristiano Antonelli and Michel Quéré. The governance of interactive learning within innovation systems. *Urban Studies*, 39(5-6) :1051–1063, 2002.
- [4] Robert Ayres, Leslie Ayres, and Benjamin Warr. Is the U.S. economy dematerializing? main indicators and drivers. In Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen, editors, *Economics of Industrial Ecology*, chapter 3, pages 57–93. MIT Press, 2004.
- [5] Richard Barras. Towards a theory of innovation in services. *Research Policy*, 15 :161–173, 1986.
- [6] William Baumol. Preface. In Jean Gadrey & Faïz Gallouj, editor, *Productivity, Innovation and Knowledge in Services*. Edward Elgar, 2002.
- [7] William J. Baumol. Macroeconomics of unbalanced growth : the anatomy of urban crisis. *The American Economic Review*, 57 :415–426, 1967.
- [8] William J. Baumol. Services as leaders and the leader of the services. In Jean Gadrey and Faïz Gallouj, editors, *Productivity, Innovation and Knowledge in Services*, chapter 7, pages 147–163. Edward Elgar, 2002.
- [9] William J. Baumol. On the increasing role of economic research in management of resources and protection of the environment. *The Annual Review of Resource Economics*, 2 :1–11, 2010.

- [10] William J. Baumol. The two-sided cost disease and its frightening consequences. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter 4, pages 84–92. Edward Elgar, 2010.
- [11] William J. Baumol, Sue Anne Batey Blackman, and Edward N. Wolf. *Productivity and American leadership : the long view*. The MIT PRes, 1994.
- [12] William J. Baumol, Robert E. Litan, and Carl J. Schramm. *Good Capitalism, Bad Capitalism, and the Economics of Growth and Prosperity*. Yale University Press, 2007.
- [13] William J. Baumol and Carl J. Schramm. Foreword. In Paul P. Maglio, Cheryl A. Kieliszewski, and James C. Spohrer, editors, *Handbook of Service Science*, pages ix–xi. Springer, 2010.
- [14] William J. Baumol and Edward N. Wolf. Feedback from productivity growth to r&d. *The Scandinavian Journal of Economics*, 85 :147–157, 1983.
- [15] Marianne Baxter and Robert G. King. Measuring business cycles : approximate band-pass filters for economic time series. *The Review of Economics and Statistics*, 81 :575–593, 1999.
- [16] Wilfred Beckerman. Economists, scientists, and environmental catastrophe. *Oxford Economic Papers*, 24(3) :327–344, 1972.
- [17] Wilfred Beckerman. Economic growth and the environment : Whose growth? whose environment? *World Development*, 20(4) :481–496, 1992.
- [18] Daniel Bell. *Vers la société post-industrielle*. Éditions Robert Laffont, 1976.
- [19] Mercedes Bleda and Marco Valente. Graded eco-labels : a demand-oriented approach to reduce pollution. *Technological Forecasting & Social Change*, 76 :512–524, 2009.
- [20] William Brock and Scott Taylor. Economic growth and the environment : A review of theory and empirics. In *Handbook of Economic Growth*, chapter 28. Elsevier, 2005.
- [21] Arthur F. Burns and Wesley C. Mitchell. *Measuring Business Cycles*. NBER (National Bureau of Economic Research), 1946.

- [22] Simona Cantono and Gerald Silverberg. A percolation model of innovation diffusion : the relationship between diffusion, learning economies and subsidies. *Technological Forecasting & Social Change*, 76 :487–496, 2009.
- [23] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Centralization vs. decentralization in a multi-unit organization : a computational model of a retail chain as a multi-agent adaptive system. *Management Science*, 46 :1427–1440, 2000.
- [24] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Organization of innovation in a multi-unit firm : coordinating adaptive search on multiple rugged landscape. In W. Barnett et al., editor, *Economic Complexity*, chapter 7, pages 189–214. Emerald Group Publishing Limited, 2004.
- [25] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Agent-based models of organizations. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd, editors, *Handbook of Computational Economics. Agent-Based Computational Economics*, chapter 26, pages 1273–1337. North-Holland, 2006.
- [26] Gregory B. Christainsen and Robert H. Haveman. Public regulation and the slowdown in productivity growth. *The American Economic Review*, 71 :320–325, 1981.
- [27] CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. séries sectorielles et analyses étendues. Technical report, CITEPA, 2011.
- [28] Carol Corrado, Charles Hulten, and Daniel Sichel. Intangible capital and u.s. economic growth. *The Review of Income and Wealth*, 55(3) :661–685, 2009.
- [29] Herbert Dawid. Agent-based models of innovation and technological change. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd, editors, *Handbook of Computational Economics. Agent-Based Computational Economics*, chapter 25, pages 1235–1272. North-Holland, 2006.
- [30] S. DeBruyn, J.C. van den Bergh, and J.B. Opschoor. Economic growth and emissions : reconsidering the empirical basis of environmental kuznets curves. *Ecological Economics*, 25 :161–175, 1998.

- [31] Jean-Claude Delaunay and Jean Gadrey. *Services in Economic Thought*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [32] Edward N. Denison. Pollution abatement programs : estimates of their effect upon output per unit of input, 1975-78. *Survey of Current Business*, pages 58–59, 1979.
- [33] Marc-Hubert Depret and Abdelillah Hamdouch. Quelles politiques de l’innovation et de l’environnement pour quelle dynamique d’innovation environnementale? *Innovations*, 1 :127–147, 2009.
- [34] Jean-Louis Dessalles and Denis Phan. emergence in multi-agent systems : cognitive hierarchy, detection, and complexity reduction part i : methodological issues. In Philippe Mathieu, Bruno Beaufile, and Olivier Brandouy, editors, *Artificial Economics*, chapter 147-159. Springer, 2006.
- [35] Jared Diamond. *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, 2006.
- [36] Faridah Djellal, Dominique Francoz, Camal Gallouj, and Faïz Gallouj. R&d in services. revisiting the definition of research and development in the light of the specificities of services. *Science and Public Policy*, 30 :415–429, 2003.
- [37] Faridah Djellal and Faïz Gallouj. *Measuring and Improving Productivity in Services. Issues, Strategies and Challenges*. Edward Elgar, 2008.
- [38] Faridah Djellal and Faïz Gallouj. Innovation dans les services et entrepreneuriat : au-delà des conceptions industrialistes et technologistes du développement durable. *Innovations*, 1 :59–86, 2009.
- [39] Faridah Djellal and Faïz Gallouj. The innovation gap and the performance gap in the service economies : a problem for public policy. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services, a Multidisciplinary Perspective*, chapter 27, pages 653–675. Edward Elgar, 2010.
- [40] Faridah Djellal and Faïz Gallouj. L’innovation dans les services. une innovation (plus) verte? In Sophie Boutillier, Faridah Djellal, Faïz Gallouj, Blandine Laperche, and Dimitri Uzunidis, editors, *L’innovation verte*. Peter Lang, 2012.

- [41] Giovanni Dosi. Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*, 11 :147–162, 1982.
- [42] Giovanni Dosi, Giorgio Fagiolo, Mauro Napoletano, Andrea Roventini, and Tania Treibich. Heterogeneous banks and technical change in an evolutionary model of endogeneous growth and fluctuations. Working Paper, january 2011.
- [43] Giovanni Dosi, Giorgio Fagiolo, and Andrea Roventini. An evolutionary model of endogenous business cycles. *Computational Economics*, 27 :3–34, 2006.
- [44] Giovanni Dosi, Giorgio Fagiolo, and Andrea Roventini. The microfoundations of business cycles : an evolutionary, multi-agent model. *Journal of Evolutionary Economics*, 18 :413–432, 2008.
- [45] Giovanni Dosi, Giorgio Fagiolo, and Andrea Roventini. Schumpeter meeting keynes : a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economics Dynamics and Control*, 34 :1748–1767, 2010.
- [46] Giovanni Dosi and Marco Grazzzy. Energy, development and the environment : an appraisals three decades after the "limits to growth" debate. In U. Cantner, A. Greiner, and T. Kuhn and A. Pyka, editors, *Recent Advances in Neo-Schumpeterian Economics*, chapter 2, pages 34–52. Edward Elgar, 2006.
- [47] Joshua M. Epstein and Robert Axtell. *Growing artificial societies. Social science from the bottom up*. Brooking Institution Press and MIT Press, 1996.
- [48] Sylvie Faucheux, Christelle Hue, and Isabelle Nicolai. L'éco-innovation : une opportunit'e pour l'avenir du développement durable? *Les ateliers de l'éthique*, 1(2) :42, 2006.
- [49] Jay W. Forrester. *Principes des systs*. Presses Universitaires de Lyon, 1980.
- [50] Jean Fourastié. *Le grand espoir du XXème siècle*. Gallimard, 1963.
- [51] Charlotte Fourcroy, Faïz Gallouj, and Fabrice Decellas. Energy consumption in service industries : challenging the myth of non-materiality. *Ecological Economics*, 2012.
- [52] Jean-Yves Fournier. Extraction du cycle des affaires : la méthode de baxter et king. *Économie et Prévision*, 5 :155–178, 2000.

- [53] John R.P. French. A formal theory of social power. *Psychological Review*, 63 :181–194, 1956.
- [54] Koen Frenken. *Innovation, Evolution and Complexity Theory*. Edward Elgar, 2006.
- [55] Koen Frenken, Luigi Marengo, and Marco Valente. Interdependencies, nearly-decomposability and adaptation. *Advances in Computational Economics*, 11 :145–165, 1999.
- [56] Noah E. Friedkin. A formal theory of social power. *Journal of Mathematical Sociology*, 12 :103–126, 1986.
- [57] Manuel Frondel, Jens Horbach, and Klaus Rennings. End-of-pipe or cleaner production? an empirical comparison of environmental innovation decisions across oecd countries. In Nick Johnstone, editor, *Environmental Policy and Corporate Behaviour*, chapter 5, pages 174–212. Edward Elgar, 2007.
- [58] Jean Gadrey. *L'économie des services*. La Découverte, 1992.
- [59] Jean Gadrey. La crise écologique exige une révolution de l'économie des services. *Développement durable et territoires*, pages 1–26, 2008.
- [60] Jean Gadrey. *Adieu à la croissance. Bien vivre dans un monde solidaire*. Alternatives économiques, 2010.
- [61] Faïz Gallouj. *Economie de l'innovation dans les services*. L'Harmattan, 1994.
- [62] Faïz Gallouj. *Innovation in the service economy : the new wealth of nations*. Edward Elgar, 2002.
- [63] Faïz Gallouj. Knowledge-intensive business services : processing knowledge and producing innovation. In Jean Gadrey and Faïz Gallouj, editors, *Productivity innovation and knowledge in services*, chapter 11, pages 256–284. Edward Elgar, 2002.
- [64] Faïz Gallouj and Faridah Djellal. Introduction : filling the innovation gap in the service economy - a multidisciplinary perspective. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter Introduction, pages 1–23. Edward Elgar, 2010.

- [65] Faiz Gallouj and Olivier Weinstein. Innovation in services. *Research Policy*, 26 :537–556, 1997.
- [66] Oded Galor. *Unified Growth Theory*. Princeton University Press, 2011.
- [67] Sylviane Gastaldo and Lionel Ragot. Croissance endogène et pollution : une approche fondée sur le comportement du consommateur. *Annales d'économie et de statistique*, 57 :25–48, 2000.
- [68] Jonathan Gershuny. *After Industrial Society ? The Emerging Self-Service Economy*. Mac Millan, 1978.
- [69] Zvi Griliches. Productivity, r&d, and the data constraint. *The American Economic Review*, 84 :1–23, 1994.
- [70] Gene Grossman and Alan Krueger. Environmental impacts of a north american free trade agreement. NBER Working Papers Series, November 1991.
- [71] Omar A. Guerrero and Robert L. Axtell. Using agentization for exploring firm and labor dynamics. a methodological tool for theory exploration and validation. In *Emergent Results of Artificial Economics*, chapter 4, pages 139–150. Springer, 2011.
- [72] Mitsutsugu Hamamoto. Environmental regulation and the productivity of japanese manufacturing industries. *Resource and Energy Economics*, 28 :299–312, 2006.
- [73] Rainer Hegselmann and Andreas Flache. Understanding complex social dynamics : a plea for cellular automata based modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/3/1.html>, 1998.
- [74] Rainer Hegselmann and Ulrich Krause. Opinion dynamics and bounded confidence. models, analysis and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/2.html>, 2002.
- [75] Rainer Hegselmann and Ulrich Krause. Opinion dynamics driven by various ways of averaging. *Computational Economics*, 25 :381–405, 2005.
- [76] Peter Hill. On goods and services. *Review of Income and Wealth*, 23 :315–338, 1977.

- [77] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992.
- [78] John H. Holland and John H. Miller. Artificial adaptive agents in economic theory. *The American Economic Review*, 81(2) :365–370, 1991.
- [79] IFEN. La tertiarisation de l'économie et la réduction des émissions de co2. Technical report, Ifen, 2004.
- [80] Adam B. Jaffe, Steven R. Peterson, Paul R. Portney, and Robert N. Stavins. Environmental regulation and the competitiveness of u.s. manufacturing : what does the evidence tell us? *Journal of Economic Literature*, 33 :132–163, 1995.
- [81] Marco A. Janssen and Wander Jager. An integrated approach to simulating behavioral processes : a case study of the lock-in of consumption patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/2/2/2.html>, 1999.
- [82] Marco A. Janssen and Wander Jager. Fashions, habits and changing preferences : simulation of psychological factors affecting market dynamics. *Journal of Economic Psychology*, 22 :745–772, 2001.
- [83] Marco A. Janssen and Wander Jager. Stimulating diffusion of green products. co-evolution between firms and consumers. *Journal of Evolutionary Economics*, 12 :2383–306, 2002.
- [84] Dale W. Jorgenson. Introduction. In Dale W. Jorgenson, editor, *The Economics of Productivity*. Edward Elgar, 2009.
- [85] Matthew E. Kahn. *Green cities. Urban growth and the environment*. Brooking Institution Press, 2006.
- [86] Stuart Kauffman. *The Origins of Order. Self Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, 1993.
- [87] Stuart Kauffman. *At Home in the Universe*. Oxford University Press, 1995.
- [88] Stuart Kauffman, José Lobo, and William G. Macready. Optimal search on a technology landscape. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 43 :141–166, 2000.

- [89] Robert Costanza Partha Dasgupta Carl Folke C. S. Holling Bengt-Owe Jansson Simon Levin Karl-Goran Maler Charles Perrings Kenneth Arrow, Bert Bolin and David Pimentel. Economic growth, carrying capacity and the environment. *Science*, 268 :520–521, 1995.
- [90] Stephen J. Kline and Nathan Rosenberg. An overview of innovation. In Ralph Landau and Nathan Rosenberg, editors, *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*, chapter 16, pages 175–306. The National Academy of Sciences, 1986.
- [91] Kelvin J. Lancaster. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy*, 74 :132–157, 1966.
- [92] Daniel A. Levinthal. Adaptation on rugged landscapes. *Management Science*, 43 :934–950, 1997.
- [93] Bart Los and Bart Verspagen. Localized innovation, localized diffusion and the environment : an analysis of reductions of co2 emissions by passenger cars. *Journal of Evolutionary Economics*, 19 :507–526, 2009.
- [94] James G. March. Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science*, 2 :71–87, 1991.
- [95] Tristan-Pierre Maury and Bertrand Pluyaud. Les ruptures de tendances dans la productivité par tête de quelques pays industrialisés. *Notes d’etudes et de recherches de la Banque de France*, 111, 2004.
- [96] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens. Rapport sur les limites à la croissance. In *Halte à la croissance?* Fayard, 1972.
- [97] Jeffrey L. Meikle. *Twentieth century limited. Industrial design in America, 1925-1939*. Temple University Press, 2001.
- [98] Ian Miles, Nikos Kastrinos, Kieron Flanagan, Rob Bilderbeek, Pim den Hertog, Willem Huntink, and Mark Bouman. Knowledge-intensive business series. users, carriers and sources of innovation, march 1995.

- [99] Leonard Nakamura. Is the u.s. economy really growing too slowly? maybe we're measuring growth wrong. *Federal Reserve Bank of Philadelphia Business Review*, March/ April :1–12, 1997.
- [100] Leonard Nakamura. Investing in intangibles : is a trillion dollars missing from gdp? *Federal Reserve Bank of Philadelphia Business Review*, Q4 :27–37, 2001.
- [101] Richard R. Nelson and Davide Consoli. An evolutionary theory of household consumption behavior. *Journal of Evolutionary Economics*, 20 :665–687, 2010.
- [102] M.E.J. Newman, D.J. Watts, and S.H. Strogatz. Random graph models of social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 :2566–2572, 2002.
- [103] Ikujiro Nonaka. A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization Science*, 5 :14–37, 1994.
- [104] William Nordhaus. Lethal model 2 : The limits to growth revisited. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2 :1–59, 1992.
- [105] Vanessa Oltra and Maïder Saint-Jean. Environmental innovation and clean technology : an evolutionary framework. *International Journal of Environmental Development*, 8 :153–172, 2005.
- [106] Vanessa Oltra and Maïder Saint-Jean. Innovations environnementales et dynamique industrielle. In Yannick Lung Murat Yildizoglu Marie-Claude Belis-Bergouignan, Bernard Julien, editor, *Industries, innovations, institutions. Éléments de dynamique industrielle*, chapter 7, pages 297–346. Presses Universitaires de Bordeaux, 2011.
- [107] Nicholas Oulton. Must the growth rate decline? *Oxford Economic Papers*, 53(4) :605–627, 2001.
- [108] Vance Packard. *The waste makers*. Penguin Books, 1960.
- [109] Theodore Panayotou. Demystifying the environmental kuznets curve : turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2 :465–484, 1997.
- [110] Theodore Panayotou. Economic growth and the environment. *Economic Survey of Europe*, 2 :45–72, 2003.

- [111] Luigi L Pasinetti. *Structural Change and Economic Growth. A Theoretical Essay on the Dynamics of the Wealth of Nations*. Cambridge University Press, 1981.
- [112] Pascal Petit. Les aléas de la croissance dans une économie fondée sur le savoir. *Revue d'Économie Industrielle*, 88 :41–66, 1999.
- [113] Pascal Petit. Growth and productivity in a knowledge-based service economy. In Jean Gadrey and Faïz Gallouj, editors, *Productivity, Innovation and Knowledge in Services*, chapter 5, pages 102–123. Edward Elgar, 2002.
- [114] Michael E. Porter and Claas Van der Linde. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *The Journal of Economic Perspectives*, 9 :97–118, 1995.
- [115] Edward C. Prescott. Needed : a theory of total factor productivity. *International Economic Review*, 39(3) :525–551, 1998.
- [116] Ilya Prigogine and Isabelle Stengers. *La nouvelle alliance, métamorphose de la science*. Gallimard, 1980.
- [117] Denise Pumain, Léna Sanders, and Thérèse Saint-Julien. *Villes et auto-organisation*. Economica, 1989.
- [118] Andreas Pyka and Giorgio Fagiolo. Agent-based modelling : a methodology for neo-shumpeterian economics. In Horst Hanusch and Andreas Pyka, editors, *Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*, chapter 29, pages 467–487. Edward Elgar, 2007.
- [119] Lionel Ragot. Fiscalité environnementale et sensibilité écologique des consommateurs. *Annales d'économie et de statistique*, (57) :49–81, 2000.
- [120] Klaus Rennings. Redefining innovation - eco innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32 :319–332, 2000.
- [121] Georges P. Richardson. *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*. Pegasus Communications, 1999.
- [122] Joanne Roberts, Ian Miles, Richard Hull, Jeremy Howells, and Brigitte Andersen. Introducing the new service economy. In Brigitte Andersen, Jeremy

- Howells, Richard Hull, Ian Miles, and Joanne Roberts, editors, *Knowledge and Innovation in the New Service Economy*, chapter 1, pages 1–6. Edward Elgar, 2000.
- [123] Everett M. Rogers. *Diffusion of innovations*. The Free Press, 1995.
- [124] Walt Whitman Rostow. *The stages of economic growth : a non-Communist manifesto*. Cambridge University Press, 1960.
- [125] Felix Roth, Anna Thum, and Mary O’Mahony. Intangible capital and productivity growth : a literature review with a special focus on the service industry. Working Paper, December 2010.
- [126] Pier Paolo Saviotti and John Stanley Metcalfe. A theoretical approach to the construction of technological output indicators. *Research Policy*, 13 :141–151, 1984.
- [127] Pier Paolo Saviotti and Andreas Pyka. Economic development by the creation of new sectors. *Journal of evolutionary economics*, 14 :1–35, 2004.
- [128] Thomas C. Schelling. Dynamics models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1 :143–186, 1971.
- [129] Joseph Schumpeter. *Théorie de l’évolution économique*. Dalloz, 1999.
- [130] Nemat Shafik and Sushenjit Bandyopadhyay. Economic growth and environmental quality. time series and cross-country evidence. World Bank Policy Research Working Paper WPS904, june 1992.
- [131] Robert M. Solow. Technical change and the aggregate production function. *The Review of Economics and Statistics*, 39 :312–320, 1957.
- [132] Robert M. Solow. We’d better watch out. The New York Times Book Review, 12 July 1987.
- [133] James Gustave Speth. *The Bridge at the Edge of the World*. Yale University Press, 2008.
- [134] Walter R. Stahel. The functional economy : Cultural and organizational change. In Deanna J. Richards, editor, *The Industrial Green Game : Implications for Environmental Design and Management*, pages 91–100. National Academy Press, 1997.

- [135] David Stern. Explaining changes in global sulfur emissions : an econometric decomposition approach. *Ecological Economics*, 42 :201–220, 2002.
- [136] David Stern. The rise and the fall of the environmental kuznets curve. *World Development*, 32 :1419–1439, 2004.
- [137] James Stock and Mark Watson. Business cycle fluctuations in u.s. macroeconomic time series. In J. B. Taylor and M. Woodford, editors, *Handbook of Macroeconomics*, volume 1, chapter 1, pages 3–64. Elsevier, 1999.
- [138] Leigh Tesfatsion. Agent-based computational economics : a constructive approach to economic theory. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd, editors, *Handbook of Computational Economics*, volume 2, chapter 16, pages 831–880. North-Holland, 2006.
- [139] Bruce S. Tether and Christiane Hipp. Knowledge intensive, technical and other services : patterns of competitiveness and innovation compared. *Technology Analysis and Strategic Management*, 14(2) :163–182, 2002.
- [140] UNEP. *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*. UNEP, 2011.
- [141] Ingrid Vaileanu-Paun and Sophie Boutillier. Économie de la fonctionnalité. une nouvelle synergie entre le territoire, la firme et la consommateur ? *Innovations*, 1(37) :95–125, 2012.
- [142] Marco Valente. Pseudo-nk : an enhanced model of complexity. LEM Working Paper Series, November 2008.
- [143] Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen. The interface between economics and industrial ecology : a survey. In Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen, editors, *Economics of Industrial Ecology*, chapter 2, pages 13–54. MIT Press, 2004.
- [144] Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen. The interface between economics and industrial ecology : a survey. In Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen, editors, *Economics of Industrial Ecology. Materials, Structural Change, and Spatial Scales*, chapter 2, pages 13–54. The MIT Press, 2004.

- [145] Hal R. Varian. *Analyse microéconomique*. De Boeck, 2004.
- [146] Peter M. Vitousek, Harold A. Mooney, Jane Loubchenco, and Jerry M. Mellilo. Human domination on earth's ecosystems. *Science*, 277 :494–499, 1997.
- [147] Friedrich August von Hayek. *La présomption fatale. Les erreurs du socialisme*. Presse Universitaire de France, 1993.
- [148] William L. Weber and Bruce Domazlicky. Productivity growth and pollution in state manufacturing. *The Review of Economics and Statistics*, 83 :195–199, 2001.
- [149] Nigel Whiteley. Toward a throw-away culture. consumerism, 'style obsolescence' and cultural theory in the 1950s and 1960s. *Oxford Art Journal*, 10 :3–27, 1987.
- [150] Sidney G. Winter. Schumpeterian competition in alternative technological regimes. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5 :287–320, 1984.
- [151] Ulrich Witt. Learning to consume—a theory of wants and the growth of demand. *Journal of Evolutionary Economics*, 11 :23–36, 2001.
- [152] Ulrich Witt. Symbolic consumption and the social construction of product characteristics. *Structural Change and Economic Dynamics*, 21 :17–25, 2010.
- [153] Edward N. Wolff. How stagnant are services? In Jean Gadrey and Faïz Gallouj, editors, *Productivity, Innovation and Knowledge in Services*, chapter 1, pages 3–25. Edward Elgar, 2002.
- [154] Stephen Wolfram. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311 :419–424, 1984.