UNIVERSITÉ PARIS I - PANTHÉON SORBONNE
U.F.R. SCIENCES ÉCONOMIQUES

Année 2005 N° attribué par la bibliothèque 2005PA010038

THÈSE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS I - PANTHÉON SORBONNE
Discipline : Sciences Économiques

présentée et soutenue publiquement par
Pascal DA COSTA
Le 9 décembre 2005

Titre :

Un progrès technique pour le développement durable ? Recherche sur l'intensité et la direction du changement technique propre

---

Directeur de thèse :

Monsieur Paul ZAGAMÉ,
Professeur à l'Université Paris I - Panthéon Sorbonne

Membres du Jury :

Mme. Katheline SCHUBERT (Présidente),
Professeur à l'Université Paris I - Panthéon Sorbonne

M. André GRIMAUD (Rapporteur),
Professeur à l'Université Toulouse I

M. Michel MOREAUX,
Professeur à l'Université Toulouse I

M. Sjak SMULDERS (Rapporteur),
Professeur à l'Université de Tilburg (Pays-Bas)

L'Université Paris I - Panthéon Sorbonne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Cette thèse a bénéficié de la participation financière de l'Agence de l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Énergie.

Résumé

Nous étudions les conditions pour que la croissance optimale d'une économie polluante puisse être durable. L'étude est menée dans le cadre de modèles de croissance fondée sur la R&D dans lesquels la production est à l'origine d'émissions polluantes qui sont déversées dans l'écosystème. La pollution et la R&D sont à l'origine d'effets externes qui affectent le fonctionnement de l'économie. Pour ce dernier phénomène, les connaissances (le facteur accumulable) qui sont utilisées dans le processus d'innovation sont non-rivales et la protection de l'innovateur par le brevet est à l'origine de monopoles temporaires. Dans une première partie, nous supposons que la fonction de production des innovations a un rendement unitaire sur le facteur accumulable. Avec cette hypothèse, conforme à la théorie de la croissance endogène, nous montrons dans quelle mesure la croissance durable peut être améliorée par la promotion des technologies propres. Dans une seconde partie, la prise en compte de la théorie de la croissance semi-endogène conduit à introduire un rendement inférieur à l'unité sur le facteur accumulable. Dans le cas des technologies propres, une condition de durabilité supplémentaire concerne la difficulté de la recherche qui ne doit pas être trop importante. Nous avons de plus envisagé l'hypothèse où il existe deux secteurs de recherche, l'un spécialisé dans l'amélioration de la productivité, l'autre dans la réduction de l'intensité polluante. Dans ce cas, les nouvelles conditions de durabilité portent sur l'existence d'externalités inter-sectorielles.

Abstract: *Technological Progress for Sustainable Development? An Inquiry into the Intensity and the Direction of Environmental Friendly Technical Change*

We study the conditions for optimal growth of polluting economy to be sustainable. This analysis is based on R&D growth models in which production gives rise to pollution emissions. Pollution and R&D lead to externalities that affect economic activities. For the latter, knowledge which is used as an input for innovations is nonrivalvous and patent secures the monopoly position resulting from innovation. In a first part we suppose that the function of production of innovations has unitary return on knowledge. This assumption is that of endogenous growth theory and we evaluate the fact that sustainable growth can be improved by promoting environmental friendly innovations. In the second part we take into account decreasing return on knowledge as the new theory of semi-endogenous growth does. When innovation is environmental friendly, a new necessary condition of sustainability arises on the difficulty in R&D which must be low enough. On the contrary, when two R&D sectors, one specialized in the improvement of quality and other in pollution intensity, new conditions for sustainability arise from the existence of intersectoral spillovers.

Discipline : Sciences Économiques.

Mots clefs : croissance durable, croissance endogène, croissance semi-endogène, R&D, progrès technique endogène, technologie propre, pollution, concurrence imparfaite.

Key Words: *sustainable growth, endogenous growth, semi-endogenous growth, R&D, endogenous technical change, environmental friendly innovation, pollution, imperfect competition.*

Laboratoire de Recherche :

ERASME - Laboratoire d'Économie, École Centrale Paris, Grande Voie des Vignes 92295 Châtenay-Malabry Cedex.

EUREQua - Université Paris I - Panthéon Sorbonne, Maison des Sciences Économiques, 106-112 boulevard de l'Hôpital 75647 Paris Cedex 13.

À mes parents

"*C'est une erreur que de chercher à élaborer une théorie en se fondant exclusivement sur les faits* [...] *car c'est la théorie que l'on adopte qui détermine les faits observables.*", Heisenberg (1971).

Remerciements

J'exprime ici mes profonds remerciements à toutes celles et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette recherche. Qu'ils se reconnaissent ici et soient assurés de ma gratitude.

À Monsieur le Professeur Paul ZAGAMÉ, tout d'abord, dont les conseils avisés m'ont évité le découragement. Mon directeur de thèse s'est toujours montré positif me concernant et m'a accordé le privilège de sa confiance. Qu'il trouve ici toute l'expression de mon respect et de ma reconnaissance.

Aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à la soutenance de cette thèse : Mme la Professeur Katheline SCHUBERT et MM. les Professeurs André GRIMAUD, Michel MOREAUX et Sjak SMULDERS.

Aux personnes qui ont contribué par leur aide à l'élaboration et à la rédaction de cette thèse, ensuite. Je pense à Francesco RICCI pour les riches discussions que nous avons eues et ses encouragements permanents, je sais que notre travail de recherche en commun aboutira un jour ; à Gilles KOLÉDA dont les conseils ont été précieux, et ce dès la seconde année du Magistère d'Économie de l'Université Paris I - Panthéon Sorbonne, et dont l'exigence m'a poussé à persévérer malgré les difficultés.

Au laboratoire d'économie de l'École Centrale Paris, ERASME, pour l'appui amical et constant de ses chercheurs. Je pense notamment à Jean DE BEIR, Baptiste BOITIER, Mouez FODHA, Oualid GARBHI, Patrick JOLIVET, Loïc POULLAIN, Florent PRATLONG pour l'aide qu'ils m'ont apporté à la relecture de la thèse ; également à Arnaud FOUGEYROLLAS et Pierre LE MOUËL ; enfin à l'ensemble des chercheurs rencontrés pendant mon doctorat.

À l'ensemble des participants au séminaire d'Économie de l'Environnement et des Ressources Naturelles d'EUREQua ainsi qu'à la responsable du séminaire Katheline SCHUBERT.

À l'ADEME et à l'École Centrale Paris, enfin, dont les financements m'ont permis de mener matériellement à bien mon travail.

À titre moins professionnel (parfois moins sérieux), je tiens également à remercier Flavie, ainsi que Jacquot, Paul, Georges, John, Richard, Linda, Pat, Équus, Élurus... J'ajoute ici la devise de Joseph SCHUMPETER que, je préfère le préciser, je ne partage pas en totalité :

> "*Je veux être le meilleur cavalier de Vienne, le meilleur* [censuré...] *d'Autriche et le meilleur économiste du monde*".

La petite histoire retient qu'à la fin de sa vie Schumpeter reconnaissait avoir atteint seulement deux des trois objectifs qu'il s'était initialement fixés.

Table des matières

Introduction générale **19**

Références bibliographiques 33

I La croissance endogène durable **37**

1 Le développement durable face aux nouvelles théories de la croissance **39**

Introduction sur la croissance durable fondée sur les innovations 39

1.1 Les théories de la croissance endogène 47

1.1.1 Les facteurs traditionnels de la croissance 47

1.1.2 Le capital immatériel de connaissances technologiques 49

1.2 Environnement et croissance ou les conditions d'obtention d'un développement durable endogène 55

1.2.1 La croissance durable fondée sur les facteurs traditionnels de croissance 55

1.2.2 Le modèle canonique de la croissance durable moderne 62

1.3 La croissance semi-endogène 67

1.3.1 L'invalidité de l'effet d'échelle et le rôle de la politique économique . 67

1.3.2 La croissance endogène sans effet d'échelle 69

1.3.3 Les avancées récentes des théories de la croissance 70

Conclusion sur les facteurs de la croissance 75

Références bibliograhiques 77

2 Technologie propre et croissance endogène 85

Introduction 85

2.1 Présentation du modèle 88

2.1.1 L'activité de recherche et développement 88

2.1.2 Les émissions polluantes 90

2.1.3 Le bien final homogène 93

2.2 L'optimum social 95

2.2.1 Le critère de la maximisation du bien-être 95

2.2.2 Le sentier optimal de croissance endogène durable 96

2.2.3 Les conditions nécessaires pour un développement durable 97

2.2.4 Quelques résultats numériques 100

2.3 L'économie décentralisée 107

2.3.1 Trois instruments économiques pour rétablir l'optimum 107

2.3.2 Le comportement des agents 108

2.3.3 L'équilibre décentralisé de long terme 113

2.4 La politique économique optimale pour un développement durable 116

2.4.1 Subventionner l'achat des biens intermédiaires 116

2.4.2 Subventionner ou taxer la recherche et développement 117

2.4.3 Taxer les émissions polluantes 117

2.4.4 L'existence d'une courbe environnementale de Kuznets 118

Conclusion 123

Annexe A. L'optimum 126

Annexe B. L'économie décentralisée 131

Références bibliograhiques 134

II La croissance semi-endogène durable **139**

3 Technologie propre et croissance semi-endogène **141**

Introduction 141

3.1 Présentation du modèle 144

3.1.1 Les consommateurs face à la pollution 144

3.1.2 La R&D face à la difficulté de la recherche 146

3.1.3 Le bien final homogène 152

3.2 L'optimum social 153

3.2.1 Le critère de la maximisation du bien-être 153

3.2.2 Le sentier optimal de croissance semi-endogène 154

3.2.3 L'existence d'un sentier de croissance semi-endogène durable 155

3.2.4 La dynamique transitionnelle 159

3.3 L'économie décentralisée 162

3.3.1 Trois instruments économiques pour rétablir l'optimum 162

3.3.2 Le comportement des agents 162

3.3.3 L'équilibre décentralisé de long terme 166

3.4 La politique économique pour un développement durable 168

3.4.1 Les instruments optimaux 168

3.4.2 La dynamique transitionnelle liée à la politique de second rang 172

Conclusion 179

Annexe C. L'optimum 182

Annexe D. L'économie décentralisée 188

Références bibliograhiques 192

4 Croissance durable et double échelle de différenciation verticale des biens intermédiaires 195

Introduction 195

4.1 Les consommateurs face à la pollution 200

4.1.1 Le comportement du ménage représentatif 200

4.1.2 Les émissions polluantes 201

4.2 Le secteur final 202

4.2.1 La technologie de production 202

4.2.2 Les demandes de facteurs de production 203

4.3 Le secteur intermédiaire 203

4.3.1 Le programme d'optimisation d'une entreprise intermédiaire 203

4.3.2 Les effets distorsifs de la taxe sur les émissions polluantes 204

4.4 La recherche et développement 205

4.4.1 La double échelle de différenciation 205

4.4.2 Destruction créatrice et concurrence 208

4.4.3 La qualité standard 217

4.4.4 L'intensité polluante 218

4.4.5 L'indice de qualité agrégée 218

4.4.6 Le comportement d'une firme de R&D spécialisée en qualité standard 219

4.4.7 Le comportement d'une firme de R&D spécialisée en intensité polluante 221

4.4.8 La détermination des variables de Poisson et des efforts de recherche 222

4.5 Le gouvernement 227

4.5.1 L'équilibre du budget de l'État 227

4.5.2 L'équilibre Emplois-Ressources 227
4.6 La dynamique de l'économie décentralisée 229
4.6.1 Les conditions de long terme du développement durable 229
4.6.2 La dynamique transitionnelle 230
4.7 La dynamique de l'optimum social 234
4.7.1 Les données macro-économiques pour le planificateur 234
4.7.2 Le critère de la maximisation du bien-être 236
4.7.3 La dynamique transitionnelle 236
4.8 La politique économique optimale 237
4.8.1 La taxe sur les émissions polluantes 237
4.8.2 L'aide à la recherche et développement 239
Conclusion 240
Annexe E. L'optimum 242
Annexe F. La politique de second rang 246
Références bibliograhiques 247

Conclusion générale 249

Références bibliograhiques 253

Bibliographie générale 255

Introduction générale

> "*Those writers* [Malthus, James Mill, Ricardo] *lived at the threshold of the most spectacular economic developments ever witnessed. Vast possibilities matured into realities under their very eyes. Nevertheless, they saw nothing but cramped economies, struggling with ever-decreasing success for their daily bread. They were convinced that technological improvement* [...] *would* [...] *fail to counteract the fateful law of decreasing returns* [...] *and that a stationary state of the economic process was near at hand*", Schumpeter (1954), page 571.

Existe-t-il des limites à la croissance économique ?

Pour Schumpeter, dans les économies industrialisées, nombreux sont ceux qui débattent de cette question tout en sous-estimant la capacité des économies à s'adapter, innover, évoluer. Historiquement, les ressources non-renouvelables servant à la production et à la consommation ont été les premières à être pressenties comme autant de limites potentielles à l'accroissement continu de la richesse. L'économiste Malthus (1798) décrivait dans son célèbre essai sur les principes de la population que la capacité de la race humaine à se multiplier allait, de façon tout à fait inexorable, buter sur la disparition des ressources naturelles ; l'équilibre social et économique se caractérisant alors par la misère et la privation. Pour Malthus, le rôle du progrès technique consiste à faire croître la production et le bien-être de façon transitoire avant qu'il ne s'évanouisse sous l'effet de l'épuisement et de la destruction des ressources. La solution pour éviter ce terrible équilibre de long terme passe par le contrôle démographique de la population, laquelle ne doit plus croître au-dessus de son niveau de subsistance. Opposé à cette théorie, John Stuart Mill (1862) voit, au contraire, le développement de la connaissance dans le domaine agricole comme un élément clé qui permettra de répondre au défi posé par les ressources naturelles limitées. En plus de considérer, comme ses contemporains, l'environnement comme un facteur de production, J. S. Mill reconnaît à l'environnement une valeur en tant que source de bien-être (aménités). Ce

dernier peut donc être considéré comme un économiste précurseur dans le domaine de l'économie de l'environnement.

La controverse resurgit après plus d'un siècle. Le rapport du club de Rome intitulé "Halte à la croissance" (Meadows, Meadows, Randers et Behrens 1972), prévoyait, pour le début du XXI^{e} siècle, une décroissance forte de l'industrialisation et de la taille de la population mondiale dues aux pollutions excessives, à la production agricole limitée, aux ressources minérales épuisées (les stocks d'or, de mercure, de pétrole, de zinc, d'argent...).[1] Les hypothèses du modèle reposaient sur une vision aprioriste des liens qui unissent ses différentes variables. En particulier, les prévisions en matière démographique ne reflétaient pas les tendances estimées à l'époque et reconnues par la communauté scientifique. Du point de vue des Sciences Économiques, le modèle du club de Rome n'avait aucun système de prix ni pour les ressources ni pour la production, ce faisant le retour du niveau des prix sur les quantités demandées n'était pas pris en compte. À la demande de l'Organisation des Nations Unies (ONU), Leontieff (1977) réalise l'exercice de prévision suivant : il reprend les hypothèses les plus pessimistes du rapport du club de Rome et y ajoute les effets macro-économiques des variations des prix sur les quantités demandées. Finalement, seules deux ressources minérales mineures sont en danger d'épuisement à l'horizon de la fin du XX^{e} siècle, les autres conclusions alarmistes du club de Rome, selon lesquelles la poursuite de la croissance économique est impossible, sont rejetées intégralement.

Face à la révélation des enjeux environnementaux modernes, dont le changement climatique anthropique et la perte de la biodiversité sont des symboles forts, le concept de développement durable s'est imposé. Bien qu'il apparaisse dès 1980 dans un rapport de l'*International Union for the Conservation of Nature*, il faut attendre sept années et le rapport Bruntland du *World Commission of Environment and Development* (WCED) (1987) pour que le concept trouve la définition qui assurera son succès :

> "*Le développement durable est celui qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins*".

[1] "*Au cas où aucun changement n'interviendrait dans notre système actuel, l'expansion démographique et l'expansion économique s'arrêteraient au plus tard au cours du siècle prochain*", Meadows et *al.* (1972).

L'idée est de concilier le bien-être intertemporel (dont la qualité de l'environnement fait partie) et la poursuite du développement économique.

De ce point de vue, le modèle de Dasgupta et Heal (1974) peut être considéré comme la première analyse économique du développement durable. L'objectif de l'étude est de trouver les conditions qui permettent de maintenir un niveau constant et strictement positif de la consommation par tête, sachant que les ressources non-renouvelables nécessaires à la production des biens seront un jour épuisées. Les conditions qui ont été mises en évidence pour un développement durable sont au nombre de trois : le capital est un bon substitut de la ressource non-renouvelable, l'épargne des ménages qui permet l'investissement en capital doit être suffisamment élevée et la population ne doit pas croître trop rapidement. Dans ces conditions, l'accroissement continu du capital permet de maintenir à lui seul la production à un niveau positif. Contrairement à ses successeurs, le modèle économique de Dasgupta et Heal ne prend pas en compte l'impact du progrès technique.

Les analyses suivantes introduisent différentes conséquences du progrès technique exogène : notamment la découverte de nouveaux gisements de la ressource fossile et de nouvelles technologies utilisant les ressources renouvelables comme l'énergie solaire ou éolienne (Dasgupta et Stiglitz 1981). Autant d'éléments nouveaux qui favorisent la poursuite de la croissance malgré les limites naturelles. À ce stade de l'analyse, l'apparition du progrès technique restant inexpliquée, la question de l'intensité et de la direction du progrès technique qu'il convient d'adopter pour la mise en œuvre du développement durable est encore ouverte.

À la fin des années 1980, l'endogénéisation du progrès technique est, du point de vue micro-économique, rendue possible grâce aux avancées qui ont été réalisées dans la compréhension de la concurrence imparfaite. Cette dernière représente, en effet, un mécanisme d'incitation à la recherche et développement (R&D), dans la mesure où ce secteur est caractérisé par des rendements d'échelle croissants lesquels ne peuvent pas être pris en compte dans le cadre de la concurrence parfaite. L'avènement des nouvelles théories de la croissance, ou théories de la croissance endogène, est d'autant plus im-

portant pour les enjeux liés au développement durable que ces théories prédisent une croissance non limitée dans le temps des niveaux de production et de consommation.

De ces différentes phases historiques (d'abord la théorie malthusianiste de la pré-révolution industrielle, puis la thèse sur l'état stationnaire au moment de la prise de conscience écologique des années 1970, enfin le concept de développement durable lié au réchauffement climatique symbolisant la période actuelle), nous tirons l'enseignement que l'utilisation des ressources naturelles amène à trois types de limites potentielles à la croissance. Premièrement, l'épuisement des ressources non-renouvelables nécessaires à la production des biens et des services rend impossible cette production en l'absence de substituts. Les ressources non-renouvelables peuvent être assimilées à des biens privés dont le stock s'épuise avec les prélèvements de façon inexorable. Deuxièmement, l'utilisation trop intensive des services rendus par les ressources renouvelables, empêchant leur régénération, imposerait un taux maximal d'utilisation de ces ressources qui viendrait limiter, en aval, la production des biens utilisant ces services rendus par l'environnement. Les ressources renouvelables (air pur, eau potable, etc.) ont une capacité naturelle d'assimilation qui les distinguent donc des ressources non-renouvelables (pétrole, gaz, etc.) dont le stock est fini. Troisièmement, si l'on intègre la qualité de l'environnement dans la mesure du bien-être économique, alors l'utilisation de l'environnement viendrait en elle-même réduire la possibilité d'accéder à un bien-être supérieur pour les générations futures. On considère généralement que la qualité de l'environnement se dégrade avec les pollutions émises à mesure que le système économique exploite les ressources naturelles. De plus, l'environnement a une capacité naturelle à assimiler une partie de ces pollutions ce qui permet de l'identifier à une ressource renouvelable. Notre travail de recherche concerne les ressources renouvelables et la pollution : les deuxième et troisième limites potentielles à la croissance. Nous considérons donc que l'environnement est une ressource, c'est-à-dire un facteur de production, qui a également un impact négatif sur l'utilité des ménages lorsqu'il est dégradé. Ces caractéristiques particulières font de l'environnement un bien public, ce qui légitime l'intervention de l'État pour rétablir l'optimalité économique.

Le débat actuel sur le lien environnement-économie

La méthodologie et le critère de bien-être utilitariste escompté que nous utilisons dans cette thèse rapprochent notre travail du courant néo-classique. Mais il existe d'autres courants[2] de recherche en économie de l'environnement dont le principal est celui de "l'économie écologique".

L'objectif du courant dit de l'économie écologique est d'appliquer à l'analyse économique les connaissances du système vivant. On parle du paradigme de la thermodynamique qui a été initié par Georgescu-Roegen (1971). Ainsi, et contrairement à Dasgupta et Heal (1974), Georgescu-Roegen pose l'existence de contraintes absolues s'opposant aux possibilités de substitution entre les ressources naturelles et le capital physique que peut offrir le progrès technique. Pour le courant de l'économie écologique, la croissance illimitée est impossible (voir Daly 1991 et Daly et Townsend 1993). L'économie est alors envisagée comme un système soumis à des entrées et à des sorties de matière qui se font soit sous forme de produits, soit sous forme de déchets. Le principe consiste alors à comptabiliser, en terme d'unité énergétique, ces différents flux de matières, sachant que "*rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*" (Lavoisier). Ainsi, cette approche a pour objectif d'obtenir des renseignements à la fois plus réels et plus généraux quant au niveau des consommations matérielles de nos sociétés et à l'évolution réelle de ce niveau. Il s'agit de tenir compte des flux physiques échangés entre l'économie et l'environnement (Ayres 2003). Cependant, cette approche lorsqu'elle est couplée à la théorie de l'évolution de Darwin permet de mettre à jour des résultats plus optimistes grâce au recours à la technologie et à l'innovation dans une optique schumpeterienne. Les contraintes écologiques nouvelles peuvent, en effet, être source de création de richesse (concept de coévolution de Noorgard 1984 1988 et 1994, Passet 1979).

Globalement, l'économie écologique conteste le critère de durabilité utilisé par certains

[2] Le courant dont l'origine se situe dans la théorie de la *Deep Ecology* est assez minoritaire. L'approche "écologique"de Naess (1973) postule que tous les éléments naturels possèdent une valeur intrinsèque et un droit inaliénable à l'intégrité. Aussi, une vie harmonieuse de l'homme sur terre passe par une diminution du nombre des êtres humains selon Devall et Sessions (1985) (des estimations chiffrées sur le nombre "optimal" d'hommes sur terre sont même données). Ce courant se rattache également à "l'hypothèse de gaia" de Lovelock (1988) qui stipule que la Terre est à l'image d'un organisme vivant, capable d'agir sur son environnement et de réagir à toute agression extérieure.

économistes néo-classiques qui consiste à rechercher la constance du stock de capital total, c'est-à-dire la somme des stocks de capital physique et de capital naturel. La conséquence de ce critère, dit de durabilité faible, est de maximiser les compensations marchandes liées à la dégradation de l'environnement. Autrement dit, la dégradation de la ressource naturelle peut être totale pourvue que suffisamment de capital physique ait été accumulé. En s'appuyant sur l'irréversibilité de certains phénomènes biophysiques (changement climatique, biodiversité, érosion des sols par exemples[3]), Pearce et Atkinson (1995) proposent un critère de durabilité forte qui consiste à retenir un capital naturel dont le stock est non-décroissant dans le temps. Nous utilisons ce critère dit de durabilité forte dans le cadre des modèles néo-classiques que nous développons dans la thèse. La prise en compte de ce critère dans notre recherche est rendue nécessaire pour discuter de certains faits stylisés, comme la "courbe environnementale de Kuznets" (relation en U-inversé entre la pollution et le niveau de revenu par tête). De plus, nous souhaitons démontrer que la croissance illimitée à long terme est possible même en ayant recours au critère de durabilité forte.

Un dernier courant de pensée développe le concept de "décroissance durable". Sa branche française s'appuie sur les travaux théoriques de Georgescu-Roegen (1979) et promeut la décroissance comme seule solution à la durabilité du système économique. Ainsi, pour Latouche (2003) :

> "*Il faut toute la foi des économistes orthodoxes pour penser que la science de l'avenir résoudra tous les problèmes et que la substituabilité illimitée de la nature par l'artifice est possible.* [...] *Contrairement à l'écologisme réformiste d'un Hermann Daly ou d'un René Passet, l'état stationnaire lui-même et la croissance zéro ne sont ni possibles, (ni souhaitables...).*"

Les économistes Smulders (1995 a) (1995 b) et Tavohnen (2000) apportent une réponse convaincante aux reproches formulés à l'encontre d'une croissance économique illimitée, en insistant sur le fait que l'économie n'est pas un monde dont la valeur est une mesure physique. Si le monde crée toujours plus de valeur économique alors il peut croître

---

[3] Sur ces différents points : "*Nature is bountiful, but it is also fragile and finely balanced. There are thresholds that cannot be crossed without endangering the basic integrity of the system. Today we are close to many of these thresholds; we must be ever mindful of the risk of endangering the survival of life on Earth.*", WECD (1987).

indéfiniment. Les "idées" sont à l'origine de cette création de valeurs. Les nouvelles théories de la croissance se concentrent sur ces principes. Pour certains modèles issus de ces théories, la croissance économique repose en fait sur une augmentation de la qualité des biens permettant à la production de rester constante en terme d'unité matérielle. Passet (1979) écrivait déjà :

> "*Alors que le développement des sociétés humaines s'était traduit jusqu'à ce jour en termes de productions matérielles de survie et de confort s'adressant à des besoins saturables, c'est un développement orienté vers des activités dont l'aspect matériel est secondaire et s'adressant aux besoins illimités de l'être qu'il convient désormais de concevoir*".

Sur le concept même de dématérialisation, on peut donc dire que le courant de l'économie écologique et le courant néo-classique se rejoignent.

Par ailleurs, de la théorie de l'économie publique, on tire le principe qu'il importe d'internaliser les effets externes dus aux pollutions et à la R&D. Dans les faits, le système économique actuel n'offre pas une incitation à l'innovation et au changement technologique bien adaptée aux objectifs du développement durable, même si les pouvoirs publics ont commencé à adopter des politiques de l'innovation et des entreprises à prendre des initiatives axées sur la diffusion des technologies moins polluantes.

Technologie et environnement

La technologie peut aider à découpler la poursuite du développement économique et la dégradation de l'environnement, mais ce découplage n'a rien d'automatique. Comme le changement technologique apparaît souvent en réponse à une incitation économique, les besoins qui ne se traduisent pas par une demande sur un marché n'induisent pas l'effet voulu. Il n'est donc pas acquis que les progrès techniques actuels répondent aux besoins réels. Mais leur rythme et leur direction peuvent être influencés par certaines interventions, par exemple la mise en place de marchés obligeant les pollueurs à payer pour les externalités dont ils sont à l'origine.

Pour les nouvelles théories de la croissance, la technologie est le fruit de processus identifiables (dépenses de R&D, amélioration des compétences de la main-d'œuvre

et modification de la manière dont les entreprises exploitent ces compétences) qui peut également produire des externalités à la fois positives et négatives. Les externalités positives sont induites par les connaissances nouvelles, qui se traduisent par des améliorations successives de la productivité, lesquelles favorisent la croissance et l'amélioration du bien-être. L'utilisation de nouvelles connaissances peut également engendrer des externalités négatives de nature concurrentielle et de nature sociale. Dans l'optique schumpeterienne, les entrepreneurs innovent en effet pour bénéficier d'un pouvoir de marché temporaire. Lorsqu'une innovation voit le jour, l'innovateur augmente ses profits jusqu'à ce qu'une autre entreprise innove, le remplace et bénéficie à son tour d'un pouvoir de marché. Il s'agit du processus de destruction créatrice. Schumpeter divise le processus qui conduit à l'adoption d'une nouvelle technologie en trois étapes : l'invention d'abord (phase de développement technique), la transformation de l'invention en innovation ensuite (phase de commercialisation), la diffusion de l'innovation enfin. Pour Jaffe, Newell et Stavins (2002), le côté demande, c'est-à-dire la phase de commercialisation de l'innovation, n'est pas assez étudiée par les modèles sur les technologies propres.

Il est aujourd'hui généralement admis que la nature de bien public de la connaissance fait que les entreprises industrielles ne consacrent pas assez d'investissements pour la création de savoir à un niveau optimal pour la collectivité. Mais les politiques favorisant ces investissements se heurtent à un certain nombre d'obstacles. L'un d'eux est le caractère diffus de la technologie en général et de l'innovation environnementale en particulier. Jusqu'à une période récente, on utilisait le plus souvent le terme "technologie environnementale" pour désigner des technologies et des équipements de dépollution (ou de "bout de chaîne") qui ont été créés pour satisfaire à des règlements (ou normes) établis afin de lutter contre la pollution de l'air, de l'eau, etc. Cependant, ces technologies se sont considérablement diversifiées. Cette diversification résulte, dans une large mesure, de l'évolution vers les technologies "moins polluantes", c'est-à-dire les technologies dont l'application a pour effet d'améliorer les performances environnementales. À long terme, les processus de production et les produits plus "propres" réduisent

le besoin de solutions de "bout de chaîne", ce qui modifie la structure de l'industrie environnementale et réduit les activités de "gestion de la pollution" (Organisation de Coopération et de Développement Économique - OCDE - 2000). En effet, des éléments statistiques indiquent que les entreprises évoluent vers une utilisation accrue de technologies moins polluantes : Lanjouw et Mody (1996) montrent que le secteur manufacturier américain, dans les domaines de l'air et de l'eau, a augmenté, durant les années 1980, ses dépenses de réduction de la pollution en faveur du "changement de procédé".

Objet et plan de la thèse

Cette thèse est une contribution à la théorie de la croissance durable fondée sur l'innovation. Nous avons cherché à déterminer, d'une part, les conditions qui permettent l'émergence de la trajectoire optimale et durable au sens fort (une croissance économique continue qui s'accompagne d'une amélioration de la qualité de l'environnement) et, d'autre part, le niveau des outils économiques qui autorisent la décentralisation de cette trajectoire. Pour cela, nous avons été amenés à envisager la nature complexe des inter-relations entre les activités de R&D et la qualité de l'environnement : l'application des nouvelles théories de la croissance à l'environnement est d'autant plus nécessaire que les modèles antérieurs de type AK (à la Rebelo 1991) ne permettent pas d'atteindre un sentier durable au sens écologique (Stockey 1998). Dans ces modèles, les dépenses vouées à l'amélioration continue de la qualité environnementale entraîne une augmentation du coût marginal du capital qui pousse les agents à réduire leurs investissements, rendant ainsi impossible la croissance des revenus. En revanche, en présence d'un progrès technique endogène (Romer 1986, Grossman et Helpman 1991, Aghion et Howitt 1992), le capital et la connaissance peuvent être dissociés : si le taux de croissance de cette dernière est suffisant, c'est-à-dire plus élevé que celui du capital, il est alors possible de réduire le flux d'émission polluante et donc le stock de pollution à long terme, tout en assurant une croissance continue de la production.

Dans une première partie (composée des chapitres 1 et 2), nous reprenons le cadre d'analyse des modèles de référence sur la croissance durable fondée sur l'innovation (Aghion et Howitt 1998, Grimaud 1999). Nous supposons donc que la fonction de production des innovations est linéaire par rapport au facteur accumulable, conformément à la littérature dans le domaine. Sous ces hypothèses, nous évaluons l'impact des technologies propres (c'est-à-dire les techniques de production plus productives et moins polluantes) sur la dynamique transitionnelle.

Dans le chapitre 1, en nous appuyant sur une revue de la littérature, nous présentons d'abord les différents facteurs de la croissance endogène (*learning by doing*, capital humain, R&D), ensuite les conséquences de ces facteurs sur la durabilité, enfin les recherches récentes sur la croissance économique. Concernant ce dernier point, la discussion porte sur l'hypothèse de linéarité de la fonction de production des innovations par rapport au facteur accumulable (la "connaissance"). Est-ce un élément empiriquement justifié ? Quelles sont les conséquences du relâchement de la linéarité ? Telles sont certaines des questions auxquelles tente de répondre ce premier chapitre. Nous pouvons dire ici que les modèles de croissance endogène font apparaître un effet d'échelle dans le taux de croissance de long terme, lequel est invalidé par certaines études empiriques. Pour Jones (1995 b), la non-linéarité dans la fonction de production des innovations remet en cause les principaux résultats de la théorie de la croissance endogène.[4] Le relâchement de la linéarité dans la fonction de production des innovations permet effectivement d'éviter la présence de l'effet d'échelle, mais il a également pour conséquence de rendre le taux de croissance de long terme indépendant de la politique économique. Dans ce cas, on ne parle plus de croissance endogène mais de croissance semi-endogène. Au contraire, pour Young (1998), Peretto (1998), Aghion et Howitt (1998) et Dinopoulos et Thompson (1998), maintenir les effets de la politique économique sur les taux de croissance de long terme est techniquement possible,

[4] À la manière de Malinvaud (1993) qui écrivait déjà que : "*Pour justifier leurs modèles les auteurs peuvent arguer de ce que des hypothèses de convenance ont l'avantage de donner de la transparence au traitement d'un problème analytiquement complexe. Mais l'argument ne vaut que si les résultats principaux ne sont pas sensibles au relâchement de ces hypothèses, qui jouent alors un rôle secondaire. Or il est à craindre que certaines hypothèses commodes soient aussi cruciales pour l'obtention des résultats annoncés*", page 186.

si on prend en compte le fait que la prolifération de la diversité des produits réduit l'efficacité de la R&D pour améliorer la qualité, puisque l'effort de R&D se dilue sur un plus grand nombre de secteurs. Cette idée force est à l'origine du renouveau de la croissance endogène, nommé "croissance endogène sans effet d'échelle". L'objet de ce premier chapitre est de poser la nature des discussions en cours et les conséquences sur la compréhension des mécanismes de la croissance à long terme. Nous verrons, dans la seconde partie de la thèse, des implications pour la durabilité.

Dans le chapitre 2, les conclusions des études théoriques de référence sont enrichies par la prise en compte des technologies propres. Notre analyse consiste à considérer les liens entre l'environnement et la croissance à l'aide d'un effet direct de la productivité des biens intermédiaires sur les émissions polluantes : autrement dit, aux biens intermédiaires plus productifs sont associés des émissions polluantes plus faibles. L'existence du développement durable repose sur des conditions qui concernent les préférences des agents et les caractéristiques techniques des activités de R&D. L'élasticité intertemporelle de substitution de la consommation doit être inférieure à l'unité pour que les profils optimaux de croissance du produit final et des émissions polluantes soient opposés. Avec cette première condition, conforme à l'analyse de référence de Stockey (1998), l'utilité marginale de la consommation est décroissante fortement et permet à la population de faire le choix de sacrifices dans sa consommation présente pour atteindre une croissance endogène durable. Parmi les conditions nouvelles de durabilité, l'existence d'un sentier de croissance équilibrée impose une limite au paramètre d'efficacité de la technologie pour réduire les émissions polluantes. Si cette limite est atteinte, la technologie suffit en elle-même pour accéder au sentier de croissance durable : aucun effort en terme de dépollution n'est nécessaire. Enfin, l'amélioration continue de l'environnement le long du sentier de croissance équilibrée est mise en œuvre grâce à la combinaison des trois politiques de la concurrence, de l'innovation et de l'environnement. Dans ce cadre, nous montrons à l'aide de la dynamique transitionnelle (à partir de l'équilibre de l'économie de laisser-faire vers l'équilibre optimal de long terme) que le sentier de croissance durable ne peut être atteint qu'au prix d'une

réduction initiale et temporaire de la production. Cette dynamique transitionnelle est simulée numériquement alors que les articles précédents décrivaient essentiellement les caractéristiques de l'équilibre de long terme (Aghion et Howitt 1998, Grimaud 1999, Grimaud et Ricci 2004). Le découplage en faveur de la qualité des biens intermédiaires (le capital intangible) conduit notre économie vers un sentier de croissance dématérialisée à long terme, donc favorable à la qualité de l'environnement.

Dans une seconde partie (composée des chapitres 3 et 4), nous revenons sur l'hypothèse fondatrice de la croissance endogène, portant sur la fonction de production des innovations, que certains économistes jugent aujourd'hui aprioriste. Nous analysons l'impact de l'introduction d'un rendement non-unitaire sur le facteur accumulable, conformément à la critique de Jones (1995 a).

Dans le chapitre 3, le cadre théorique développé au chapitre précédent est repris (une économie polluante dotée de technologies propres) en intégrant l'hypothèse d'un rendement inférieur à l'unité sur le facteur accumulable (la "connaissance"). Nous tentons de répondre aux questions suivantes : l'élimination de l'effet d'échelle par l'introduction des mécanismes de la croissance semi-endogène remet-elle en cause l'efficacité à long terme des politiques économiques de protection de l'environnement ? Les nouvelles externalités dans la recherche formalisées par Jones (1995 b) représentent-elles un frein à la diffusion des technologies propres et, par là même, un obstacle de taille au développement durable ? Notre modèle nous permet d'obtenir deux résultats principaux. Premièrement, les politiques incitatives en faveur de la protection de l'environnement ont un impact sur la croissance semi-endogène de long terme alors que les autres instruments (notamment les subventions à la R&D) n'en ont plus. En effet, la spécificité de la politique environnementale optimale réside dans l'augmentation constante de la taxe sur les émissions ce qui lui garantit un effet sur les taux de croissance (où de façon duale sur un marché des permis d'émissions négociables, avec l'augmentation continue du prix d'équilibre du droit à polluer à mesure que le nombre de quotas diminue). Mais, deuxièmement, l'existence d'une croissance durable dépend de conditions nouvelles sur les paramètres clés de la croissance semi-endogène avec en-

vironnement. En effet, le sentier de croissance peut connaître différents profils selon les valeurs, d'une part, de l'efficacité des technologies propres pour réduire les émissions et, d'autre part, des paramètres de difficulté dans la R&D. Pour une efficacité faible des technologies propres et une difficulté forte dans la R&D, nous montrons que la richesse et la qualité de l'environnement peuvent décroître ensemble. En définitive, malgré une exploitation forte du capital naturel (et la dégradation de la qualité de l'environnement qui en résulte), l'économie peut subir une décroissance irrémédiable de ses revenus de long terme. Nous montrons donc dans quelle mesure la décroissance économique n'a rien de durable d'un point de vue environnemental.

Dans le chapitre 4, nous étudions la direction du changement technique propre de manière plus précise. Cela nous conduit à déterminer le sentier de croissance durable d'une économie confrontée à l'arbitrage technologique entre deux types d'innovations : d'une part, les qualités des biens intermédiaires qui reflètent leur niveau de productivité (ce sont les innovations standards) et, d'autre part, les intensités polluantes des mêmes biens intermédiaires qui résument les avancées techniques dans le domaine de la protection de l'environnement. Les travaux théoriques récents étudient, dans un cadre différent, les conséquences de l'orientation du progrès technique sur la croissance des économies polluantes. Ils s'appuient sur une description de l'économie composée de deux secteurs de R&D distincts (Saint-Paul 2002 et Eriksson 2004) ou identiques (Ricci 2002 et Hart 2004).[5] Dans le premier cas, les deux dimensions distinctes de l'innovation sont relatives à l'efficacité du travail et à l'efficacité de l'énergie. Les deux activités de recherche concernent donc deux facteurs différents (travail et énergie). Dans le deuxième cas (pour Ricci 2002 et Hart 2004), le progrès technique a pour effet de fournir des biens plus productifs mais, aussi, moins polluants. Cette dernière caractéristique est, d'après les auteurs, de nature technologique ce qui les conduit à décrire les mécanismes de recherche endogène permettant d'orienter les dépenses en faveur d'une réduction de l'intensité polluante des biens simultanée à l'accroissement de sa produc-

[5] Alors que les secteurs de recherche chez Saint-Paul (2002), Ricci (2002) et Hart (2004) sont endogènes à long terme, le modèle d'Eriksson (2004) est basée sur deux secteurs de R&D de type semi-endogène, à la manière d'Acemoglu (2002) (2003).

tivité. Cette deuxième approche revient en fait à endogénéiser les technologies propres étudiées dans les chapitres 2 et 3 de cette thèse. Au contraire, notre contribution consiste à déterminer les mécanismes économiques qui permettent l'existence de biens intermédiaires différenciés sur deux caractéristiques (qualité standard et intensité polluante) qui peuvent chacune être améliorée grâce à des investissements distincts en R&D. Nous aboutissons aux résultats suivants. Dans l'optique d'une endogénéisation de l'intensité polluante sur la base d'une activité délibérée de recherche et développement, les pollueurs (qui produisent les biens intermédiaires) financent un effort de R&D en faveur d'une réduction des intensités polluantes à la condition que le prix du capital naturel incorpore l'ensemble des externalités négatives de pollution. De plus, au niveau macro-économique, l'économie fait plus de recherche pour les innovations standards que pour les intensités polluantes. Cela tient au fait que le mécanisme de destruction créatrice au niveau des technologies entraîne le remplacement des producteurs des biens intermédiaires par un nouveau producteur qui incorpore les innovations standards de dernière génération, alors que les intensités polluantes plus faibles sont, elles, incorporées par les producteurs déjà en place (qui sont incités à innover dans ce domaine grâce à une taxe sur les émissions polluantes). Le fait que l'incorporation d'une intensité de dernière génération n'entraîne pas le transfert de la rente de la firme intermédiaire en place détermine une contribution plus faible au financement de ce type d'innovation. Enfin, l'existence d'un sentier de croissance équilibrée repose sur la présence d'externalités de "connaissance" entre les deux secteurs de R&D. Ces externalités de connaissance entre les deux familles d'innovations (les innovations standards en qualité et les intensités polluantes) contraignent la R&D, et donc toute l'économie, à croître de façon semi-endogène à long terme. Cette dynamique est corroborée par les travaux théoriques de Li (2000) (2001) (2002) sur le lien entre la présence des externalités de connaissance inter-sectorielles et l'existence d'une croissance semi-endogène à long terme.

Références bibliographiques

[1] **Acemoglu, D.** (2002) "Directed Technical Change", *Review of Economic Studies* **69**, 781-809.

[2] **Acemoglu, D.** (2003) "Labor and capital-augmenting technical change", *Journal of the European Economic Association* **1** (1), 1-37.

[3] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[4] **Aghion, P. & P. Howitt** (1998) *Endogenous Growth Theory* The MIT Press.

[5] **Ayres, R.** (2003) "Dematerialized Growth: is it an oxymoron?", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[6] **Daly, H. E.** (1991) *Steady State Economics,* Island Press Washington D.C. 1977.

[7] **Daly, H. E. & K. N. Townsend** (1993) *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics,* MIT Press, Cambridge MA.

[8] **Dasgupta, P. & G. Heal** (1974) "The Optimal Depletion of Natural Ressources", *Review of Economic Studies* Symposium Issue, 3-28.

[9] **Dasgupta, P. & J. Stiglitz** (1981) "Resource Depletion Under Technological Uncertainty", *Econometrica* **49**, 85-104.

[10] **Devall, B. & G. Sessions** (1985) *Deep Ecology: Living as if Natural Mattered,* Peregrine Smith Books, Layton UT.

[11] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1998) "Schumpeterian Growth without Scale Effects", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 313-335.

[12] **Eriksson, C.** (2004) "Directed Techninal Change with Endogenous Supplies of Energy and Labor", document de travail *University of Uppsala*, Mars.

[13] **Georgescu-Roegen, N.** (1971) *The Entropy Law and the Economic Process,* Harvard University Press, Cambridge MA.

[14] **Georgescu-Roegen, N.** (1979) *Demain la décroissance : entropie - écologie - économie*, P. M. Favre.éds. Lausanne.

[15] **Grimaud, A.** (1999) "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management* **38**, 249-266.

[16] **Grimaud, A. & F. Ricci** (2004) "The Growth-Environment Trade-off : Horizontal versus Vertical Innovations", *The ICFAI Journal of Environmental Economics* **2** (1) Février, 7-40.

[17] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991) "Quality Leaders in the Theory of Growth", Review of Economic Studies **58** (1), 43-61.

[18] **Hart, R.** (2004) "Growth, Environment and Innovation: A Model with Production Vintage and Environmentally Oriented Research", *Journal of Environmental Economics and Management* **48** (3) Novembre, 1078-1098.

[19] **Jaffe, A., R. Newell & R. Stavins** (2002) "Environmental Policy and Technological Change", *Environmental and Resource Economics* **22** (1-2), 41-69.

[20] **Jones, C. I.** (1995 a) "Time Series Tests of Endogenous Growth Models", *Quarterly Journal of Economics* **110** (2) Mai, 495-525.

[21] **Jones, C. I.** (1995 b) "R&D-Based Models of Economic Growth", *Journal of Political Economy* **103** (4) Août, 759-784.

[22] **Lanjouw, J. O. & A. Mody** (1996) "Innovation and the International Diffusion of Environmental Responsive Technology", *Research Policy* **25**, 549-571.

[23] **Latouche, S.** (2003) "À bas le développement durable ! Vive la décroissance conviviale !" dans *Objectif décroissance*, M. Bernard et al. éds., Paris Parangon, 19-26.

[24] **Leontieff, W.** (1977) *The Future of the World Economy*, Oxford University Press, New-York.

[25] **Li, C. W.** (2000) "Endogenous vs. semi-endogenous Growth in a two R&D sector Model", *Economic Journal* **110**, 109-122

[26] **Li, C. W.** (2001) "On the Policy Implications of Endogenous Technological Progress", *Economic Journal* **111** (C) Mai, 164-179.

[27] **Li, C. W.** (2002) "Growth and scale effects: the role of knowledge spillovers", *Economics Letters* **74**, 177-185.

[28] **Lovelock, J.** (1988) *Ages of Gaia*, Oxford University Press.

[29] **Malinvaud, E.** (1993) "Regard d'un ancien sur les nouvelles théories de la croissance", *Revue Economique* **91**, 907-918.

[30] **Malthus, T.** (1798) *An essay on the principles of population as it affects the Future Improvement of Society*, London Ward Lock.

[31] **Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers & W. Behrens** (1972) *Halte à la croissance ; Rapport sur les limites de la Croissance*, Fayard, Paris.

[32] **Meadows, D. H., D. L. Meadows & J. Randers** (1992) *Beyong the limits: Global Collapse or a Sustainable Future,* London Earthcan Publications.

[33] **Mills, J. S.** (1862) *Principles of Political Economy*, New-York Appleton.

[34] **Moreaux, M.** (2002) "Increvables prophètes du malheur", *L' Expansion* (667) Septembre.

[35] **Naess, A.** (1973) "The shallow and the deep, long-range ecology movements: A summary", *Inquiry* **16**, 95-100.

[36] **Norgaard, R. B.** (1984) "Coevolutionary development potential", *Land Economics* **60**, 160-173.

[37] **Norgaard, R. B.** (1988) "Sustainable development: a co-evolutionary view", *Futures* **20**, 160-173.

[38] **Norgaard, R. B.** (1994) *Develoment Betrayed: The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future*, Routledge, London.

[39] **OCDE** (2000) *Innovation and the Environment. Sustainable Development*, OECD Publications, France.

[40] **Passet, R.** (1979) *L'économique et le vivant*, Payot Paris.

[41] **Pearce, D. & G. Atkinson** (1995) "Measuring Sustainable Development", dans D. W. Bromley éds., 166-181.

[42] **Peretto, P. M.** (1998) "Technological Change and Population Growth", *Journal of Economic Growth* Décembre **3** (4), 283-311.

[43] **Rebelo, S.** (1991) "Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth", *Journal of Political Analysis* **99** (3), 500-521.

[44] **Ricci, F.** (2002) "Environmental Policy and Growth when Inputs are Differentiated in Pollution and Intensity", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (16).

[45] **Romer, P. M.** (1986) "Increasing Return and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy* **94** (5) Octobre, 1002-1037.

[46] **Saint-Paul, G.** (2002) "Environmental Policy and Directed Innovation in a Schumpeterian Growth Model", document de travail *IDEI* (153).

[47] **Schumpeter, J. A.** (1954) *The History of Economic Analysis* New-York, Oxford University Press.

[48] **Smulders, S.** (1995 a) "Environmental Policy and Sustainable Economic Growth", *De Economist* **143** (2), 163-195.

[49] **Smulders, S.** (1995 b) "Entropy, Environment and Endogenous Growth", *International Tax and Public Finance* **2**, 319-340.

[50] **Solow, R. M.** (1997) "REPLY - Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz", *Ecological Economics* **22**, 267-268.

[51] **Stockey, N.** (1998) "Are There Limits To Growth?", *International Economic Review* **39** (1), 1-31.

[52] **Tahvonen, O.** (2000) "Economic Sustainability and Scarcity of Natural Resources: A Brief Historical Review", *Resources for the Future* Juin.

[53] **WCED** (1987) *Our Common Future*, Oxford University Press.

[54] **Young, A.** (1998) "Growth without Scale Effects", *Journal of Political Economy* **106** (1), 41-63.

Partie I
La croissance endogène durable

"*What do I mean when I say growth can continue? I don't mean growth in the number of people. I don't even mean growth in the number of physical objects, because you clearly can't get exponential growth in the amount of mass that each person controls. We've got the same mass here on Earth that we had 100,000 years ago and we've never going to get any more of it. What I mean is growth in value, and the way you create value is by taking that fixed quantity of mass and rearranging it from a form that isn't worth very much into a form that's worth much more. A canonical example is turning sand on the beach into semiconductors.*", Romer (2001) Interview.

Chapitre 1
Le développement durable face aux nouvelles théories de la croissance

Introduction sur la croissance durable fondée sur les innovations

Les origines de l'analyse de la croissance

La croissance économique est un fait majeur et caractéristique de ce siècle qui suscite chez les économistes un grand intérêt. Avant la révolution industrielle anglaise, la croissance économique est un phénomène inconnu. Kremer (1993) considère que la croissance du revenu pendant cette période est à peu près égale à celle de la population mondiale, soit un taux de croissance très faible jusqu'au XVIII^{e} siècle (0.075 %), alors qu'il atteint le chiffre de 2 % sur les quarante dernières années.

Il faut patienter jusqu'en 1950 pour trouver, grâce à Solow (1956 a), une clarification sur le rôle précis du progrès technique et de l'accumulation du capital dans la croissance économique. Ces travaux démontrent le rôle central du progrès technique dans l'analyse des écarts de richesse entre les économies mais ne délivrent pas d'explication satisfaisante sur l'origine du progrès technique (la technologie y est exogène) : la diminution des rendements du capital permet la croissance continue du produit par tête grâce à la seule accumulation du capital. À partir de Solow (1956 a) (1956 b), on considère donc que le progrès technique est à l'origine de la croissance de long-terme. Ce dernier soutient la productivité du capital et, ainsi, ses rendements et encourage les ménages à épargner et investir en capital. Cela est rendu possible si les rendements d'échelle sur le capital physique dans la fonction de production du bien final sont constants ; autrement dit, que, le long du sentier de croissance équilibrée, le

capital et la production croissent au même taux. Ce taux augmente avec la capacité de l'économie à épargner et investir et, donc, en partie, du taux de rendement du capital.

Dans les deux décennies qui suivent, les articles universitaires sur le sujet sont nombreux mais des aspects importants dans l'analyse sont écartés à cause de problèmes méthodologiques. On peut citer les travaux d'Arrow (1962), Cass (1965), Uzawa (1965), Nelson et Phelps (1966), Shell (1967), Nordhaus (1969), Kuznets (1973), Abramovitz (1986)...

Les théories modernes de la croissance

Dans les années 1980, les difficultés d'ordre méthodologique sont partiellement levées par Romer (1986) et Lucas (1988) grâce aux nouveaux développements de la théorie de la concurrence imparfaite. Ainsi, l'économie du progrès technique est introduite en macroéconomie sous l'angle de l'économie dite des idées. Les idées nouvelles permettent d'améliorer la technologie de production. Alors qu'on s'éclairait encore à la bougie il y a quelques siècles, les ampoules électriques fournissent aujourd'hui la lumière avec plus d'efficacité : pour preuve de celle-ci, Nordhaus (1994) estime que le prix de la fourniture de lumière a été divisé par 4000 depuis l'année 1800 si on tient compte de l'amélioration qualitative. De façon plus générale, les idées ne sont pas seulement le fruit de l'ingénierie : on pense aux concepts modernes incorporés dans les produits de consommation ou à l'organisation de la production. Donc, pour ces théories, le produit par tête croît à long terme à un taux positif et constant qui ne dépend pas uniquement de variables exogènes.

Au début des années 1990, les théories sont testées et quantifiées (Barro 1991) et les poursuites théoriques sont nombreuses. Nous reviendrons plus en détail sur les effets de ces recherches modernes dans la suite de cette introduction. Analysons maintenant les mécanismes économiques de l'économie des idées et leurs conséquences.

L'économie des idées

Concurrence imparfaite et externalités

Romer (1986) formalise à partir des travaux de Phelps (1966) et Shell (1967) le lien entre les idées et la croissance économique de la façon suivante : les idées sont par nature non-rivales ce qui les distinguent des biens économiques traditionnels dits privés. Cette non-rivalité est à l'origine des rendements croissants ; les agents maximisateurs face aux idées entraînent l'échange économique dans un univers de concurrence imparfaite. Si les idées sont non-rivales, elles partagent cependant avec les biens traditionnels le fait d'être exclusifs par les prix. Le degré d'exclusivité du bien permet à son propriétaire de faire payer les autres agents pour l'utilisation du bien en question. Les systèmes de *copyrights* et de brevets permettent à leurs inventeurs de faire payer pour l'utilisation de leurs idées. Lorsque de tels systèmes n'existent pas, les "bénéfices économiques" (*i.e.* évalués en terme d'utilité ou de profit) tirés de l'utilisation du bien ne peuvent pas être intégralement récupérés par le propriétaire. Ce phénomène est appelé externalité positive. Le propriétaire du bien non-exclusif n'est donc pas incité à produire le bien en quantité suffisante ce qui justifie l'intervention correctrice publique pour rétablir le niveau de production du bien permettant d'améliorer les "bénéfices totaux" (ou bien-être global). L'intervention publique prend différentes formes. Elle peut consister à "nationaliser" l'activité économique : aujourd'hui, c'est le cas d'une partie importante de la recherche fondamentale. Les autres formes sont fondées sur le contrôle direct (normes et quotas) ou sur les des mécanismes de marché (taxes, subventions et permis).

Par ailleurs, les biens rivaux doivent être produits à chaque fois qu'ils sont vendus mais pas les biens non-rivaux. Produits une seule fois, ces derniers ont toujours une proportion de coût fixe dans le coût total très élevée. Cette caractéristique est celle des rendements croissants.

Les externalités négatives liées à l'exploitation des ressources naturelles

À l'inverse des biens à l'origine d'externalité positive, les biens qui entraînent une dispersion des coûts sont souvent produits en quantité trop importante. Dans ce cas, l'intervention publique est également nécessaire. "La tragédie des biens communs" of-

fre un bon exemple. Les biens communs sont des biens rivaux avec un faible degré d'exclusivité. On pense par exemple à l'exploitation inconsidérée des zones de pêche internationales. En général, les biens environnementaux souffrent de la tragédie des biens communs : leur utilisation est trop intensive, inefficiente et menace l'écosystème jusqu'à sa disparition. Les enjeux actuels liés aux pollutions (émissions de CO_2, dérèglement climatique, etc.) et à l'exploitation des ressources renouvelables (eau, air pur, etc.) reflètent bien ces difficultés. Les accords internationaux récents du type du Protocole de Kyoto de décembre 1997, entré en vigueur en février 2005, ont pour objectifs affichés d'internaliser les effets externes négatifs à l'aide d'instruments économiques.

Ainsi, le protocole de Kyoto, ratifié par la Russie (fin 2004), les pays européens en transition et les pays de l'OCDE à l'exception des États-Unis d'Amérique et de l'Australie (pourtant deux pays initialement signataires), prévoit des objectifs quantifiés et juridiquement contraignants[6]. En plus des objectifs physiques, les instruments permettant de les atteindre ont été définis : les quotas d'émissions peuvent être échangés entre pays, ces quotas pouvant également être augmentés pour les investisseurs réalisant des projets permettant de réduire les émissions dans des pays soumis à des engagements quantitatifs (on parle alors de projets d'application conjointe) ou dans des pays sans engagements (on parle des mécanismes de développement propre ; dans ce dernier cas, les projets sont plus encadrés afin d'éviter les comportements de collusion). Bien que le dispositif international de certificats de pollution négociable doive entrer en vigueur pour la période 2008-2012, l'Union européenne a choisi de mettre en œuvre, dès 2005, un marché de quotas européens qui rejoindra le marché international en 2008. La directive 2003/87/CE fixe les règles d'organisation du marché européen afin de permettre, grâce à l'émergence d'un prix du CO_2, de réduire les coûts supportés par l'Europe pour atteindre les objectifs d'émissions négociés au niveau international.

[6] Les objectifs se résument à la réduction de 5,2% sur la période 2008-2012 par rapport aux émissions de ces pays (Etats-Unis et Australie compris) en 1990 pour six gaz à effet de serre (le principal étant le gaz carbonique). Finalement les pays de l'Union européenne se sont tous fixés comme objectif global de réduire de 8% leurs émissions avec une redistribution des objectifs entre Etats. L'objectif français ainsi fixé est de maintenir ses émissions pour la période 2008-2012 au niveau de celles de 1990.

La protection de l'innovation et le rôle du brevet

Nous revenons à l'économie des idées et au concept de rendement croissant dans la production. L'efficience du marché implique l'égalisation du prix de vente au coût marginal de production : pourquoi les logiciels sont-ils si chers alors que le coût marginal de production est si faible ? La vente du logiciel à son coût marginal constant de production entraîne des profits négatifs à cause des coûts fixes élevés. Le coût moyen se réduit avec l'échelle de production. Si l'entreprise n'est pas libre de vendre le bien à un prix supérieur à son coût marginal, elle supporte seule les coûts fixes et réalise des profits négatifs. Dans cette perspective, l'entreprise ne produira pas le bien. Sa production nécessite donc que l'on s'éloigne de la concurrence parfaite. La protection de l'innovateur par le brevet est un moyen législatif permettant de garantir l'exclusivité des idées qui empêche les imitateurs de réduire à zéro les perspectives de gains liées à la mise au point des innovations.

Pour North (1981), ces mécanismes expliquent, en grande partie, les évolutions historiques du développement et de la croissance économique. Bien que le rendement social des découvertes ait toujours été élevé, dès lors qu'un mécanisme a permis de faire bénéficier à l'inventeur de son rendement privé, le processus de développement du progrès technique s'est mis en œuvre. Ce processus a pris son essor depuis que l'incitation par le marché existe. Comment mesure-t-on la production des idées nouvelles ?

Les dépenses en R&D et les statistiques disponibles sur le dépôt des brevets sont largement utilisées mais restent des indicateurs imparfaits. En effet, les brevets ne permettent pas de distinguer les innovations importantes des autres et toutes les innovations ne font pas l'objet de dépenses officielles et quantifiées comptablement en R&D (notamment dans le domaine organisationnel et managérial). Cependant, retenons les faits empiriques suivants qui sont utiles à notre analyse.

Le nombre de brevets déposés entre 1900 et 1990 aux États-Unis d'Amérique a été multiplié par 3,84. Les ressources allouées à la R&D comme le nombre de scientifiques et d'ingénieurs employés a augmenté fortement dans les pays riches depuis cinquante

ans. Aux États-Unis d'Amérique, ils étaient 200 000 en 1950, ils sont plus d'un million en 1990. La part des scientifiques dans la population active a aussi augmenté pour atteindre 0.75 % en 1988, contre 0.25 % en 1950.

Environnement et croissance

Nous avons vu que l'intervention publique était justifiée par l'internalisation des effets externes positifs ou négatifs (par exemple l'exploitation des ressources naturelles pour les externalités négatives). Le bien-être est globalement augmenté par ces mesures correctrices, mais on peut s'interroger sur l'impact de la politique environnementale sur la croissance. La politique environnementale représente une perte de croissance lorsqu'elle entraîne des coûts additionnels supportés par les secteurs de production. L'amélioration continue de la qualité environnementale, même à un rythme peu élevé, nécessite une réduction permanente du flux des émissions polluantes qui est considéré comme un input de production de manière implicite ou explicite (Stockey 1998).
Dans un cadre statique, la politique environnementale pèse comme une contrainte dans la mesure où elle impose des coûts supplémentaires aux firmes : les coûts en question concernent les activités d'abattement et de dépollution ou les coûts de réduction des pollutions à la sortie du processus productif. Par contre dans un cadre dynamique, ces coûts supplémentaires réduisent les rendements du capital à l'origine des pollutions et incitent à investir dans des technologies plus respectueuses de l'environnement. Cet investissement sera-t-il suffisamment élevé pour accélérer à long terme le rythme de la croissance ? Autrement dit, les ajustements induits par la politique environnementale vont-il permettre d'accroître les possibilités de production ? D'après l'hypothèse de Porter (1991) et Porter et van der Linde (1995), il peut y avoir un effet *win-win* : c'est-à-dire une amélioration de la qualité de l'environnement et un accroissement de la production.

Nous pouvons classer les modèles théoriques qui répondent à ces questions en deux familles distinctes : la première différencie les biens standards (qui polluent) des biens verts (qui ne polluent pas) (*Cf.* Hung, Chang et Blackburn 1993 pour les innovations

de procédés et Gastaldo et Ragot 2000 pour les innovations de produits...) ; la seconde n'opère pas cette distinction forte entre les biens (*Cf.* le chapitre 5 d'Aghion et Howitt 1998, Grimaud 1999 et Byrne 1997 pour les coûts d'abattement et les activités de dépollution, Musu 1994 pour la R&D qui améliore "les services de l'environnement"). La première famille accorde donc à une frange spécifique de la recherche un effet direct sur l'environnement (il peut s'agir des innovations de variété en biens verts), mais opère une distinction forte sur les biens qui ne seraient que de deux types possibles. Par contre, la seconde famille de modèles omet les liens directs entre la R&D et les émissions polluantes : pour obtenir un sentier de croissance qui soit durable au sens fort, la diminution des émissions (le facteur de production environnemental) y est toujours compensée par une accumulation suffisante d'innovations standards qui permet, à elle seule, le maintien d'une croissance économique strictement positive. Seul Musu (1994) étudie les effets directs de la R&D sur les émissions, mais son modèle s'inscrit plus dans la lignée des premiers modèles de croissance endogène (notion d'externalités d'apprentissage à la Romer 1986) que dans notre problématique sur la différenciation (verticale ou horizontale) des produits.

Dans la suite de ce premier chapitre, nous décrirons les origines théoriques de ces différents modèles, leurs principaux résultats et les avancées plus récentes.

Vers une remise en cause de la croissance endogène ?

Nous avons considéré jusqu'à maintenant l'existence de rendements croissants dans la R&D, permettant de générer des modèles où les modifications permanentes de la politique économique ont des effets forts et continus sur le taux de croissance de l'économie et le taux d'exploitation des ressources naturelles. On peut également construire des modèles plus proches des données statistiques liées à la croissance et aux brevets dont certains aboutissent au rejet des effets à long terme des politiques sur le taux de croissance économique. Les données statistiques concernent le fait que l'effort de R&D (qui peut être évalué par le nombre de scientifiques employés dans la R&D), l'éducation dans les pays développés et l'équipement en informatique aient tous cru plus vite que

les revenus. Des nombreux raffinements apportés aux modèles fondateurs, la critique de Jones (1995 a) (également formulée par Kortum 1997 et Segerstrom 1998) marque une étape importante dans l'analyse des fondements de la croissance.
Jones (1995 a) réfute toute pertinence empirique à l'effet d'échelle présent dans les modèles traditionnels de croissance endogène : l'effet d'échelle implique qu'une économie deux fois plus peuplée qu'une autre devrait croître deux fois plus vite. Jones (1995 b) propose un modèle dit de croissance semi-endogène qui permet d'éviter l'effet d'échelle, mais où la politique économique n'a d'impact sur le taux de croissance que de façon transitoire. L'accroissement exogène de la population active et les paramètres relatifs aux externalités intertemporelles dans la R&D assurent à eux seuls la croissance économique de long terme. Opposée à une conception de la croissance qui retirerait toute efficacité sur le long terme aux politiques économiques, une nouvelle frange de la littérature intitulée la croissance endogène sans effet d'échelle (menée par Aghion et Howitt 1998, Peretto 1998, Young 1998...) propose une modélisation alternative à celle de Jones.

Dans des modèles mêlant à la fois la différenciation horizontale et la différenciation verticale, les auteurs tentent de redonner à la politique économique un effet sur la croissance de long terme sans pour autant faire apparaître un effet d'échelle que l'ensemble des spécialistes s'accordent à rejeter.

Le débat reste ouvert. Pour preuve, Jones (1999) juge certaines hypothèses de la croissance endogène sans effet d'échelle trop aprioriste ; tandis qu'Aghion et Howitt (2004) proposent d'inclure à l'analyse la prise en compte de faits stylisés nouveaux que la croissance semi-endogène ne permet pas de prendre en compte. Nous reviendrons sur ces différents éléments dans la suite de ce chapitre.

Dans les sections suivantes, nous exposerons les modèles fondateurs, tout d'abord, de la croissance endogène fondée sur l'innovation (section 1.1), ensuite, de la croissance endogène durable (section 1.2) et, enfin, de la croissance semi-endogène (section 1.3). Les origines et les avancées récentes dans ces différents domaines seront discutées, respectivement, au début et à la fin de chaque section.

1.1 Les théories de la croissance endogène

Les théories de la croissance endogène reprennent dans leur analyse les principaux enjeux liés au progrès technique ; elles étudient comment les imperfections de marché, les institutions, les politiques, la démographie, le commerce et les préférences affectent le taux de croissance de la productivité globale des facteurs et la valeur ajoutée par habitant. Nous présentons, d'abord, les facteurs traditionnels de la croissance pour, ensuite, analyser les mécanismes permettant à la R&D d'en devenir le nouveau moteur.

1.1.1 Les facteurs traditionnels de la croissance

Nous exposons les trois premières sources de la croissance qui ont été étudiées. Il s'agit des effets d'apprentissage et les externalités technologiques inter-agents (Romer 1986) ; du capital humain (Lucas 1988) ; et des dépenses publiques en infrastructure (Barro 1990). Nous commençons par ce dernier facteur.

Le capital public d'infrastructure

L'efficacité d'une entreprise est accrue lorsqu'elle s'insère dans un "*environnement d'entreprises mieux équipées ou plus actives*" (Hénin et Ralle 1993). L'augmentation continue des dépenses publiques en infrastructures qui représentent une externalité positive dans la fonction de production du secteur privé de l'économie permet d'atteindre une croissance par tête positive à long terme :

$$Y = K^{\alpha} D^{1-\alpha}$$

avec $0 < \alpha < 1$, Y le volume de production, K le capital physique et D la dépense publique. À l'équilibre, si les dépenses publiques représentent une part constante d de la production, alors le niveau de la production s'écrit :

$$Y = d^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} K$$

La croissance endogène a donc pour origine la part des dépenses de l'État dans le produit intérieur brut (PIB) qui affecte la production privée. L'externalité productive

est la suivante : à taux de prélèvement fiscal donné, une augmentation privée de la production entraîne une hausse des dépenses publiques (D) qui a finalement un effet positif sur la fonction de production agrégée (Y).

L'étude empirique de Kocherlakota et Yi (1997) appuie ce résultat. Elle démontre que le taux d'imposition et le capital public ont une influence respectivement négative et positive sur la croissance de long terme aux États-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni (ces deux phénomènes étant reliés à travers la contrainte budgétaire dynamique du gouvernement).

Les effets d'apprentissage et le capital humain

À présent, comme le montrait déjà Solow, si la productivité ne joue que sur le facteur fixe (*i.e.* non-accumulable), la productivité du facteur accumulable décroît inexorablement. Si le facteur fixe en question est le travail alors :

$$Y = F(K, BL) \tag{1.1}$$

avec B la productivité du facteur travail L, F la fonction de production telle que l'élasticité de substitution entre le travail (L) et le capital (K) est inférieure ou égale à l'unité.

Mais contrairement à Solow, l'accumulation soutenue du capital peut être obtenue grâce à la présence des effets d'apprentissage et d'externalités technologiques inter-agents. En effet, dans Romer (1986), la propriété de rendement d'échelle constant par rapport au capital est obtenue avec :

$$\begin{aligned} B &= K \text{ dans (1.1) donne :} \\ Y &= F(1, bL).K \end{aligned}$$

où $F(1, bL)$ est la productivité constante du capital. La production croît alors au même taux que le capital. En l'absence de tout progrès technique exogène, le fait d'avoir des rendements asymptotiquement constants (par exemple grâce à une conception élargie du capital qui prend en compte la "dimension humaine" en plus de sa dimension physique habituelle) permet d'atteindre à long terme une croissance par

tête strictement positive. Ici l'investissement en capital permet d'accumuler du capital physique et humain.

Précisons maintenant que le capital humain diffère des innovations endogènes dans la mesure où les idées sont par nature indivisibles et souvent non-exclusives, ce qui n'est pas le cas des compétences et de la force de travail brute qui sont détenues par leurs propriétaires. Pour cette raison, la théorie de la croissance endogène fondée sur les innovations a des conclusions différentes de la théorie de la croissance endogène fondée sur le capital humain.

Pour Lucas (1988), l'investissement en éducation qui augmente l'efficacité du facteur travail dans le processus productif est également une source d'externalité lorsqu'elle bénéficie aux agents environnants qui ont le même niveau de qualification (idée des externalités de réseau). Dans ce cas, cette dernière externalité est à l'origine de la différence entre le rendement privé et le rendement social de l'éducation, plaçant ainsi le taux de croissance privé sous son niveau optimal.

1.1.2 Le capital immatériel de connaissances technologiques

Innovations et monopoles

Les innovations technologiques donnent naissance, d'une part, à de nouvelles variétés de biens (de production ou de consommation) et, d'autre part, à de nouvelles qualités des biens. Les mécanismes de la concurrence dynamique qui expliquent l'investissement des firmes et le rythme du processus d'innovation sont issus des développements modernes de l'économie industrielle. L'innovation est le fruit du comportement rationnel des agents privés qui font un arbitrage intertemporel pour décider des montants consacrés à l'effort de recherche, à l'épargne, etc. Le recours à l'existence de monopoles est rendu nécessaire par la prise de risque que représente l'activité de R&D et l'existence de coûts fixes élevés (dont nous avons déjà parlé dans l'introduction du chapitre). L'incitation à innover passe donc par le fait d'assurer aux innovateurs potentiels le fait

qu'ils pourront bénéficier, pendant un temps assez long, des richesses générées par leur travail. Le lien entre innovation et concurrence imparfaite est déjà présent dans les travaux de Schumpeter (1942) :

> "*le principal avantage tiré par une entreprise d'une position de vendeur unique* [...] *ne consiste pas tant dans la possibilité pour cette entreprise de se livrer temporairement aux agissements d'un monopoleur que dans la protection acquise de la sorte contre la désorganisation momentanée du marché, ainsi que dans les coudées franches obtenues pour la réalisation d'un programme à long terme*", page 142.

Dans cette perspective, l'innovation est produite par un monopole (phase dite de diffusion) qui a acheté l'exclusivité de la production, sous la forme d'un brevet, à son inventeur (phase initiale de recherche et développement). Le prix de vente de l'innovation ainsi produite est donc fixé à un niveau supérieur à son coût marginal de production. L'amélioration de la qualité ou l'élévation du nombre des biens intermédiaires entraîne des gains de productivité dans le secteur final. Au contraire, l'amélioration de la qualité ou l'élévation du nombre de biens de consommation permet de répondre aux goûts pour la qualité et la variété (respectivement) des consommateurs. Par ailleurs, on considère généralement que la production des innovations dépend, à la fois, de la dépense en R&D (qui fait l'objet d'une décision privée) et du niveau atteint par le stock du capital technologique lui-même (facteur non-pris en compte dans le rendement privé). Ce dernier facteur également appelé dans la littérature "capital immatériel de connaissances technologiques" est un bien non-rival qui peut placer le taux de croissance d'équilibre de l'économie décentralisée sous son niveau optimal. Cependant, ce dernier résultat peut s'inverser dans le cadre des innovations en qualité parce qu'elles sont à l'origine du déclassement d'une partie du capital technologique (ce qui consacre l'expression schumpeterienne de la destruction créatrice).

La différenciation verticale

Le risque d'être remplacé par une qualité de nouvelle génération est proportionnel à l'effort de recherche des innovateurs potentiels. En plaçant notre analyse dans le cadre de l'équilibre partiel et en simplifiant au maximum la formalisation, nous pou-

vons retenir deux secteurs, secteur final et secteur de la R&D, dont les fonctions de production s'écrivent :

$$\begin{aligned} Y &= A^{\sigma}\left[(1-n)\,L\right] \quad \text{et} \\ \dot{A} &= \delta\,(nL)\,A \end{aligned} \tag{1.2}$$

avec $\frac{\dot{L}}{L} = l$, $\delta > 0$ le paramètre de productivité des chercheurs et $\sigma > 0$ tel que les rendements du travail (L) et de la connaissance (A) dans la production (Y) sont croissants, et $1-n$ la part du travail allouée au secteur final ($0 < n < 1$). À long terme, n (la part du travail investie dans le processus d'amélioration du bien non-rival "connaissance") est constante et le taux de croissance de la production par tête ($y \equiv Y/L$) vaut :

$$\frac{\dot{Y}}{Y} - l = \sigma\delta nL \tag{1.3}$$

Un changement permanent de l'intensité de la recherche (par exemple grâce à la mise en œuvre d'une politique de subvention de la recherche) permet de modifier définitivement le taux de croissance de long terme.

La différenciation horizontale

Dans le cas de la différenciation horizontale à la Romer (1990)[7], en retenant les simplifications précédentes, les fonctions de production sont données par :

$$\begin{aligned} Y &= \left[(1-n)\,L\right]^{1-\alpha} \int_0^B x_j^{\alpha} dj \quad \text{et} \\ \dot{B} &= \delta\,(nL)\,B \end{aligned} \tag{1.4}$$

avec B le nombre de biens intermédiaires ; le facteur de production dans le secteur de la recherche est la quantité de travail allouée à cette activité (nL) ; x_j est la quantité du bien intermédiaire de type j ; $\int_0^B x_j^{\alpha} dj$ est la quantité totale de biens intermédiaires utilisés dans le processus productif. Cette dernière expression permet de rendre autonomes les produits marginaux des différents biens intermédiaires dans le sens où les

[7] On retrouve les origines de cette formulation dans les analyses de Spence (1976), Dixit et Stiglitz (1977) et Romer (1987).

nouveaux biens ne sont ni des substituts directs ni des compléments directs. Avec $x_j = x \ \forall j$, la production se réécrit :

$$Y = [(1-n)\,L]^{1-\alpha}\,(Bx)^{\alpha}\,B^{1-\alpha}$$

En faisant la somme des élasticités des inputs, nous pouvons dire que les rendements d'échelle sont constants en travail ($(1-n)\,L$) et en capital (Bx). Le progrès technique lié à l'augmentation continue de B empêche la diminution des rendements.[8]

Jusqu'à présent, nous avons laissé de côté le secteur intermédiaire qui produit le bien x. Ce secteur est nécessaire à la détermination de la valeur de l'innovation. En effet, à partir de l'équation (1.4), la valeur actualisée du rendement de la découverte du bien intermédiaire j (ou, plus simplement, la valeur de l'innovation) s'écrit :

$$V_t = \int_t^{\infty} e^{-r(v-t)}\Pi\,(x_{jt})\,dv = \int_t^{\infty} e^{-r(v-t)}\,(1-\alpha)\,p_{jt}x_{jt}dv$$

avec r le taux d'intérêt constant et Π le profit du monopole produisant le bien intermédiaire x_j (au moyen du bien intermédiaire lui-même) et le vendant au prix p_j. La part du capital α est une mesure du pouvoir de marché du monopole produisant x_j, c'est pourquoi la détermination du profit consiste à appliquer un taux de marge, ici $1-\alpha$. La valeur de l'innovation (V) est donc l'ensemble des flux de profits générés par l'existence de cette innovation ; les flux étant actualisés au taux d'intérêt unique du marché (r).

Dans le cas d'innovations en qualité, la valeur de l'innovation est modifiée pour prendre en compte le fait que les flux de profit sont limités dans le temps puisque les qualités de générations précédentes sont remplacées par des qualités nouvelles. Pour cela, un paramètre d'actualisation supplémentaire est introduit afin d'évaluer la durée de vie des innovations en qualité. Comme nous le détaillerons dans les chapitres suivants où nos innovations prennent la forme exclusive d'améliorations successives de la qualité, la

[8] Dans le cas où l'effort de recherche consiste en des dépenses en produit final (D) et non plus en une part du travail (n), le coût économique lié à l'activité de R&D se retrouve dans la contrainte d'équilibre des emplois et des ressources de l'économie sous la forme $C = Y - Bx - D$.

probabilité d'être remplacé est proportionnelle à l'effort en recherche des innovateurs concurrents.

Enfin, pour Grossman et Helpman (1991, chapitre 3), l'innovation permet l'augmentation du nombre de biens de consommation (ou innovation de produits). La fonction d'utilité à la Spence (1976) est comparable à la fonction de production du bien final précédente, en effet :

$$U = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \frac{\left[\left(\int_0^B c_j^{\varepsilon} dj \right)^{1/\varepsilon} \right]^{1-\theta} - 1}{1-\theta} dt$$

avec U l'utilité intertemporelle du consommateur représentatif, c_j la quantité consommée du produit j, $0 < \varepsilon \leqslant 1$ (si $\varepsilon = 1$: les produits sont des substituts parfaits) et ρ le taux de préférence pour le présent.

Un effort de R&D sur-optimal pour les deux types de différenciation

Avant Benassy (1998), seul l'équilibre décentralisé d'une économie dont la croissance endogène est fondée sur la différenciation par la variété (des produits consommés comme des processus productifs) conduisait à un effort de recherche sous-optimal : le remplacement des anciennes qualités par les qualités de dernière génération peut entraîner une surestimation des profits que peuvent s'accaparer les innovateurs. Pendant la course aux brevets, les moyens investis pour découvrir une idée nouvelle peuvent effectivement être supérieurs au niveau optimal.

L'incitation à innover dans la différenciation horizontale peut être trop forte si on différencie "*les rendements de la spécialisation*" du taux de marge monopolistique (qui dépend de α, comme nous l'avons déjà dit). Pour cela, une fonction de production à élasticité de substitution constante (CES) à la Ethier (1982) peut être utilisée :

$$Y = B^{\nu+1-\frac{1}{\alpha}} \left(\int_0^B x_j^{\alpha} dj \right)^{1/\alpha}$$

avec $\nu \geqslant 0$ le degré des rendements liés à la spécialisation à mesure que le nombre de biens intermédiaires augmente. À l'équilibre, les j biens intermédiaires sont demandés

dans les mêmes quantités (x) et :

$$Y = B^{\nu}(Bx)$$

Benassy (1998) montre qu'il existe des combinaisons des paramètres α et ν pour lesquels, l'effort de recherche privé est sur-optimal.[9]

Taxinomie des modèles canoniques de la croissance endogène

Pour résumer ces différentes approches, le tableau 1.a classe les principaux modèles de croissance endogène fondée sur l'innovation en fonction du type de la différenciation et de la nature du bien différencié ("produits" ou "processus" qualifiant les biens de consommation ou les biens intermédiaires, respectivement).

différenciation *produits*	**horizontale** *processus*	**différenciation** *produits*	**verticale** *processus*
	Romer 1990		Aghion et *al.* 1992
Grossman et *al.* 1991 chap.3	Barro et *al.* 1995 chap.6		Barro et *al.* chap.7
Benassy 1998	Benassy 1998 Glachant 2001	Grossman et *al.* chap.4	

Tableau 1.a. Taxinomie de la littérature de la croissance endogène

Pour résumer, les modèles de croissance endogène synthétisent un concept de la croissance "différent" par rapport aux théories précédentes. Cette synthèse consiste à faire croître l'économie autrement que par l'augmentation continue des volumes de consommation et de production. Pour les biens intermédiaires, leurs qualités constamment croissantes augmentent le niveau de production efficace, c'est-à-dire augmenté de la qualité alors que le volume matériel de la production décroît. Pour les biens finals, la qualité meilleure est source de gain en utilité pour les ménages alors que les volumes consommés peuvent décroître. Les conséquences pour le développement durable sont donc immédiates.

[9] Glachant (2001) montre également que la sur-optimalité de l'équilibre de l'économie de laisser-faire, dont la croissance endogène est basée sur la différenciation horizontale, est possible. Ce résultat est obtenu grâce au relachement de l'hypothèse de l'élasticité constante de la demande pour les biens intermédiaires.

1.2 Environnement et croissance ou les conditions d'obtention d'un développement durable endogène

Les études théoriques sur l'environnement, vu comme une limite potentielle à la croissance d'ordre quantitatif (*i.e.* au niveau productif) et qualitatif (au niveau de l'utilité), analysent, d'abord, les conditions d'obtention de la croissance durable (nous nous référons aux revues de la littérature réalisées par Smulders 1995 b et 2000, Beltratti 1997, Chevé et Ragot - dans Schubert et Zagamé 1998 - et Bretschberg et Egli 2001) puis, ensuite, les effets de la politique environnementale sur les trois principaux canaux de transmission sur la croissance économique, c'est-à-dire l'investissement, l'éducation et la R&D (voir Ricci 2004 pour une revue de la littérature sur cet aspect).

1.2.1 La croissance durable fondée sur les facteurs traditionnels de croissance

Nous distinguons deux types de solutions techniques aux problèmes liés à l'environnement : d'une part, la dépollution et, d'autre part, les technologies propres.

Les activités de dépollution

Les aspects de dépollution ont été les premiers étudiés (van Marrewijk et al. 1993, Vellinga 1994, Michel 1993, Smulders 1993, Gradus et Smulders 1993, Musu et Lines 1995, Michel et Rotillon 1996...). Le rôle des activités de dépollution consiste à réduire les atteintes à l'environnement qui sont causées par les émissions polluantes, produit fatal de l'activité productive.

Généralement, les **dépenses de dépollution** représentent une fraction de la production du bien final. Dans ce cas, l'augmentation de la dépollution nécessite une réduction de la consommation ou une augmentation de la production. Formellement, les fonctions d'accumulation du capital et de la pollution peuvent être résumées de la

façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{K}_t &= AK_t - C_t - D_t \\ \dot{S}_t &= P(K_t, D_t) - \Theta S_t \end{aligned} \tag{1.5}$$

avec K le stock de capital ; AK la fonction de production du bien final à la Rebelo (1991) où A est la productivité apparente du capital (K) ; C la consommation totale ; D les dépenses de dépollution ; S le stock de pollution ; P les émissions polluantes telles que $\frac{\partial P}{\partial K} > 0$ et $\frac{\partial P}{\partial D} < 0$; enfin, $0 < \Theta < 1$ le taux d'assimilation naturelle (ou régénération) de l'écosystème. Au niveau de l'utilité des consommateurs, on suppose un effet négatif soit du stock de pollution soit du flux des émissions de polluants. Dans le cas où l'on étudie l'impact de problèmes environnementaux de long terme, on considère généralement que le stock de pollution est la variable explicative.
Le moteur de la croissance est l'accumulation du capital humain pour les articles de Vellinga (1994) et Smulders (1993). Leurs modèles concluent qu'avec les dépenses de dépollution, plus la préférence des individus pour la qualité de l'environnement est forte, plus le taux de croissance de long terme est faible parce que des niveaux de dépenses en dépollution plus importantes représentent un effet d'éviction pour l'investissement en capital.
Dans la même optique, Hettich (1998) ajoute une offre de travail endogène dont le rythme d'accumulation du capital humain augmente avec la taxation de l'activité polluante puisque ce dernier est, en fait, non-polluant et voit son rendement relatif au capital standard augmenté. Le temps supplémentaire passé dans l'éducation augmente la croissance à long terme ce qui n'est pas forcément optimal du point de vue du bien-être puisque le temps de loisir est fortement diminué.

On peut également enrichir l'analyse en prenant en compte les effets de la pollution sur la santé, rendant ainsi le processus d'accumulation du capital humain dépendant de la sphère environnementale (Gradus et Smulders 1993). Dans ce cas, les fonctions de production et d'accumulation de la connaissance des individus s'écrivent (en omettant

les indices temporels) :

$$\begin{aligned} Y &= F(K,\, H(1-n)L) \\ \frac{\dot{H}}{H} &= \delta\,(nL) - \xi\,(P) \end{aligned}$$

avec $1-n$ la part du travail (L) alloué à la production (Y), H le stock de capital humain, $\delta > 0$ et ξ le taux de dépréciation des connaissances qui croît avec la pollution ($\frac{d\xi}{dP} > 0$). Avec cet effet, il est possible d'avoir un gain en terme de croissance économique lié à la protection de l'environnement (effet de *win-win*) puisque la rentabilité de la formation et le rythme d'accumulation du capital humain s'en trouvent augmentés.

On trouve également dans la littérature le concept de **secteur de dépollution** qui, cette fois, consiste à déterminer un stock de capital supplémentaire relatif à la qualité de l'environnement. L'existence de deux stocks de capital devrait enrichir les propriétés dynamiques de la croissance. En effet, l'augmentation du stock de capital du secteur de la dépollution peut avoir deux conséquences : une diminution de l'investissement dans le capital traditionnel ou une demande supplémentaire en biens intermédiaires. Pour simplifier la formalisation, on pose un stock de capital agrégé (K) qui est constitué de capital polluant (K^y) et de capital dit "dépolluant" (K^d), tel que :

$$\begin{aligned} \dot{K}_t &= AK_t^y - C_t \\ \dot{S}_t &= P(K_t^y, K_t^d) - \Theta S_t \\ K_t &= K_t^y + K_t^d \end{aligned} \tag{1.6}$$

avec $\frac{\partial P}{\partial K^y} > 0$ et $\frac{\partial P}{\partial K^d} < 0$. Comme le soulignent Chevé et Ragot, la dynamique du modèle reste assez pauvre puisque le capital du secteur de dépollution n'est généralement pas une variable d'état (Michel et Rotillon 1996) et peut donc "*sauter pour s'ajuster aux conditions de la demande*" (voir Schubert et Zagamé 1998). Ensuite, le fait que, par hypothèse, le capital dépolluant joue sur les émissions présentes et passées permet d'atteindre à long terme une décroissance continue du stock de pollution (*cf.* équation 1.6). Ce faisant, la qualité de l'environnement atteint à long terme son niveau maximum. Dans le cas précédent avec les dépenses en dépollution, nous n'avions pas

cette possibilité de tendre vers un "*paradis écologique*" (voir Michel 1993), simplement parce que le flux (D) permettait de diminuer les émissions courantes uniquement (*cf.* équation 1.5 plus haut).

Nous étudions, maintenant, les moyens alternatifs pour prévenir les pollutions, au lieu de mettre en œuvre des programmes de dépollution.

L'investissement dans les technologies propres

La prévention des pollutions issues de la production passe par une réduction de l'intensité polluante de l'économie qui nécessite des substitutions factorielles ou une modification du processus productif lui-même. Cela transite essentiellement par les choix en investissement des firmes qui arbitrent entre des technologies standards et d'autres plus économes en émissions polluantes.

Pour Musu (1994), les émissions sont nécessaires à la production ce qui revient à les considérer comme un *input* productif, dont les services rendus par la ressource naturelle (hP) augmentent grâce à l'investissement en "R&D verte". La fonction de production s'écrit :

$$\begin{aligned} Y &= \left[K_y^{\beta}\left(\theta L\right)^{1-\beta}\right]^{\alpha}\left(hP\right)^{1-\alpha} \\ \text{et } \dot{K} &= Y - C,\ \dot{E} = A - P \end{aligned}$$

avec θ la productivité du travail et h celle des services de la ressource, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$, E est la qualité de l'environnement. Avec l'externalité positive de *learning by doing* à la Romer (1986), on a pour le travail $\theta = K_y$ et, de façon similaire, avec une technologie de recherche pour la ressource $h = K_d$ tel que le capital total est $K = K_y + K_d$. Avec $L = 1$, la fonction de production macro-économique qui intègre les externalités précédentes se réécrit :

$$Y = K_y^{\alpha}\left(K_d P\right)^{1-\alpha}$$

Musu (1994) analyse les conditions d'obtention d'un sentier de croissance équilibrée durable tel que le ratio C/K et le niveau de la qualité environnementale soient constants (concept de durabilité forte *a minima*). Au contraire, dans l'économie décentralisée,

les producteurs bénéficient de la ressource naturelle P sans coût ce qui fait tendre vers l'infini leur demande pour l'input naturel et, au final, ils n'ont pas intérêt à investir dans la technologie propre. Le rôle de l'État consiste donc à taxer la ressource en question et à financer en totalité l'effort de recherche. Musu conclut à la neutralité budgétaire de la politique optimale grâce aux recettes fiscales liées à l'*input* naturel qui compensent exactement les dépenses en subvention à la R&D.

Bovenberg et Smulders (1995) développent un cadre d'analyse proche de celui de Musu dans lequel on retrouve l'idée force de Gradus et Smulders (1993) (déjà discutée plus haut : elle consiste à rendre la productivité globale croissante avec la qualité de l'environnement) et la nouveauté suivante : le secteur de la R&D utilise aussi la ressource naturelle dans son activité productrice de la connaissance. La R&D est donc à l'origine d'une partie des émissions. Ainsi, la "productivité" de la ressource naturelle varie de la façon suivante :

$$\dot{h} = H\left(K_d, hP_h\right)$$

avec P_h la pollution issue de la production des connaissances.[10]

Du côté de la fonction d'accumulation des émissions polluantes, Bovenberg et Smulders (1995) introduisent une nouveauté supplémentaire avec un taux naturel d'assimilation non-constant :

$$\begin{aligned} \dot{E} &= G\left(E, P\right) \text{ tel que } \frac{dE}{dP} < 0 \\ \text{avec } P &= P_h + P_y \end{aligned}$$

Les capacités de régénération sont d'abord croissantes pour des valeurs faibles de la qualité environnementale, puis décroissantes pour une qualité plus élevée. Un sentier de croissance équilibrée n'est alors possible que si les formes fonctionnelles de la production du bien final et des innovations (standards comme vertes) sont de type Cobb-Douglas à rendements d'échelle constants par rapport au capital physique et aux stocks de connaissances ; de plus, la fonction d'utilité des ménages est à élasticité de substitution

[10] La rétroaction de la qualité environnementale sur la productivité globale des facteurs (PGF) se retrouvent également chez Michel (1993), Smulders (1995a), Rosendahl (1996), Rubio et Aznar (2000) et peut être globalement résumée de la façon suivante $Y = A(E).F(K, P)$ avec A l'indice de la productivité globale des facteurs fonction croissante de la qualité de l'environnement E.

intertemporelle constante et à élasticité de substitution unitaire entre la consommation et la qualité de l'environnement. Pour que l'équilibre de long terme se définisse par un sentier où la consommation croît à taux constant avec un taux d'intérêt constant, il est alors nécessaire que l'élasticité de substitution intertemporelle soit constante (fonction d'utilité de type CRRA). Et lorsque le sentier de croissance durable est défini par une qualité de l'environnement constante, comme chez Bovenberg et Smulders (1995), la fonction d'utilité des ménages doit avoir une élasticité de substitution (intratemporelle) entre consommation et qualité environnementale unitaire (propriété mise en évidence par King, Plosser et Rebelo 1988). Ainsi la demande en *input* environnemental reste constante parce que l'effet richesse (croissance de la production) est juste compensé par l'effet de substitution.

La différenciation des biens appliquée à la croissance durable intervient avec Hung, Chang et Blackburn (1993) où en plus de la recherche en technologie propre, la substitution entre des facteurs de production différenciés peut maintenant avoir lieu. La dichotomie entre les facteurs est la suivante : des biens standards polluants et des biens verts non-polluants. Les premiers déterminent le niveau des émissions polluantes. L'activité de R&D consiste à faire croître le nombre de biens intermédiaires. La durabilité de la croissance est assurée si seul le secteur de R&D vert innove, c'est-à-dire lorsque ce dernier a un avantage de coût de production par rapport au secteur de R&D standard. L'avantage repose sur un paramètre exogène au modèle. Pour que l'économie investisse dans les deux secteurs, il faut qu'ils soient identiques (efficacités et coûts identiques), les investissements dans les deux secteurs se faisant alors à un niveau égal.

Gastaldo et Ragot (2000) dépassent cette évolution assez particulière, dite "fil du rasoir" à l'aide d'une fonction d'utilité fondée sur une préférence endogène pour les biens verts :

$$u_t = \ln\left(\frac{C_t}{P_t^{\epsilon}}\right)$$

Le cadre d'analyse de la R&D est celui de Grossman et Helpman (1991). De façon résumée, la découverte de nouvelles variétés en biens standards et verts est continue

et non-nulle puisque la fonction de demande des biens est à élasticité de substitution constante ce qui donne *a priori* la part entre les deux biens (θ) :

$$C_t = \left[\int_0^{n_s} c_s(i)^{\alpha_s} di\right]^{\frac{1-\theta}{\alpha_s}} \left[\int_0^{nv} c_v(j)^{\alpha_v} dj\right]^{\frac{\theta}{\alpha_v}}$$

avec les variétés i en bien standard et j en biens vert, n le nombre de variété, θ la part de biens verts consommés (ou paramètre de préférence pour les biens verts), $\alpha_{s,v} < 1$. Trois régimes de concurrence, fonctions de la valeur du paramètre de préférence pour les biens verts, apparaissent. Pour un θ trop faible, il n'est plus rentable d'augmenter le nombre de biens verts ; pour un θ intermédiaire, l'investissement dans la R&D pour les biens verts devient rentable et celui en biens standards le reste ; pour un θ trop fort, l'investissement en biens standards devient alors non-rentable...

Verdier (1993) fait l'hypothèse d'une relation directe entre les émissions polluantes et l'effort de recherche alloué à l'augmentation de la variété des biens :

$$\frac{\dot{B}}{B} = \frac{1}{b(z)}(nL)$$

avec B le nombre de biens intermédiaires, nL la quantité de travail allouée à la R&D, $b(z)$ l'indice de productivité du travail qui décroît avec l'intensité polluante z associée à la production de ce bien supplémentaire, soit $\frac{db}{dz} < 0$. Pour éviter que les entreprises de R&D ne demandent un montant infini d'input naturel (puisque le coût de la R&D en serait réduit au minimum), Verdier (1993) estime que l'autorité publique peut postuler une intensité maximale sous la forme d'une norme. Plus la norme se fait contraignante (modification de b), moins le taux de croissance est élevé. Du côté de la sphère environnementale, les effets sont moins tranchés puisque :

$$P = zBx \tag{1.7}$$

avec P les émissions polluantes totales et en supposant la symétrie entre les productions en biens finals x (hypothèse traditionnelle dans Grossman et Helpman 1991). Les émissions diminuent suite à une intensité légale plus faible si, et seulement si, le coût de recherche s'accroît faiblement suite à la modification de la norme. Dans le cas contraire, le report du facteur travail en faveur de la production du bien final $(1-n)$ va

entraîner une augmentation de la production (donc de x) ce qui, au final, peut accroître les émissions totales (équation 1.7). Si on endogénéise à présent z, les entreprises qui font face à une taxe sur les émissions ont intérêt à réduire l'intensité polluante si, et seulement si, le taux de taxation est suffisamment élevé. Deux effets s'opposent : d'abord, la taxe augmente le coût unitaire de production de x et incite à réallouer du facteur travail au secteur de la R&D ; ensuite, l'incitation à réduire le taux d'émission rend le coût de la R&D plus élevé.

Dans la majorité de ces études, la croissance durable consiste à maintenir un taux de croissance constant à long terme et un niveau constant de qualité environnementale (ou du stock de pollution)[11]. Une des particularités des études suivantes est de proposer une amélioration continue de la qualité de l'environnement à long terme, soit le cas *a maxima* du critère de soutenabilité forte.

1.2.2 Le modèle canonique de la croissance durable moderne

Dans cette section, nous mettons l'accent sur les nouveautés des analyses de Stockey (1998), Aghion et Howitt (1998) et Grimaud (1999) par rapport aux modèles antérieurs. Nous détaillerons les mécanismes et les expliquerons en détail dans le chapitre suivant.

L'analyse de Stockey

Dans le modèle de Stockey (1998), la prise en compte de la pollution dans le système économique conduit à modifier la fonction de production du secteur final. La démonstration est réalisée en trois étapes. D'abord, nous rappelons que le flux des émissions polluantes s'écrit de la manière suivante :

$$P = z^{\gamma} Y \tag{1.8}$$

avec $z_t \in [0, 1]$, l'intensité polluante de l'économie sous le contrôle du secteur final et

[11] On rappelle que dans les modèles de croissance endogène durable de "première génération", la constance de la qualité environnementale (ou du stock de pollution) est recherchée à long terme, excepté pour Michel (1993) et Michel et Rotillon (1996) où l'objectif théorique ultime est en fait la croissance de la qualité de l'environnement.

$\gamma > 0$, l'équation (1.8) est d'autant plus convexe que ce paramètre est grand. Ensuite, la production (Y) est donnée par :

$$Y = P^{\frac{1}{\gamma+1}} (AK)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$$

La pollution (P) est donc un input dans la fonction de production. L'étude des modèles antérieurs nous a montré que la pollution est un facteur de production dont la modélisation est implicite ou explicite. Enfin, l'équation précédente et l'équation (1.8) nous donne[12] :

$$Y = zAK \tag{1.9}$$

L'analyse des problèmes de long terme nécessite la présence du stock de pollution dans la fonction d'utilité ce qui complexifie la dynamique du modèle par l'ajout de cette variable de stock supplémentaire :

$$u(c, S) = \frac{c^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S^{1+\varpi}}{1+\varpi}$$

avec u l'utilité instantanée du consommateur représentatif telle que $\varepsilon > 0$, $\varpi > 0$. Stockey (1998) démontre qu'une économie polluante caractérisée par une technologie de type AK (Rebelo 1991) ne peut pas se développer le long d'un sentier de croissance soutenable, puisque le taux de croissance de long terme de la consommation par tête est négatif lorsque l'intensité polluante décroît :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{c}}{c} &= \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\gamma}{\gamma+1} Az - \rho\right) \quad \text{et} \\ \lim_{z\to 0} \frac{\dot{c}}{c} &= -\frac{\rho}{\varepsilon} < 0 \end{aligned}$$

L'amélioration continue de la qualité environnementale entraîne une augmentation du coût marginal du capital qui pousse les agents à réduire leur investissement, rendant ainsi impossible la croissance des revenus. Dans le cadre du progrès technique exogène, si le taux de croissance de ce dernier est suffisant alors il est possible que le produit marginal du capital soit suffisamment élevé pour entraîner un investissement continu.

Le modèle AK est une vision très agrégée de l'économie et ne permet donc pas de comprendre et d'évaluer le rôle crucial de l'innovation dans le développement durable.

---

[12] Le rôle de γ est immédiat dans le cas où la production finale est de type AK (équation 1.9).

De plus, il n'existe pas de données empiriques permettant de soutenir l'hypothèse de linéarité des équations différentielles du système dynamique du modèle AK. En effet, les études sur la part du capital s'appuyant sur les outils de la comptabilité de la croissance concluent à une part du capital égale à 1/3 ; cette part peut croître jusqu'à 4/5 avec l'ajout du capital humain et d'autres externalités ; mais jamais à un coefficient de un.

Les équilibres des économies centralisée et décentralisée

Aghion et Howitt (1998) et Grimaud (1999) déterminent les sentiers centralisé et décentralisé de la croissance endogène durable fondée sur la R&D, respectivement. L'endogénéisation du progrès technique du modèle de Stockey (1998) est réalisée à l'aide du modèle de *leading edge technology* d'Aghion et Howitt (1992) dont l'activité de R&D consiste à atteindre la qualité de pointe. Dans ce cas, le capital agrégé vaut :

$$K_t = \int_0^1 A_{jt} x_{jt} dj$$

La fonction de production du bien final va dépendre de l'intensité polluante de l'économie dans la mesure où les émissions sont un *input* :

$$\begin{aligned} Y_t &= P^{\frac{1}{\gamma+1}} \left[\left[A_t \left(1 - n_t \right) L \right]^{1-\alpha} K_t \right]^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \\ \text{avec (1.8) cela donne } Y_t &= z_t \left[A_t \left(1 - n_t \right) \right]^{1-\alpha} K_t^{\alpha} \end{aligned}$$

La réduction de l'intensité impose un coût en terme de réduction du volume de production sauf si l'amélioration de la qualité est suffisante. Cette amélioration passe par un effort initial de recherche ($n_t L$) adéquat. Ainsi, le taux de croissance instantané de la qualité de pointe vaut :

$$\frac{\dot{\bar{A}}_t}{\bar{A}_t} = \delta n_t L$$

avec $\delta > 0$. La force du modèle de croissance endogène fondée sur la qualité des biens est de fournir l'ensemble des substitutions factorielles qui rend possible un développement durable : pour cela, l'économie a en sa possession du capital physique (K), du capital naturel (S) et du capital intellectuel (A). La solution réside dans les liens économiques

qui unissent les trois types de capital. Ce modèle schumpeterien requiert la condition suivante, mise en évidence par Stockey (1998), sur la fonction d'utilité : l'élasticité intertemporelle de substitution de la consommation doit être inférieure à l'unité pour que le sentier de croissance durable fort *a maxima* existe (décroissance du stock des émissions).
Du côté de l'optimalité économique de l'équilibre centralisé (croissance de la production du secteur final), la condition nécessaire est habituelle et permet de rendre optimal le fait d'accumuler indéfiniment du capital si son produit marginal dépasse toujours le taux de préférence pour le présent de l'économie.

Enfin, la décentralisation de l'optimum se fonde sur l'ensemble des instruments économiques allant contre les distorsions de marché liées à la concurrence imparfaite des modèles de progrès technique endogène, contre le sous-investissement en R&D lié à la nature de biens publics des connaissances, contre les émissions polluantes. Autant d'éléments déjà discutés lors de l'étude des modèles fondateurs de la croissance endogène. Cependant, nous insistons ici sur les caractéristiques de la taxe optimale sur les émissions polluantes.
La taxe est croissante à un taux constant à long terme dans la mesure où l'objectif annoncé de la politique environnementale est de faire tendre le stock des émissions polluantes vers zéro. La taxe peut être considérée comme étant le prix implicite associé à la ressource naturelle. Dans le cadre des marchés de droits à polluer (Grimaud 1999), la réduction du nombre de quotas d'émissions à chaque *round* de négociations à pour conséquence d'augmenter le prix d'équilibre du marché pour une unité supplémentaire de pollution.

Les technologies propres et les développements théoriques récents

Enfin, Hart (2004) et Ricci (2002) modélisent une réduction de l'intensité polluante qui est endogène à l'activité de R&D en qualité. Ce faisant, la réduction de l'intensité réduit mécaniquement la productivité globale des facteurs (toute chose égale par ailleurs) puisqu'il s'agit d'un *input* de production.

Une taxe suffisante sur les émissions incite à l'effort de recherche dans les technologies propres qui sont à la fois plus productives (indice de qualité à la hausse) et moins polluantes (réduction de l'intensité polluante) :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\bar{A}}_t}{\bar{A}_t} &= \lambda\beta n_t L, \quad \delta > 0 \\ \frac{\dot{\underline{z}}_t}{\underline{z}_t} &= \zeta\beta n_t L, \quad \zeta < 0 \end{aligned}$$

avec $\bar{A}$ et $\underline{z}$ la qualité et l'intensité polluante de pointes qui s'améliorent ensemble grâce à l'intensité de la recherche (n_t) ; $\beta > 0$ est le paramètre de Poisson qui détermine le flux des innovations en fonction de l'intensité de la recherche. Un bien intermédiaire j est donc différencié en qualité mais aussi en intensité polluante. Cette dernière caractéristique entraîne une distorsion dans les demandes en biens intermédiaires en faveur des biens les moins polluants qui ont également la qualité la plus élevée. L'effet distorsif au niveau des demandes ne pose pas de problème d'agrégation macro-économique dans la mesure où les profits des innovateurs (qui entrent dans la condition de non-arbitrage dans la recherche) sont les mêmes puisque les innovateurs de la date t accèdent tous à la technologie de pointe représentée par le couple d'innovations $\left(\bar{A}_t, \underline{z}_t\right)$. La valeur de l'innovation vaut :

$$V_t = \int_t^{\infty} e^{-rt} e^{-\beta n t} \Pi\left(\bar{A}_t, \underline{z}_t\right) dt$$

La somme des profits présents et futurs du secteur intermédiaire, actualisés au taux d'intérêt r, profits générés par l'incorporation de la nouvelle technologie jusqu'au remplacement par une nouvelle technologie ; le remplacement est estimé grâce à la probabilité qu'une nouvelle innovation survienne, soit βn constant à l'équilibre.

Enfin, la taxe sur les émissions polluantes peut avoir un effet positif sur la croissance si le rythme d'accumulation des innovations est augmenté fortement lorsque les émissions sont taxées. Pour Hart (2004), cela s'explique par le fait que la taxe a des effets internalisateurs multiples : réduction des émissions polluantes et réallocation du travail en faveur d'un plus grand effort de recherche parce qu'il est rentable de réduire les intensités polluantes des biens intermédiaires.

Dans cette seconde section, nous avons vu que seule l'hypothèse des rendements croissants dans la dépollution ou l'activité de recherche en technologie propre permettait de rompre le lien négatif entre la politique environnementale et la croissance économique.

1.3 La croissance semi-endogène

Les approches du développement durable qui s'appuient sur la différenciation endogène des biens supposent toutes que le rendement de la connaissance dans la recherche est unitaire (modèles sur la croissance durable compris), or une partie très féconde de la littérature récente réfute cette hypothèse et remet en cause l'efficacité des politiques économiques à long terme. Cependant, l'élimination de l'effet d'échelle sur d'autre base que celle de la croissance semi-endogène peut conduire au rétablissement des effets de la politique de l'innovation à long terme.

1.3.1 L'invalidité de l'effet d'échelle et le rôle de la politique économique

Les résultats de Grossman et Helpman (1991) et Aghion et Howitt (1992) soutiennent que la croissance de long terme est dépendante d'un effet d'échelle qui prend la forme du nombre total de chercheurs dans l'économie (*cf.* équation 1.3) : une augmentation de la taille de la population, toute chose égale par ailleurs (notamment avec l'intensité de la recherche n inchangée), augmente le nombre total de chercheurs et donc le taux de croissance économique. Les travaux de Kremer (1993) montre un *trend* positif de la croissance de la population qui laisse à penser que la population et les revenus sont positivement reliés dans le temps, surtout dans des temps très anciens (plusieurs centaines d'années). Bien entendu, ces faits peuvent être une validation de l'effet d'échelle présent dans les modèles de croissance endogène. Mais, les mécanismes économiques et institutionnels (choix délibéré de R&D, brevets, etc.) qui conduisent les modèles de croissance endogène à mettre en évidence un effet d'échelle sont très éloignés, dans

le temps, de cette période de l'Histoire. Les avancées permises par la mise en place des systèmes de propriété sur les innovations sont relativement récentes (révolution industrielle). Sur une période plus proche, l'effet d'échelle est, au contraire, opposé aux faits stylisés (voir Dinopoulos et Thompson 1999 et Jones 1995 a). Depuis les années 1950, le nombre de scientifiques a augmenté d'un facteur cinq sans, pour autant, avoir d'impact significatif sur la croissance de la productivité (ces statistiques sont tirées de Dinopoulos et Thompson 1999 et Aghion et Howitt 2004). Enfin, les études empiriques menées au niveau sectoriel montre que l'effet d'échelle peut être vérifié au niveau de certaines industries mais pas au niveau agrégé (Backus, Kehoe et Kehoe 1992).

Jones (1995 b), Kortum (1997) et Segerstrom (1998) mettent en évidence la dépendance théorique du taux de croissance du produit vis-à-vis de la croissance de la population. L'effet d'échelle joue toujours mais uniquement sur le niveau des variables économiques et plus sur leur taux de croissance. De la même façon, la conséquence en terme de politique économique est immédiate : l'aide à la R&D modifie les niveaux (investissement en R&D, production, etc.) mais plus les taux de croissance de long terme. Formellement, on rappelle que la production est donnée par :

$$Y = A^{\sigma} \left[(1 - n) L \right]$$

avec $\frac{\dot{L}}{L} = l$, $\delta > 0$ et $\sigma > 0$. Chez Jones (1995 b), la connaissance croît au taux constant à long terme :

$$\dot{A} = \delta \left(nL \right) A^{\phi}$$

avec $\phi < 1$ alors que le rendement est unitaire dans la théorie de la croissance endogène (*cf.* équation 1.2). Le taux de croissance de la production par tête ($y = \frac{Y}{L}$) est constant à long terme et, dans ce cas, il vaut :

$$\frac{\dot{Y}}{Y} - l = \sigma \frac{\dot{A}}{A} = \sigma \frac{l}{1 - \phi} \tag{1.10}$$

L'équation précédente n'exhibe plus d'effet d'échelle et l'intensité de la recherche a disparu. Le taux de croissance ne dépend plus que de paramètres exogènes.

1.3.2 La croissance endogène sans effet d'échelle

L'idée force à l'origine du renouveau de la croissance endogène est la suivante : à mesure qu'une économie croît, la prolifération de la diversité des produits réduit l'efficacité de la R&D pour améliorer la qualité parce que l'effort de R&D se dilue sur un plus grand nombre de secteurs[13].

Pour Young (1998), Peretto (1998), Aghion et Howitt (1998) et Dinopoulos et Thompson (1998), maintenir les effets de la politique économique sur les taux de croissance de long terme est techniquement possible grâce à deux hypothèses. La première consiste à maintenir un rendement unitaire du facteur accumulable (les connaissances) dans la production des innovations, c'est-à-dire de poser $\phi = 1$. La seconde revient à prendre en compte le mécanisme économique suivant : à mesure que le nombre de biens augmente dans l'économie, chaque entreprise de recherche qui améliore la qualité d'un bien particulier voit son investissement diminuer puisqu'on doit répartir l'effort de recherche total et constant entre un plus grand nombre de biens. En simplifiant, la consommation agrégée exprimée sous la forme d'une fonction CES est la suivante :

$$\begin{aligned} C &= \left(\int_0^B Y_j^{\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\varepsilon} \\ \text{avec } B &= L^{\theta}, \\ \dot{A} &= \delta \left(\frac{nL}{B} \right) A^{\phi} \\ \text{et toujours } Y &= A^{\sigma} \left[(1-n) L \right] \end{aligned} \tag{1.11}$$

où $0 < \sigma < 1$, $\varepsilon > 1$ et Y_i les biens consommés dont le nombre B augmente au cours du temps selon la relation (1.11). Maintenant, si $\theta = \phi = 1$ et $Y_j = Y$, alors le taux de croissance de la consommation par tête vaut :

$$\frac{\dot{C}}{C} - l = \frac{\dot{B}}{B} + \frac{\dot{Y}}{Y} - l = \sigma \delta n + l$$

La croissance de long terme est endogène dans le sens où l'intensité de la recherche (n) est une variable explicative du taux de croissance de la consommation par tête ; elle est également sans effet d'échelle dans la mesure où la taille de la population (L)

[13] L'idée est déjà présente dans Klundert et Smulders (1997).

a disparu.

Pour $\phi = 1$ et $\theta \neq 1$, la croissance de long terme de la consommation par tête vaut au contraire :

$$\frac{\dot{C}}{C} - l = \delta n L^{1-\theta} + \Theta l$$

L'effet d'échelle réapparaît. Pour Jones (1999), la croissance endogène sans effet d'échelle repose sur une seconde hypothèse aprioriste : $\theta = 1$.

Au contraire, pour Aghion et Howitt (2004), malgré ces critiques à l'encontre de la croissance endogène sans effet d'échelle, la croissance semi-endogène doit être rejetée car cette théorie rivale ne permet pas de reproduire un fait empirique central dans l'analyse de la croissance. Le taux de croissance du nombre de chercheurs dans les pays du G5 (ainsi que celui des dépenses en R&D) a un *trend* négatif depuis le milieu des années 1950 alors que le taux de croissance de la productivité globale des facteurs (PGF) est relativement stable. Cela permet, selon Aghion et Howitt (2004), de rejeter le fait que les taux de croissance des *inputs* en R&D (nombres de chercheurs, autres dépenses en R&D...) pourrait expliquer le taux de croissance de la PGF (équation 1.10). Alors que, dans l'approche de la croissance endogène sans effet d'échelle, c'est le niveau des dépenses en R&D dans le PIB (*i.e.* ici le ratio du nombre de chercheurs sur le nombre de biens qui prolifère) qui explique le taux de croissance de la PGF.

1.3.3 Les avancées récentes des théories de la croissance

En l'absence de résultat empirique clair qui permettrait de conclure définitivement sur l'endogénéité ou la semi-endogénéité de la croissance à long terme[14], de nombreux modèles aux hypothèses opposées sur la valeur des paramètres ϕ et θ se sont développés. Jones et Williams (2000) décrivent une économie où la différenciation horizontale des biens intermédiaires peut être à l'origine de quatre types d'externalités économiques liées, d'une part, à la concurrence imparfaite et aux externalités positives de connaissance ("*knowledge spillovers*" : $0 < \phi < 1$) qui sont des phénomènes traditionnels en croissance semi-endogène et, d'autre part, à la destruction créatrice et aux externalités

[14] Ou, dit autrement, en l'absence d'étude qui valide les valeurs unitaires des paramètres ϕ et θ.

de duplication. Les deux premières externalités découragent de faire de la R&D alors que les deux dernières externalités ont l'effet inverse. Formellement :

$$(1+\psi)\,\dot{B}_t = \delta R_t^{\lambda} B_t^{\phi}$$

avec $0 < \lambda < 1$ le paramètre de duplication des projets de recherche (*stepping on toes effect*), R est le montant total des dépenses en R&D, ψ est le paramètre de remplacement des variétés. Seulement la fraction $\frac{1}{1+\psi}$ des innovations augmente la variété et, par la même, contribue au bien-être. Au niveau individuel, les externalités entre chercheurs (ϕ et λ) sont mal connues et non-intégrées aux programmes d'optimisation des agents maximisateurs, de sorte que l'innovateur n'est pas rémunéré pour les innovations de connaissance dont il est à l'origine et qui bénéficieront aux chercheurs dans le futur, ce qui explique la différence des comportements privés par rapport à l'équilibre optimal. Le paramètre de duplication (λ) était déjà introduit dans certains modèles de croissance semi-endogène de première génération (Jones 1995 a). Le calibrage du modèle sur données américaines s'opère de la manière suivante : le taux de croissance de la productivité globale des facteurs étant à long terme exogène au modèle, sa valeur peut donc être calibrée ce qui laisse libre le paramètre explicatif λ si on se donne ϕ.
En conclusion, l'économie décentralisée sous-investit en R&D par rapport à l'optimum social, sauf lorsque la duplication (λ) et le taux d'intérêt sont simultanément élevés et, ainsi, stimulent la course aux brevets.
Pour Jones (2002), l'ajout du capital humain aux hypothèses traditionnelles de la croissance semi-endogène permet d'expliquer en totalité la croissance du produit par tête des États-Unis d'Amérique qui a été relativement stable sur le long terme : 1.8 % en moyenne sur les 125 dernières années. Cette stabilité existe alors que, dans le même temps, le nombre de scientifiques a cru fortement (il a été multiplié par 3 en 50 ans) et la population diplômée est toujours plus importante (25 % en 1940 contre 80 % en 1993). Au risque de nous répéter : les modèles de croissance endogène avec effet d'échelle ne peuvent techniquement pas prendre en compte ces données puisque les changements continus dans l'intensité de la recherche, par exemple, modifient le taux de croissance.

Comme on l'a vu dans le cadre de la croissance endogène sans effet d'échelle, seule la prise en compte de l'effet dépréciatif de l'augmentation du nombre de biens sur l'effort moyen en R&D (*cf.* équation 1.11 avec $0 < \theta < 1$) peut compenser parfaitement l'augmentation de l'effort en R&D et ainsi expliquer la stabilité de la croissance de long terme.

Théoriquement, des avancées ont été réalisées dans la compréhension des mécanismes technologiques qui sont à l'origine de la croissance semi-endogène. Li (2000) (2002) introduit des *spillovers* inter-sectoriels entre innovations de catégories différentes, c'est-à-dire les innovations en qualité, d'une part, et en variété, d'autre part.
En effet, les externalités positives de connaissance inter-industries sont statistiquement significatives d'après les études de Griliches (1992) (1995) et Verspagen (1997). Ce dernier détermine la "*matrice de proximité technologique des secteurs*".
De plus, Li (2002) souligne le fait dans la théorie de la croissance endogène sans effet d'échelle, l'équation (1.11) de production des nouvelles variétés avec $\theta = 1$ aboutit au résultat $\frac{\dot{B}}{B} = l$ qui est une forme de croissance semi-endogène pour le secteur de R&D spécialisé dans la différenciation horizontale. L'extension de la forme semi-endogène à tous les secteurs de R&D est une hypothèse moins restrictive que de considérer, comme dans la théorie de la croissance endogène sans effet d'échelle, que seule la variété est semi-endogène, mais pas la qualité. Les biens intermédiaires (x_j) sont différenciés verticalement (A_j) et horizontalement (B). La double échelle de différenciation s'écrit :

$$\begin{aligned} Y &= \left[\int_0^B \left(A_j x_j^{\alpha}\right)^{\alpha} dj\right]^{1/\alpha} \\ \text{avec } \dot{B} &= mnLB^{\theta_B} A^{\phi_B - 1} \\ \text{et } \dot{A} &= (1-m)\, nLA^{\phi_A} B^{\theta_A - 1} \end{aligned}$$

avec θ_B, θ_A, ϕ_A, $\phi_B > 0$, $\frac{\dot{L}}{L} = l$, et n la part du travail allouée à la R&D ($1 - n$ pour la production des biens intermédiaires), m la part des chercheurs alloués au secteur de R&D en variété des biens intermédiaires ($1 - m$ pour la production des qualités nouvelles). Ici nous ne détaillerons pas les programmes d'optimisation des agents qui permettent de déterminer les valeurs des parts de travail allouées aux différents secteurs

de production (*cf.* Li 2000 pour la résolution des programmes). À long terme, ces parts sont constantes et les taux de croissance des innovations dans les deux dimensions le sont également, ce qui permet d'écrire le système suivant :

$$\begin{aligned} l &= (1-\theta_B)\frac{\dot{B}}{B} + (1-\phi_B)\frac{\dot{A}}{A} \quad \text{et} \\ l &= (1-\theta_A)\frac{\dot{B}}{B} + (1-\phi_A)\frac{\dot{A}}{A} \end{aligned}$$

Le système précédent a pour solution unique :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{A}}{A} &= \frac{(\theta_B-\theta_A)\,l}{(1-\theta_A)(1-\phi_B)-(1-\theta_B)(1-\phi_A)} \quad \text{et} \\ \frac{\dot{B}}{B} &= \frac{(\phi_A-\phi_B)\,l}{(1-\theta_A)(1-\phi_B)-(1-\theta_B)(1-\phi_A)} \end{aligned}$$

Dès lors que le dénominateur est non-nul, la croissance de long terme est de type semi-endogène. Un dénominateur nul requiert deux conditions "fil du rasoir" qui sont $\theta_A = \theta_B$ et $\phi_A = \phi_B$, ce qui est plus restrictif. Les conditions "fil du rasoir" sont d'autant plus nombreuses (et donc plus restrictives encore) que les biens intermédiaires ont des dimensions multiples dans la qualité et que les externalités de connaissance inter-sectorielles existent : pour $k-1$ dimension dans la qualité des biens, on aura k conditions nécessaires pour obtenir une croissance de type endogène (*i.e.* $k-1$ qualités, plus un secteur supplémentaire de R&D pour la variété).

Cependant, des travaux récents sur la croissance endogène sans effet d'échelle n'ont plus recours aux hypothèses fortes sur la ligne horizontale de différenciation (qui postulait $\theta = 1$) et introduisent même les paramètres d'externalité dans la R&D (Peretto et Smulders 2002). Il ne s'agit pas de difficulté de la recherche dans la mesure où ces externalités sont positives. Le maintien des résultats de la croissance endogène est obtenu grâce au fait que les *spillovers* ne proviennent que de la part efficace des connaissances sectorielles. Cette part décroît à long terme à mesure que le nombre de firmes augmentent et, de ce fait, la connaissance sectorielle devient moins utile aux autres secteurs plus spécialisés. Dans ce cas de figure, l'effet d'échelle décroît dans le temps et il peut y avoir une croissance endogène sans effet d'échelle.

Taxinomie des modèles canoniques de la croissance sans effet d'échelle

Le tableau 1.b suivant classe les principaux articles de la littérature sur la croissance sans effet d'échelle en fonction du type de la différenciation des biens et du type de croissance à long terme (semi-endogène ou endogène). Nous remarquons que, comme montré précédemment, la différenciation par la qualité et la variété à la fois n'est pas propre à la croissance endogène sans effet d'échelle.

	différenciation horizontale	**différenciation verticale**	**différenciation bi-dimensionelle**
croissance semi-endogène	Jones 1995 Jones et *al.* 2000	Kortum 1997 Segerstrom 1998	Eicher et *al.* 1999 a et b Li 2000 2001 2002 Segerstrom 2000 Jones 2002
croissance endogène sans effet d'échelle			Aghion et *al.* 1998 chap.12 Dinopoulos et *al.* 1998 Peretto 1998 Young 1998 Howitt 1999 Peretto et *al.* 2002

Tableau 1.b. Taxinomie de la littérature de la croissance sans effet d'échelle

Nous précisons également que des modèles récents dont la croissance est fondée sur des innovations différenciées dans les deux dimensions n'apparaissent pas dans la taxinomie précédente mais feront l'objet de commentaires dans les chapitres suivants de la thèse. Nous pensons principalement aux travaux d'Acemoglu (2002) et de Segerstrom (2005) qui feront l'objet de commentaires dans le chapitre 4.

Conclusion sur les facteurs de la croissance

Nous avons détaillé les mécanismes économiques actuellement connus qui permettent d'expliquer et d'influencer la croissance durable de long terme. Parmi ces mécanismes, le R&D a donné lieu à de nombreuses recherches et à de nouveaux questionnements relatifs à la portée de la politique économique et au processus d'apparition des idées. La politique économique a-t-elle des effets transitionnels uniquement ? Ou sont-ils, au contraire, permanents ? La connaissance d'un secteur industriel bénéficie-t-elle aux autres secteurs ? Ou, *a contrario*, rend-t-elle plus délicate encore l'apparition de nouvelles idées dans les secteurs voisins ? Nous avons vu que les deux approches de la croissance sans effet d'échelle qui, pourtant, reposent sur le même socle s'opposent sur les réponses données à ces questions.
L'élément important est que, pour ces deux approches, la croissance économique est la conséquence d'activités économiques endogènes dans lesquelles les agents qui maximisent leurs profits peuvent s'approprier les rentes générées par les efforts qu'ils consacrent à la découverte d'idées nouvelles. L'appropriation des rentes est rendue possible grâce aux institutions environnantes (le marché, les conventions existantes...) qui définissent les règles et les droits de propriété, sachant que les mécanismes liés aux idées sont très différents des mécanismes du marché : les conventions scientifiques veulent que les idées ne puissent être "contrôlées", dans le sens où elles doivent devenir une connaissance commune, une fois qu'elles ont été formulées.
Ces différents éléments distinguent clairement les nouvelles théories de la croissance (que la croissance soit endogène sans effet d'échelle ou semi-endogène), des théories antérieures dans lesquelles le progrès technique était exogène.

Pour élargir ce chapitre, nous précisons que des études empiriques récentes ajoutent de nouveaux paramètres expliquant la croissance de long terme. Par exemple, Arora (2001) montre que les variations dans certains indicateurs de la santé des populations de pays différents influencent les variations à long terme de la croissance. Parmi ces indicateurs, la croissance et la santé sont co-intégrées sur les données chronologiques, avec un processus causal allant de la santé vers la croissance, et non pas l'inverse. Cet

exemple de paramètre explicatif de la croissance semble donc être un élément exogène à la sphère économique qui vient s'ajouter aux paramètres technologiques déjà mis en évidence par Jones (1995 b), Kortum (1997), Segerstrom (1998) et Li (2000).

En outre, l'impact de la santé sur la croissance pose la question, d'une part, des politiques permettant d'apporter des solutions aux problèmes de santé (politique de recherche, etc.) et, d'autre part, des causes de ces problèmes qui, dans certains cas, peuvent être de nature environnementale. Si ce dernier lien est établi, alors la politique environnementale peut entraîner une accélération de la croissance de long terme.

Du côté des effets des politiques environnementales sur la croissance économique, aucune étude empirique n'existe sur les canaux de transmission précisément que nous avons détaillés dans ce chapitre. Cependant, quelques résultats s'y rapportent indirectement. Elles concernent, par exemples, les rendements d'échelle croissants dans les activités de dépollution (Andreoni et Levinson 2001), l'éducation et son impact sur la santé des populations infantiles qui subissent des pollutions (Ostro, Eskeland, Feyzioglu et Sanchez 1998, Chay et Greenstone 2003) et l'incitation à innover grâce aux modifications dans les prix relatifs de l'énergie (Jaffe, Newell et Stavins 2002 et Popp 2002[15]). Mais ces études ne permettent pas de comparer l'importance relative sur la croissance économique des différents canaux de transmission.

Il faut avouer que la multitude des effets et l'interconnexion des phénomènes rendent l'évaluation de l'importance relative de ces facteurs très délicate. Cela est vrai à la fois pour les effets de la politique environnementale et pour les facteurs purs de la croissance de long terme que nous avons étudiés.

[15] Avec des données sur les brevets américains depuis 1970, Popp (2002) montre que l'impact des prix de l'énergie est positif sur les dépenses en R&D en faveur de la réduction de la consommation d'énergie. L'augmentation des prix se répercute majoritairement sous la forme de substitutions factorielles mais les dépenses supplémentaires en R&D environnementale sont significatives. De plus l'estimation économétrique de la productivité fait apparaître des rendements décroissants dans le temps de la R&D dans le domaine de l'énergie.

Références bibliograhiques

[1] **Abramovitz, M.** (1986) "Catching Up, Forging Ahead and Falling Behind", *Journal of Economic History* **46** Juin, 385-406.

[2] **Acemoglu, D.** (2001) "Directed Technical Change", *NBER Working Papers* (8287).

[3] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[4] **Aghion, P. & P. Howitt** (1998) *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press.

[5] **Aghion, P. & P. Howitt** (2004) "Growth with Quality-Improving Innovations: An Integrated Framework", document de travail Septembre.

[6] **Amable, B. & D. Guellec** (1992) "Les théories de la croissance endogène", *Revue d'économie politique* **102** (3), 313-374.

[7] **Andreoni, J. & A. Levinson** (2001) "The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve", *Journal of Public Economics* **80** (2), 269-286.

[8] **Arora, S.** (2001) "Health, Human Productivity, and Long-Term Economic Growth", *Journal of Economic History* **61** Septembre, 699-749.

[9] **Arrow, K. J.** (1962) "The Economic Implications of Learning by Doing", *Review of Economic Studies* **29** Juin, 153-173.

[10] **Backus, D. K., P. J. Kehoe & T. J. Kehoe** (1992) "In Search of Sclae Effects in Trade and Growth", *Journal of Economic Theory* **58**, 377-409.

[11] **Barro, R. J.** (1990) "Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth", *Journal of Political Economy* **98** (5), 103-125.

[12] **Barro, R. J.** (1991) "Economic Growth in a Cross Section of Countries", *Quarterly Journal of Economics* **106** *Mai*, 407-443.

[13] **Barro, R. J. & X. Sala-i-Martin** (1995) *Economic Growth*, McGraw-Hill Inc., New-York.

[14] **Benassy, J. P.** (1998) "Is There Always too Little Research in Endogenous Growth with Expanding Product Variety?", *European Economic Review* **42**, 61-69.

[15] **Bovenberg, A. L. & R. A. de Mooij** (1994) "Environmental tax reform and endogenous growth", *CentER discussion paper* (9498) Tilburg University.

[16] **Bovenberg, A. L. & S. Smulders** (1995) "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model", *Journal of Public Economics* **57**, 369-391.

[17] **Byrne, M.** (1997) "Is Growth a Dirty Word? Pollution, Abatement and Endogenous Growth", *Journal of Development Economics* **54**, 261-284.

[18] **Cass, D.** (1965) "Optimum Gorwth in an Aggregative Model of Capital Accumulation", *Review of Economic Studies.*

[19] **Cerisier, F. & K. Schubert** (2000) "L'analyse de l'innovation dans les modèles de croissance endogène", *Revue française d'économie* **15** (1), 123-171.

[20] **Chay, K. Y. & M. Greenstone** (2003) "Air Quality, Infant Mortality, and the Clean Air Act of 1970", NBER *Working Papers* (10053) *National Bureau of Economic Research.*

[21] **Cohen, W. & D. Levinthal** (1989) "Innovation and Learning: the two faces of R&D", *Economic Journal* **99**, 569-596.

[22] **Crifo-Tillet, P.** (1999) "L'analyse de l'innovation dans les modèles de croissance endogène", *Revue française d'économie* **14** (3) 189-221.

[23] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1998) "Schumpeterian Growth without Scale Effects", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 313-335.

[24] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1999) "Scale effect in Schumpeterian Model of Economic Growth", *Journal of Evolutionary Economics* **9** (2), 157-185.

[25] **Dixit, A. K. & J. E. Stiglitz** (1977) "Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity", *Americain Economic Review* **67** (3) Juin, 297-308.

[26] **Eicher, T. S. & S. J. Turnovsky** (1999 a) "Non-scale model of economic growth", *Economic Journal* **109**, 394-415.

[27] **Eicher, T. S. & S. J. Turnovsky** (1999 b) "Convergence in a Two-Sector Non-scale Gorwth Model", *Journal of Economic Growth* **4** Décembre, 413-428.

[28] **Fougeyrollas, A., P. Le Mouël & P. Zagamé** (2005) "Les nouvelles théories de la croissance en application : l'évaluation des politiques structurelles, le cas du protocole de Kyoto", *Revue économique* **56** (5) Septembre, 1089-1105.

[29] **Gastaldo, S. & L. Ragot** (2000) "Croissance endogène et pollution : une approche fondée sur le comportement du consommateur", *Annales d'économie et de statistiques* **57**.

[30] **Glachant, J.** (2001) "The Level of R&D Spending in the Variety-Based Endogenous Growth Model", *Research in Economics* (55), 291-303.

[31] **Gradus, R. & S. Smulders** (1993) "The Trade-off between environmental care and long-term growth: Pollution in three prototype growth models", *Journal of Economics* **58**, 25-51.

[32] **Griliches, Z.** (1992) "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics* supplement **92** (94), 29-47.

[33] **Griliches, Z.** (1995) "R&D and Productivity: Econometric Results and Measurement Issues", Chapitre 3 dans *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change* Paul Stoneman éds. Oxford: Blackwell, 52-89.

[34] **Grimaud, A.** (1999) "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management* **38**, 249-266.

[35] **Grimaud, A. & F. Ricci** (2004) "The Growth-Environment Trade-off : Horizontal versus Vertical Innovations", *The ICFAI Journal of Environmental Economics* **2** (1) Février, 7-40.

[36] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 a) "Quality Leaders in the Theory of Growth", Review of Economic Studies **58** (1), 43-61.

[37] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 b) *Innovation and Growth in the Global Economy*, The MIT Press Cambridge, MA.

[38] **Hart, R.** (2004) "Growth, Environment and Innovation: A Model with Production Vintage and Environmentally Oriented Research", *Journal of Environmental Economics and Management* **48** (3) Novembre, 1078-1098.

[39] **Hart, R.** (2005) "Scumpeterian growth and sustainability: creative destruction of the environment?", *Journal of Environmental Economics and Management* à paraître.

[40] **Hennin, P. & P. Ralle** (1994) "Les nouvelles Théories de la Croissance, quelques apports pour la politique économique", *Revue économique* hors-série, 75-100.

[41] **Hettich, F.** (1998) "Growth Effects of a Revenu-Neutral Environmental Tax Reform", *Journal of Economics* **67** (3), 287-316.

[42] **Howitt, P.** (1997) "Capital Accumulation and Innovations in the Endogeneous Growth Confronting the Facts", document de travail *Ohio State Univerity.*

[43] **Howitt, P.** (1999) "Steady Endogenous Growth with Populations and R&D inputs growing", *Journal of Political Economy* **107**, 715-730.

[44] **Howitt, P.** (2004) "Croissance endogène, productivité et politique économique : rapport de situation", *Observateur international de la productivité* (8).

[45] **Hung, V., P. Chang & K. Blackburn** (1993) "Endogenous Growth, Environment and R&D", dans *Trade, Innovation and Environment*, Carraro éds., Kluwer Academic Publishers.

[46] **Jaffe, A., R. Newell & R. Stavins** (2002) "Environmental Policy and Technological Change", *Environmental and Resource Economics* **22** (1-2), 41-69.

[47] **Jones, C. I.** (1995 a) "Time Series Tests of Endogenous Growth Models", *Quarterly Journal of Economics* **110** (2) Mai, 495-525.

[48] **Jones, C. I.** (1995 b) "R&D-Based Models of Economic Growth", *Journal of Political Economy* **103** (4) Août, 759-784.

[49] **Jones, C. I.** (1999) "Growth: With or Without Scale Effects?", *American Economic Association* Papers and Proceedings May, 139-144.

[50] **Jones, C. I.** (2000) *Théories de la croissance endogène*, de Boeck Université.

[51] **Jones, C. I.** (2002) "Sources of U.S. Economic Growth in a World of Ideas", *American Economic Review* **92** (1) Mars, 220-239.

[52] **Jones, C. I. & J. C. Williams** (2000) "Measuring the Sociale Return to R&D", *Quarterly Journal of Economics* **113** Novembre, 1119–1135.

[53] **Jones, C. I. & J. C. Williams** (2000) "Too Much of a Good Thing? The Economics of Investment in R&D", *Journal of Economic Growth* **5** Mars, 65-85.

[54] **van de Klundert, T. & S. Smulders** (1997) "Growth, Competition and Welfare", *Scandinavian Journal of Economics* **99**, 99-118.

[55] **Kocherlakota, N. R. & K. M. Yi** (1997) "Is there Endogenous Long-Run Growth? Evidence from the United Stade and United Kingdom", *Journal of Money, Credit and Banking* **29** Mai, 235-262.

[56] **Kortum, S.** (1997) "Research, Patenting and Technologial Change", *Econometrica* **65** (6) Novembre, 1389-1420.

[57] **Kuznets, S.** (1973) "Modern Economic Growth: Findings and Reflection", *American Economic Review* **63** (3) Juin, 247-258.

[58] **Kremer, M.** (1993) "Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990", *Quarterly Journal of Economics* **108** (3) Août, 681-716.

[59] **Li, C. W.** (2000) "Endogenous vs. semi-endogenous Growth in a two R&D sector Model", *Economic Journal* **110**, 109-122

[60] **Li, C. W.** (2001) "On the Policy Implications of Endogenous Technological Progress", *Economic Journal* **111** (C) Mai, 164-179.

[61] **Li, C. W.** (2002) "Growth and scale effects: the role of knowledge spillovers", *Economics Letters* **74**, 177-185.

[62] **Lucas, R. E.** (1988) "On the Mechanics of Development Planning", *Journal of Monetary Economics* **22** (1) Juillet, 3-42.

[63] **van Marrewijk, C. & J. Verbeek** (1993) *Disequilibrium Growth Theory: An Application of the Filippov Solution to Economics*, Avebury U.K.

[64] **Musu, I.** (1994) "On Sustainability Endogenous Growth", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (11.94).

[65] **Musu, I. & M. Lines** (1995) "Endogenous Growth and Environment Preservation", dans *Environmental Economics*, G. Boero et A. Silberston éds. McMillan Londres.

[66] **Nelson, R. R. & E. S. Phelps** (1966) "Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth", *American Economic Association* Papers and Proceedings **56** Mai, 69-75.

[67] **Nordhaus, W. D.** (1969) "An Economic Theory of Technological Change", *American Economic Association* Papers and Proceedings **59** Mai, 18-28.

[68] **Nordhaus, W. D.** (1994) "Do Real Outpu and Real Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not", document de travail *Cowles Foundation* (1078) New Haven Yale University.

[69] **North, D.** (1981) *Structure and Change in Economic History*, New-York Norton.

[70] **Ostro, B., G. Eskeland, T. Feyzioglu & J. Sanchez** (1998) "Air Pollution and Health Effects: A Study of Respiratory Illness Among Children in Santiago, Chile. World Bank, Country", *Economics Department of the World Bank* series papers (1932) Washington.

[71] **Oueslati, W.** (2002) "Environmental Policy in a Endogenous Growth Model with Human Capital and Endogenous Labor Supply", *Economic Modelling* **19**, 487-507.

[72] **Peretto, P. M.** (1998) "Technological Change and Population Growth", *Journal of Economic Growth* Décembre **3** (4), 283-311.

[73] **Peretto, P. M. & S. Smulders** (2002) "Technological Distance, Growth and Scale Effects", *Economic Journal* **112** Juillet, 603-624

[74] **Phelps, E. S.** (1962) "The New View of Investment: A Neoclassical Analysis", *Quarterly Journal of Economics* **76** (4) Novembre, 548-567

[75] **Phelps, E. S.** (1966) *Golden Rule of Economic Growth*, Norton New-York Novembre.

[76] **Popp, D.** (2002) "Induced Innovation and Energy Prices", *American Economic Review* **92** (1) Mars, 160-180.

[77] **Porter, M. E.** (1991) "America's Green Strategy", *Scientific American* **264** (168).

[78] **Porter, M. E. & C. van der Linde** (1995) "Toward a new concept of environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perpspectives* **9** (4), 97-118.

[79] **Rebelo, S.** (1991) "Long-run policy analysis and long-run growth", *Journal of Political Analysis* **99** (3), 500-521.

[80] **Ricci, F.** (2002) "Environmental Policy and Growth when Inputs are Differentiated in Pollution and Intensity", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (16).

[81] **Ricci, F.** (2004) "Channels of Transmission of Environmental Policy to Economic Growth: A Survey of the Theory", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (52.2004).

[82] **Romer, P. M.** (1986) "Increasing Return and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy* **94** (5) Octobre, 1002-1037.

[83] **Romer, P. M.** (1987) "Growth Based on Increasing Return Due to Specialization", *American Economic Review* **77** (2) Mai, 56-62.

[84] **Romer, P. M.** (1990) "Endogenous Technical Change", *Journal of Political Economy* **98** (5) Octobre part II, 71-102.

[85] **Rosendahl, K. E.** (1996) "Does Improved Environmental Policy Enhance Economic Growth?", *Environmental and Resource Economics* **9**, 341-364.

[86] **Rubio, S. J. & J. Aznar** (2000) "Sustainable Growth and Environmental Policies", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (00.25).

[87] **Schubert, K.** (1996) *Macroéconomie Comportements et Croissance*, Vuibert Economie.

[88] **Schubert, K. & P. Zagamé** (1998) *L'environnement, une nouvelle dimension de l'analyse économique*, Vuibert Economie.

[89] **Schumpeter, J. A.** (1942) *Capitalisme, Socialisme et démocratie*, Bibliothèque historique Payot 1990.

[90] **Segerstrom, P.** (1998) "Endogenous Growth Without Scale Effects", *American Economic Review* **88** (5) Décembre, 1290-1310.

[91] **Segerstrom, P.** (2000) "The Long-Run Growth Effects of R&D Subsidies", *Journal of Economic Growth* **5** Septembre, 277-305.

[92] **Segerstrom, P.** (2005) "Intel Economics", *International Economic Review* à paraître.

[93] **Shell, K.** (1967) "A Model of Inventive Activity and Capital Accumulation", dans *Essay on the Theory of Economic Growth* K. Shell éds. Cambridge, MA: MIT Press.

[94] **Smulders, S.** (1995 a) "Environmental Policy and Sustainable Economic Growth", *De Economist* **143** (2), 163-195.

[95] **Smulders, S.** (1995 b) "Entropy, Environment and Endogenous Growth", *International Tax and Public Finance* **2**, 319-340.

[96] **Solow, R. M.** (1956 a) "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quartely Journal of Economics* **70** (1) Février, 65-94.

[97] **Solow, R. M.** (1956 b) "Technical Change and the Aggregate Production Function", *Review of Economics and Statistics* **39** Août, 312-320.

[98] **Spence, M.** (1976) "Product Selection, Fixed Costs, and Monopolistic Competition", *Review of Economic Studies* **42** (2) Juin, 217-235.

[99] **Spence, M.** (1977) "Nonprice Competition", *American Economic Review* **67** (1), 255-259

[100] **Stockey, N.** (1998) "Are There Limits To Growth?", *International Economic Review* **39** (1), 1-31.

[101] **Uzawa, H.** (1965) "Optimum Technical Change in a Aggregative Model of Economic Growth", *International Economic Review* **6** Janvier, 18-31.

[102] **Vellinga, N.** (1994) "The Influence of Pollution as a Stock and as a Flow on Economic Growth Rates", document de travail *Eindhoven University of Technology* Juin.

[103] **Verdier, T.** (1993) "Environmental Pollution and Endogenous Growth: a comparison between Emission Taxes and Technological Standards", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (57.93).

[104] **Verspagen, B.** (1997) "Measuring Intersectoral Technology Spillovers: Estimates from the European and US Patent Oce Databases", *Economic System Research* **9**, 47-65.

[105] **Young, A.** (1998) "Growth without Scale Effects", *Journal of Political Economy* **106** (1), 41-63.

Chapitre 2
Technologie propre et croissance endogène

Introduction

Comme nous l'avons étudié dans le chapitre précédent, Stockey (1998) montre qu'une économie polluante caractérisée par une technologie de type AK ne peut pas se développer le long d'un sentier de croissance soutenable. Cela s'explique par le fait que l'amélioration continue de la qualité environnementale (nécessaire à la dynamique du développement durable au sens fort) entraîne une augmentation du coût marginal du capital qui pousse les agents à réduire leur investissement, rendant ainsi impossible la croissance des revenus. Par contre, dans le cadre du progrès technique exogène, si le taux de croissance de ce dernier est suffisant alors il est possible que le produit marginal du capital soit suffisamment élevé pour entraîner un investissement continu.

Dans ce chapitre, nous reprenons la structure des liens existants entre les sphères économique et environnementale développée par Stockey (1998) dans laquelle les émissions polluantes sont considérées comme un *input* implicite. Du point de vue de l'endogénéisation du progrès technique, nous nous basons sur les travaux, d'une part, d'Aghion et Howitt (1992) qui posent les mécanismes économiques de la croissance endogène fondée sur les innovations verticales et, d'autre part, d'Aghion et Howitt (1998) qui, reprenant le cadre d'analyse de Stockey (1998), déterminent les conditions d'existence de l'équilibre centralisé d'une économie polluante avec progrès technique endogène. Notre analyse de la décentralisation de l'optimum a pour références les articles de Grimaud (1999), sur l'équilibre décentralisé du modèle d'Aghion et Howitt (1998), et de Grimaud et Ricci (2004), sur les liens entre la différenciation verticale et l'environnement. Dans ces modèles, le lien entre la sphère économique et la sphère envi-

ronnementale est "indirect", dans la mesure où il transite par la fonction de production où la pollution est un *input* qui est substituable aux autres facteurs.

Notre contribution à ces théories consiste à considérer les liens entre l'environnement et la croissance à l'aide d'un effet direct de la productivité sur les émissions : aux biens intermédiaires plus productifs sont associés des émissions polluantes plus faibles. Seul Musu (1994) a étudié cet effet direct, mais son analyse s'inscrit dans la lignée des premiers modèles de croissance endogène (notion d'externalités d'apprentissage - Romer 1986 - *cf.* chapitre 1). Dans notre problématique, à mesure que les contraintes environnementales pèsent sur les agents pollueurs, on voit se développer les technologies propres et non-biaisées, c'est-à-dire qui réduisent les émissions et augmentent, tout de même, la productivité.[16] Les études empiriques de Porter et van der Linde (1995) et de Patris, Warrant et Valenduc (2001) mettent en évidence l'impact positif sur la production et la croissance que peuvent avoir les technologies propres.
L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les effets bénéfiques de ce type de progrès technique sur la croissance et l'environnement. Dans notre analyse, l'importance de cet effet direct est paramétré ce qui permet également de décrire le cas canonique (*i.e.* avec effet direct nul). Le modèle présenté dans ce chapitre peut donc être considéré comme une analyse qui englobe les théories actuelles sur la croissance endogène durable fondée sur les innovations. Dans cette perspective, la croissance endogène durable peut être obtenue plus facilement grâce à une amélioration des techniques de production menant à des processus productifs moins polluants.

Les sentiers de croissance équilibrée des économies centralisée et décentralisée sont présentés dans les sections 2.2 et 2.3 respectivement. L'existence du développement durable repose sur des conditions dont la plus forte est semblable à celle mise en évidence par Stockey (1998) et Aghion et Howitt (1998). Elle concerne l'élasticité in-

[16] A l'heure actuelle, les valeurs limites d'émission imposées par la réglementation sont fixées sur la base de l'emploi des "meilleures technologies disponibles à un coût acceptable" (Article 21 de l'arrêté modifié du 2 février 1998 dit "arrêté intégré"). Ces technologies sont répertoriées dans des documents européens qui présentent les meilleures technologies disponibles visant à réduire les émissions polluantes pour une activité donnée (BATREF en anglais pour *Best Available Technologies REFerences*). Le BATREF est un document de référence pour l'administration comme pour les industriels. Une partie de la liste des meilleures technologies disponibles de référence a été traduite en français et est consultable à l'adresse internet suivante : http://aida.ineris.fr/bref/

tertemporelle de substitution de la consommation : cette dernière doit être inférieure à l'unité pour que les profils optimaux de croissance du produit final et des émissions polluantes soient opposés. Avec cette condition, l'utilité marginale de la consommation est décroissante fortement et permet à la population de faire le choix de sacrifices dans sa consommation présente pour atteindre une croissance durable auto-entretenue. Parmi les conditions nouvelles de durabilité, l'existence d'un sentier de croissance équilibrée impose une limite au paramètre d'efficacité de la technologie pour réduire les émissions polluantes (notre effet direct). Si cette limite est atteinte, la technologie suffit en elle-même pour accéder au sentier de croissance durable : aucun effort en terme de dépollution n'est nécessaire.

La section 2.4 présente, d'une part, la dynamique des instruments économiques permettant la décentralisation de l'optimum et, d'autre part, la dynamique transitionnelle de l'équilibre de laisser-faire à l'équilibre optimal (croissance continue du produit) et durable au sens écologique (décroissance continue du stock de pollution). Grâce à trois instruments de politique économique, le sentier de croissance durable peut être atteint au prix d'une réduction initiale et temporaire du produit, pour finalement accéder à un nouvel équilibre de long terme caractérisé par une amélioration continue de la qualité de l'environnement et un taux de croissance des revenus strictement positif et supérieur à la situation de laisser-faire. Nous mettons donc en évidence la possibilité d'améliorer la croissance de long terme tout en résolvant les enjeux environnementaux : le dilemme croissance-environnement est dépassé. Cependant, plus le paramètre de régénération naturelle de l'écosystème est faible, plus la date à laquelle la diminution du stock de pollution s'éloigne. Seule une hausse du paramètre d'efficacité de la technologie pour réduire les émissions permet de réduire cet horizon. Dans le cadre de la lutte contre le dérèglement climatique, le recours aux technologies propres s'avère donc absolument nécessaire car la capacité de régénération de l'écosystème vis-à-vis des gaz à effet de serre est très faible ce qui rend difficile l'obtention du développement durable à un horizon acceptable.

Nous détaillons et discutons nos hypothèses dans la section suivante.

2.1 Présentation du modèle

Nous modélisons une économie composée de trois secteurs : le secteur de la recherche et développement caractérisé par des rendements constants ; le secteur des biens intermédiaires différenciés où un *continuum* de firmes spécialisées dans la production d'un bien intermédiaire se livrent une concurrence de type monopolistique ; le secteur concurrentiel du bien final, produit à l'aide des biens intermédiaires, du travail et des services de l'environnement.

2.1.1 L'activité de recherche et développement

L'amélioration de la qualité des biens intermédiaires

Notre analyse est fondée sur le modèle de croissance endogène d'Aghion et Howitt (1992). Les firmes de R&D qui se font concurrence sur un marché avec libre-entrée cherchent à améliorer le paramètre de qualité indiquant la productivité d'un bien intermédiaire. Si la recherche d'une firme aboutit à une innovation, elle en cède le droit exclusif de production (ou brevet) à une nouvelle firme de biens intermédiaires dont la durée de vie de son monopole sera finie, puisqu'une nouvelle amélioration de la qualité du bien viendra remplacer l'ancienne version. Par conséquent, les innovateurs privent les firmes productrices des biens intermédiaires de leurs rentes de monopoles par un processus de destruction créatrice comme l'a décrit Schumpeter (1934).
On peut déjà pressentir que ce phénomène va avoir deux effets opposés sur l'incitation privée à faire de la R&D :

- Un effet incitatif qui peut pousser au sur-investissement privé en R&D. La firme intermédiaire qui a amélioré à la marge la productivité d'un bien va bénéficier de tous les flux de profits futurs ;
- Un effet qui n'est pas incitatif du fait que l'entreprise sera remplacée par un nouvel innovateur ce qui diminue son gain espéré (il y a transfert de la rente de monopole).

Nous appréhenderons ce dernier effet dans la fonction de non-arbitrage en R&D à travers la probabilité d'être remplacé.

Formellement, la recherche est un processus aléatoire et sans mémoire, c'est-à-dire que la probabilité d'effectuer une innovation aujourd'hui ne dépend que de l'effort de recherche courant. L'aléa est modélisé comme dans les modèles de course à l'innovation par une loi de Poisson. Autrement dit, le secteur de la recherche est constitué d'un *continuum* de firmes spécialisées chacune dans un bien intermédiaire, dont la fonction de production est aléatoire et gouvernée par une loi de Poisson. Le paramètre d'arrivée instantanée de la loi de Poisson est β pour tous les types de biens intermédiaires. C'est la dernière innovation sur le bien j, dont la productivité est $\bar{A}_t = \max_j \{A_{jt}\}$, qui est appliquée au secteur qui innove. Chaque innovation vient accroître à la marge l'état de la connaissance. L'indice de productivité moyenne est $A_t = \int_0^1 A_{jt} dj$. La connaissance étant un bien non-rival et non-exclusif, elle est utilisée par tous les chercheurs gratuitement, sans que son utilisation simultanée ne dégrade sa qualité. Les innovations sont produites à partir, d'une part, du facteur travail engagé dans la découverte de nouvelles idées (nL) et, d'autre part, du savoir accumulé dans l'économie ($\bar{A}$).

Le taux d'arrivée de Poisson pour le secteur j à l'instant t est donné par $\beta n_{jt} L_t$. Le flux instantané d'innovations de l'économie s'écrit $p_t = \beta n_t L_t$ grâce à la propriété "d'additivité" des lois de Poisson. En outre, c'est la loi des grands nombres qui permet de dire qu'à chaque instant une innovation aura lieu, comme dans les modèles de différenciation horizontale où l'activité de recherche est déterministe (voir Cerisier et Schubert 2000). Le processus d'amélioration se produit donc à des taux différents et les niveaux atteints à un moment donné varient d'un secteur de recherche à l'autre. Enfin, au niveau agrégé, le capital vaut $K_t = \int_0^1 A_{jt} x_{jt} dj$.

Des rendements d'échelle constants dans l'activité de recherche

À partir du flux instantané des innovations, on peut réécrire l'amélioration de qualité des biens intermédiaires :

$$\overset{\bullet}{\bar{A}}_t = \delta \left(n_t L_t \right) \bar{A}_t$$

avec :

- δ le facteur de productivité des chercheurs tel que $\delta \equiv \kappa\beta$, avec $\kappa > 0$ un coefficient d'externalité représentant la taille de chaque innovation et β le paramètre de Poisson ;
- $\bar{A}_t$ la qualité de la dernière innovation ou la "qualité de pointe".

Sous l'hypothèse que la répartition d'apparition des innovations est identique d'un secteur à l'autre, et quelles que soient les qualités initiales des biens intermédiaires, on sait qu'à l'équilibre de chaque instant la qualité de pointe est proportionnelle à la qualité moyenne $\bar{A} = (1 + \kappa) A$, d'où $\frac{\dot{A}}{A} = \frac{\overset{\bullet}{\bar{A}}}{\bar{A}}$ le long du sentier de croissance équilibrée[17]. C'est pourquoi on pourra utiliser par la suite la relation $\dot{A}_t = \delta n_t L_t A_t$: le taux de croissance de la qualité moyenne des biens intermédiaires dépend donc de l'effort agrégé de recherche $n_t L_t$.

La croissance de notre économie sera tirée par ces innovations verticales.

2.1.2 Les émissions polluantes

L'évolution du stock de pollution et l'utilité des ménages

L'équation différentielle d'accumulation du stock de pollution s'écrit :

$$\dot{S}_t = P_t - \Theta S_t \tag{2.1}$$

avec P le flux des émissions polluantes ; $\Theta \in [0, 1]$ le taux d'assimilation naturelle ; $S \in \left[0, \bar{S}\right]$ le stock de pollution. Au-delà de $\bar{S}$, la production devient impossible dans

[17] Voir Aghion et Howitt (1992) pour la démonstration.

le sens où l'environnement ne remplit plus sa fonction de "support de vie".[18] Pour que le stock de pollution évolue de manière régulière, il faut que $g_S = g_P$ à long terme.

La fonction instantanée d'utilité du consommateur représentatif avec l'effet négatif du stock de pollution est donnée par la relation suivante :

$$U_t(c_t, S_t) = \frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}$$

avec B, la préférence pour l'environnement des ménages ; B, ε et ϖ sont positifs. Par la suite, on pose $B = 1$. L'élasticité intertemporelle de substitution est égale à $\frac{1}{\varepsilon}$ (ou l'inverse de l'élasticité de substitution instantanée de la consommation, c'est-à-dire $-\frac{cU_c''}{U_c'}$). U est une fonction additive isoélastique composée de la consommation par tête et du niveau du stock de la pollution tel que$\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial c_t} > 0$,$\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial S_t} < 0$, $\frac{\partial U'_{c_t}}{\partial S_t} = 0$. Ces hypothèses garantissent la concavité de la fonction d'utilité.

Les résultats de ce chapitre tiennent également avec des fonctions d'utilité non-additives pourvue que $\frac{\partial U' c_t}{\partial S_t} \leqslant 0$.[19]

L'effet direct des innovations sur les émissions polluantes

Nous formalisons le flux de pollution instantanée de la manière suivante :

$$P_t = \left(\frac{z_t^{\gamma}}{A_t^{\eta}}\right) Y_t \tag{2.2}$$

avec :

- $z_t \in [0, 1]$, l'intensité polluante de l'économie sous le contrôle du secteur du bien final. Si $z_t = 1$, l'intensité polluante est maximale (le secteur du bien final ne fait aucun effort pour protéger l'environnement) et la production atteint son niveau

[18] On décrit ici une économie polluante qui émet des rejets augmentant le stock de polluants présents dans l'environnement. On peut également décrire l'évolution de la qualité de l'environnement de façon assez proche, comme le font Aghion et Howitt (1998), à l'aide de l'équation suivante $\dot{E}_t = -P_t - \Theta E_t$ où E est la qualité de l'environnement qui se détériore dans le temps à cause des pollutions (P). Dans cette représentation, l'indicateur agrégé de la qualité environnementale est négatif et, cette fois, on a une contrainte de qualité minimale (E) : "*There is a finite upper limit to environmental quality, a limit that would only be reached if all production were to cease indefinitely*", Aghion et Howitt (1998).

[19] On parle dans ce cas de fonction d'utilité avec "effet de dégoût". Par opposition, le cas de "l'effet de compensation" (pour Michel et Rotillon 1996, plus de pollution pousse les ménages à consommer davantage afin de compenser les pertes d'utilité liées aux émissions, sans toutefois qu'ils ne fassent le lien entre une consommation plus élevée et des émissions plus importantes) est une hypothèse qui n'est pas propice au développement durable ; à moins que la consommation ne puisse porter sur des biens "verts", c'est-à-dire des biens différenciés des biens normaux par leurs faibles niveaux d'intensité polluante.

potentiel. Si au contraire $z_t < 1$, la production se trouve diminuée : ce qui implique que la production effective est plus faible que le niveau potentiel. La variable $1 - z_t$ peut être interprétée comme l'effort de dépollution à l'instant t.

- $\gamma > 0$ est un indicateur du caractère polluant de la production. Il permet de définir le volume effectif de production du secteur final (*cf.* équation 2.4) comme étant le produit de l'intensité polluante et de la production finale potentielle ;

- $\eta \geqslant 0$, l'efficacité de la technologie pour réduire les émissions polluantes. Ce paramètre permet de faire varier l'importance de l'effet direct des innovations sur les émissions polluantes.

L'introduction du paramètre η permet de prendre en compte l'impact des "meilleures technologies disponibles", fruits de l'activité de la recherche et développement, qui sont également les techniques de production les plus économes du point de vue de l'environnement et donc les moins polluantes. η reflète l'efficacité de la technologie au niveau de la réduction des émissions. En introduisant ce paramètre, l'amélioration de la qualité des biens intermédiaires devrait permettre d'économiser directement la ressource naturelle[20].
L'équation (2.2) montre que l'évolution de la pollution dépend de la comparaison entre l'indice de l'intensité polluante de la production (γ) et de l'efficacité de la technologie pour réduire les émissions (η).

D'après Grimaud et Ricci (2004), le fait de choisir ici les améliorations de qualité ne changera donc pas les résultats au niveau des taux de croissance à long terme (les niveaux pouvant varier). Par contre, il existe des raisons d'ordre économique qui justifient le recours à la variété ou à la qualité au dénominateur de l'équation (2.2) : un nombre plus important de biens intermédiaires permet d'atteindre une combinaison optimale, plus efficace, entre les différents biens ; une qualité meilleure permet d'économiser la ressource naturelle.

[20] Nous pouvons, en effet, parler de ressource naturelle, dans le sens où la pollution est nécessaire à la production et devient un facteur de production (*cf.* équation 2.3).

2.1.3 Le bien final homogène

Nous avons vu qu'il existe une dimension unique dans l'espace des innovations possibles (les innovations de procédés sont différenciées verticalement) avec deux effets : des biens intermédiaires plus propres et des gains de productivité. La fonction de production du bien final est donnée par :

$$Y_t = \left(A_t^{\eta-1} \int_0^1 A_{jt} P_{jt} dj \right)^{\frac{1}{\gamma+1}} \left[\left[(1-n_t)\, L \right]^{1-\alpha} \int_0^1 A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj \right]^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{2.3}$$

avec :

- $1 > \alpha > 0$, $\eta \geqslant 0$ et $\gamma > 0$;
- x_{jt}, la quantité du bien intermédiaire j utilisée dans le processus productif ;
- $1 - n_t$, la part du travail consacrée à la production du bien final (Y) et L, la population active constante que nous normalisons à un ;
- $A_{jt}P_{jt}$, les émissions polluantes émises par chaque bien intermédiaire et exprimées en terme de qualité environnementale.

Le recours au stock d'innovations A_t^{η} au dénominateur de l'équation (2.2) entraîne la présence de $A_t^{\eta-1} \int_0^1 A_{jt} P_{jt} dj$ au côté de $\int_0^1 A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj$ dans l'équation (2.3). L'équation (2.3) nous montre que la pollution est considérée comme nécessaire à la production : autrement dit, on ne peut pas éviter d'exploiter la ressource naturelle. Cependant, un développement durable est possible malgré cette caractéristique grâce à l'élasticité de substitution unitaire entre l'input naturel et les inputs physiques dans l'équation (2.3).

Sachant que la qualité moyenne est $A_t \equiv \int_0^1 A_{jt} dj$, que chaque bien intermédiaire est produit avec une fonction de production à rendement constant $K_t = A_t x_t$, et qu'il est optimal de produire la même quantité de chaque bien intermédiaire $x_{jt} = x_t \ \forall j$, on peut écrire que $P_{jt} = P_t \ \forall j$. Ainsi, nous pouvons reformuler la fonction de production du bien final (2.3) à l'aide de l'équation du flux de pollution (équation 2.2) :

$$Y_t = z_t \left[A_t \left(1 - n_t \right) \right]^{1-\alpha} K_t^{\alpha} \tag{2.4}$$

Si $z_t < 1$, la production effective (équation 2.4) est plus faible que le niveau potentiel (la technique de production "la plus sale").

Nous verrons que, de façon transversale à la thèse, l'environnement y est considéré comme étant un *input* de production qui est également un argument dans la fonction d'utilité des ménages.

D'autres travaux (*cf.* Grimaud et Rougé 2003) considèrent, au contraire, que les ressources non-renouvelables sont pertinentes, notamment pour l'étude du protocole de Kyoto et du dérèglement climatique ; l'enjeu principal concernant les émissions de CO_2 dont l'origine réside dans le recours actuel aux énergies fossiles. Dans ce cadre, la règle d'Hotelling est modifiée lorsque l'utilisation de la ressource entraîne une diminution de l'utilité *via* les pollutions qu'elle génère. Ainsi, la règle d'Hotteling dans sa forme "traditionnelle" n'est plus une règle d'efficacité !

Nous avons privilégier l'environnement (renouvelable) comme un input de production pour deux raisons principales : D'abord, dans Stockey (1998), les conditions pour un développement durable sont plus restrictives pour les ressources renouvelables que pour les ressources non-renouvelables ce qui rend l'étude des premières très importante ; Ensuite, notre analyse est davantage orientée vers ce que nos économies seront amenées à utiliser dans le processus productif, c'est pourquoi il s'agit ici de réflexions pour le long terme davantage qu'une description du système actuel (le fait de décrire un processus de croissance fondé sur les innovations verticales - croissance qualitative - va également dans ce sens).

Nous pouvons maintenant déterminer l'optimum de notre économie.

2.2 L'optimum social

Les principaux enjeux de cette section pour le développement durable sont de déterminer les conditions d'existence du sentier de croissance économique le long duquel la pollution se réduit.

2.2.1 Le critère de la maximisation du bien-être

Dans le but de maximiser l'utilité intertemporelle de l'agent représentatif, le planificateur social détermine les valeurs optimales de la consommation par tête (c_t), de l'intensité de la recherche (n_t) et de l'intensité polluante de l'économie (z_t). Les variables d'état sont le stock de capital (K_t), le stock d'idées (A_t) et le stock de pollution (S_t). Le programme du planificateur est le suivant

$$\left\{ \begin{array}{l} \max\limits_{\{(c_t,\, n_t,\, z_t)\}_{t=0}^{+\infty}} \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t} U_t(c_t, S_t) dt \\ \\ \text{sous les contraintes (s. c.) :} \left| \begin{array}{c} \dot{K}_t = Y_t - c_t \\ \dot{A}_t = \delta n_t A_t \\ \dot{S}_t = P_t - \Theta S_t \\ \lim\limits_{t \to +\infty} e^{\rho t} \vartheta_t K_t \geqslant 0 \\ \lim\limits_{t \to +\infty} e^{\rho t} \mu_t A_t \geqslant 0 \\ \lim\limits_{t \to +\infty} e^{\rho t} \zeta_t S_t \geqslant 0 \\ c_t \geqslant 0,\ \bar{S}_t \geqslant S_t \geqslant 0 \\ 1 \geqslant n_t \geqslant 0,\ 1 \geqslant z_t \geqslant 0 \\ K_0,\ A_0,\ S_0 \text{ donnés} \end{array} \right. \end{array} \right. \tag{2.5}$$

avec les prix implicites : ϑ_t le prix implicite du capital ; μ_t le prix implicite des innovations ; ζ_t le prix implicite du stock de pollution. Nous supposons que le capital se déprécie instantanément (autrement dit : une dépréciation totale en une période) puisque le capital ne s'accumule pas ici ; une production instantanée non-nulle en biens intermédiaires est effectivement nécessaire à la détermination du capital puisque $K_t = A_t x_t$.

Le problème (2.5) est résolu par la méthode du contrôle optimal qui repose sur le

principe du maximum de Pontryagin présenté en annexe A. Il s'agit donc de choisir, le long du sentier optimal, les valeurs des variables de contrôle à chaque instant qui maximisent l'hamiltonien courant (2.6). On peut considérer l'hamiltonien courant associé au problème (2.5) comme une estimation non-linéaire de la fonction d'utilité basée sur une évaluation du produit national net "vert", c'est-à-dire du niveau de production qui internalise les effets externes négatifs liés à la pollution :

$$\begin{aligned} H &= U(c,S) + \vartheta\dot{K} + \mu\dot{A} - \zeta\dot{S} \\ " &= \frac{c^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S^{1+\varpi}}{1+\varpi} + \vartheta\left(Y-c\right) + \mu\delta nA - \zeta\left(P-\Theta S\right) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Dans l'équation (2.6), on a omis les indices temporels dans la mesure où cela ne prête pas à confusion.

2.2.2 Le sentier optimal de croissance endogène durable

La résolution du programme de maximisation du planificateur permet de déterminer les taux de croissance optimale de long terme des variables économiques et environnementales de notre modèle[21] :

$$\begin{cases} g_c^o = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)\varepsilon+\eta(\varepsilon-1)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}\left(\delta-\rho\right) \\ g_A^o = \frac{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}{\gamma(1-\alpha)+\eta} g_c^o \\ n^o = \frac{1}{\delta}\frac{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}{\gamma(1-\alpha)+\eta} g_c^o \\ g_S^o = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi} g_c^o \\ g_z^o = \left(1-\alpha\right)\frac{\eta-\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}{\gamma(1-\alpha)+\eta} g_c^o \end{cases} \tag{2.7}$$

Nous retrouvons, avec $\eta = 0$, les résultats d'Aghion et Howitt (1998).

Sous quelles conditions notre économie centralisée atteindra-t-elle un sentier durable de croissance ?

---

[21] Le taux de croissance instantané est donnée par $g_x = \frac{\dot{x}}{x}$. A l'optimum, on note : g_x^o.
A l'équilibre de long terme on a $g_Y = g_K = g_C$ et $g_S = g_P$. *Cf.* annexe A pour le détail de la résolution de l'optimum social.

2.2.3 Les conditions nécessaires pour un développement durable

Nous avons retenu une conception du développement durable au sens fort, c'est-à-dire avec croissance (stricte) du produit final (avec $Y > 0$) et croissance (stricte) de la qualité de l'environnement ($S > 0$). Le système (2.7) nous donne les conditions requises sur la valeur du paramètre pour que le développement durable soit assuré :

> **1.** Le paramètre de productivité de la recherche doit être supérieur au taux de préférence des agents pour le présent :
>
> $$g_c^o > 0 \textbf{ si et seulement si } \delta > \rho \tag{2.8}$$

La condition (2.8), similaire au modèle AK dans lequel $A > \rho$, permet de rendre optimal le fait d'accumuler indéfiniment du capital puisque le produit marginal du capital est toujours supérieur au taux de préférence pour le présent. L'effort de recherche n'est donc consenti que si la productivité dans le secteur de la recherche est suffisamment élevée au regard de l'impatience des agents.

> **2.** L'élasticité intertemporelle de substitution doit être inférieure à l'unité :
>
> $$g_S^o < 0 \textbf{ si et seulement si } \varepsilon > 1 \tag{2.9}$$

La condition (2.9) est une nouveauté par rapport au modèle AK où l'on n'a pas d'autre condition que $\varepsilon > 0$. La condition (2.9) est une restriction très forte sur les préférences. Elle revient à poser une utilité marginale de la consommation fortement décroissante afin de permettre à la population de choisir de faire des sacrifices dans sa consommation présente, pour atteindre une croissance soutenable indéfiniment.

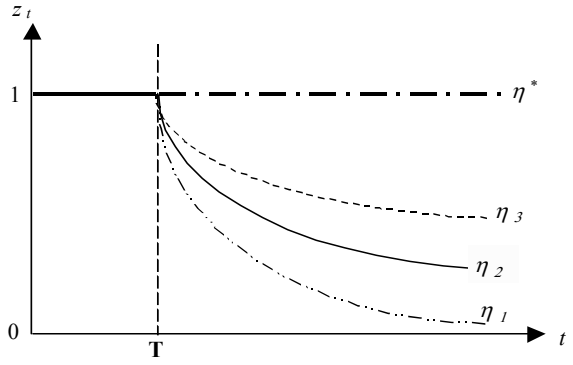
Les conditions précédentes sont semblables à celles d'Aghion et Howitt (1998) puisque l'introduction d'innovations plus respectueuses de l'environnement (ou technologies propres) revient formellement à introduire le terme supplémentaire $A_t^{\frac{\eta}{\gamma+1}}$ dans la fonction de production Cobb-Douglas (équation 2.3). Avec ces conditions, il existe un sentier soutenable de croissance équilibrée tel que $g_c^o > 0$, $g_S^o < 0$, $g_A^o > 0$, et $n^o \in [0, 1]$. L'économie tend alors vers ce que Michel (1993) appelle le "*paradis*

écologique". Il existe cependant d'autres conditions nécessaires à la caractérisation de l'ensemble du sentier de développement durable.

En effet, le signe de g_z^o dépend de l'efficacité des technologies à réduire les émissions polluantes (η). À l'état stable :

> **3.** L'efficacité de la technologie pour réduire les émissions polluantes a une valeur limite supérieure :
>
> $$g_z^o \leqslant 0 \textbf{ si et seulement si } \boldsymbol{\eta} \leqslant \frac{\varepsilon + \varpi}{1 + \varpi} \tag{2.10}$$

Pour $\eta = \eta^* = \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$, le secteur de R&D permet à lui seul la décroissance de la pollution sans que le secteur du bien final n'ait à réaliser d'effort pour diminuer son intensité polluante. Nous appelons cet état le paradis techno-écologique. Le graphique suivant retrace la dynamique de z pour différentes valeurs de η.



Graphique 2.a. Effet sur l'intensité polluante d'une politique environnementale commençant en T, dans le plan (temps, z) (avec $z_t = z_{0.} e^{g_z^o t}$, $\eta^* = \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$ et $\eta^* > \eta_3 > \eta_2 > \eta_1$).

η^*, la limite supérieure du paramètre d'efficacité, augmente avec ε et diminue avec ϖ : si l'élasticité intertemporelle de substitution augmente (et ε se réduit et tend vers 1) alors l'efficacité "maximale" peut être plus faible puisque la vitesse de réduction du stock de pollution est réduite (*cf.* système 2.7) ; plus le paramètre ϖ est élevé, moins l'environnement est valorisé dans le critère de bien-être.

Enfin, la dernière condition nécessaire concerne le taux de régénération naturelle

(Θ). Cette condition assure la positivité du capital naturel à long terme $(P/S)_{ss}$ (*cf.* annexe A / Dynamique transitionnelle de l'économie centralisée) :

4. Le taux de régénération naturelle doit être suffisamment élevé :

$$(P/S)_{ss} > 0 \textbf{ si et seulement si } \Theta > \frac{\varepsilon - 1}{1 + \varpi} g_c^o \tag{2.11}$$

Nous reviendrons sur l'interprétation de la condition (2.11) lors de la description de la dynamique transitionnelle du modèle (section 2.4.4).

Sous les quatre conditions ci-dessus, une accumulation adéquate des innovations permet de maintenir un niveau de production strictement positif[22] malgré la diminution continue de l'intensité polluante (donc qui tend vers zéro à long terme). On peut parler d'un processus de dématérialisation dans lequel la richesse croît continûment grâce à l'amélioration infinie de la qualité des biens. De plus, comparé à Aghion et Howitt (1998), le sentier de croissance équilibrée de notre économie est caractérisé par un taux de croissance économique supérieur, un stock de pollution qui décroît plus rapidement, une intensité de la recherche plus faible et une intensité polluante de l'économie qui décroît moins vite[23] :

$$g_c^o > g_c^{A-H},\ g_A^o < g_A^{A-H},\ |g_S^o| > \left|g_S^{A-H}\right|,\ |g_z^o| < \left|g_z^{A-H}\right|$$

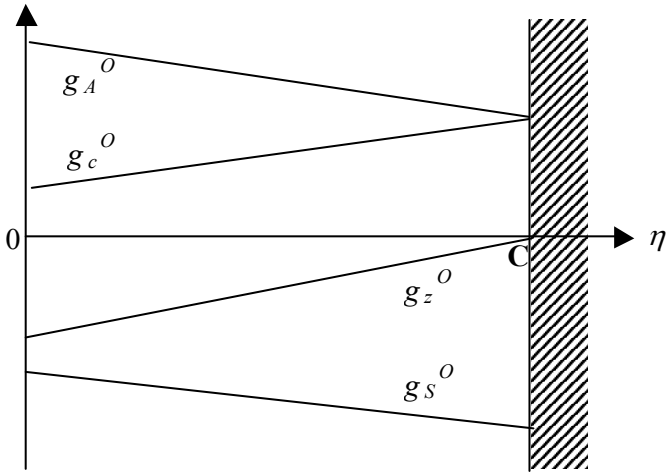
Comme attendu pour une technologie propre dont les gains en terme de qualité de l'environnement sont obtenus sans effet d'éviction, il n'est pas nécessaire de faire autant de recherche et d'accumuler autant d'innovations pour compenser la diminution du facteur naturel dans la production. La croissance s'en trouve augmentée parce que la firme peut réaliser moins d'effort pour diminuer son intensité polluante. Le graphique 2.b montre l'influence du rendement η, toutes choses égales par ailleurs, sur les taux de croissance de long terme de l'économie centralisée. Avec la valeur limite du paramètre ($\eta = \eta^*$: point **C** du graphique et condition 2.10), on a le taux de décroissance maximal du stock de pollution et un taux de croissance des revenus exactement égal à

---

[22] En effet, nous montrerons à la section suivante que la variable $M \equiv \frac{Y}{K}$ est constante et strictement positive à long terme.

[23] L'exposant $A - H$ caractérise les variables du modèle d'Aghion et Howitt (1998).

celui des innovations. Il s'agit alors du cas habituel des modèles de croissance endogène sans environnement (et avec fonction de production Cobb-Douglas). $\eta = \eta^*$ revient à éliminer le fait que le capital naturel soit nécessaire à la production. On retombe en effet sur une fonction de production finale de type $Y_t = [A_t (1 - n_t) L]^{1-\alpha} K_t^{\alpha}$ sans influence de la sphère environnementale.



Graphique 2.b. La nature du sentier de croissance durable, fonction du degré des rendements de la qualité environnementale des biens intermédiaires, dans le plan (temps, taux de croissance) (au point **C** : $\eta = \eta^* = \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$)

2.2.4 Quelques résultats numériques

Nous n'avons pas toujours été en mesure d'étudier analytiquement les propriétés du sentier optimal de croissance durable. C'est pourquoi nous réalisons, dans cette section, à titre d'exemple, des simulations numériques des trajectoires optimales. Nous étudions le cas de deux économies qui diffèrent par la valeur du paramètre η.

Pour cela, nous donnons les valeurs suivantes aux paramètres du modèle :

δ	β	ρ	ε	α	ϖ	γ	Θ
0.07	0.04	0.04	1.25	0.25	0.5	2	0.005

Nous choisissons les valeurs en fonction des conditions d'existence du sentier de croissance équilibrée, c'est-à-dire les conditions (2.8), (2.9), (2.10) et (2.11). Les équili-

bres de long terme obtenus sont optimaux dans le sens où ils vérifient les conditions de transversalité et les contraintes d'encadrement de toutes les variables.[24]

$\Theta = 0.005$ signifie que les émissions polluantes demeurent 200 ans dans l'écosystème. Sur ce point, les études récentes du *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) soulignent les difficultés techniques pour évaluer un taux de régénération globale, à la fois pour l'ensemble des polluants concernés et pour tous les écosystèmes considérés.[25] Pour cette raison, ces études préfèrent évaluer séparément les capacités maximales d'assimilation en niveaux et les "temps de résidence" (*time turnover*) pour les différents "réservoirs" de l'écosystème (par exemple, les "*fonctions de réponses impulsionnelles*" des terres, des océans et de l'atmosphère - *cf.* Thompson et Randerson 1999 - Les estimations varient grandement d'un écosystème à l'autre). Les estimations du taux d'assimilation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre varient entre 20 % et 0.5 %, soit un temps de résidence allant de 50 ans jusqu'à 200 ans. La valeur que nous avons donnée au paramètre Θ correspond aux estimations les plus hautes de l'assimilation naturelle des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Ensuite, pour deux valeurs particulières de η, c'est-à-dire $\eta = 0$ (absence d'effet direct) et $\eta = 1$ (rendement unitaire), nous étudions la sensibilité de la solution aux autres paramètres du modèle à l'aide de variations de 10 % de la valeur des paramètres (il s'agit d'augmentations de 10 % pour tous les paramètres ; sauf pour ε qui subit une baisse de 10 % car, dans le cas contraire, la condition (2.11) de durabilité forte ne serait pas tenue pour $\Theta = 0.05$). Les tableaux suivants présentent les résultats des tests de sensibilité pour $\eta = 0$ (tableau 2.a) et $\eta = 1$ (tableau 2.b).

---

[24] *Cf.* annexe A / Existence de la trajectoire optimale de croissance durable.

[25] Sur ce point l'IPCC (2001) conclut : "*CO_2 emissions from fossil fuel burning are virtually certain to be the dominant factor determining CO_2 concentrations during the 21^{st} century. There is scope for land-use changes to increase or decrease CO_2 concentrations on this time-scale. If all of the carbon so far released by land-use changes could be restored to the terrestrial biosphere, CO_2 at the end of the century would be 40 to 70 ppm less than it would be if no such intervention had occurred. By comparison, global deforestation would add two to four times more CO_2 to the atmosphere than reforestation of all cleared areas would subtract. There is sufficient uptake capacity in the ocean to incorporate 70 to 80% of foreseeable anthropogenic CO_2 emissions to the atmosphere, this process takes centuries due to the rate of ocean mixing. As a result, even several centuries after emissions occurred, about a quarter of the increase in concentration caused by these emissions is still present in the atmosphere* [...] *Stabilisation requires that net anthropogenic CO_2 emissions ultimately decline to the level of persistent natural land and ocean sinks, which are expected to be small*".

$\boldsymbol{\eta = 0}$	Réf.	$\triangle^{+}\boldsymbol{\delta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\eta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\Theta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\rho}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\alpha}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\gamma}$	$\triangle^{-}\boldsymbol{\varepsilon}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\varpi}$
$\mathbf{g}^{o}_{c_{ss}}$	1.48%	23.33%	⁄	0	−13.33%	−1.30%	3.61%	9.77%	0.18%
$\mathbf{n}^{o}_{ss}$	37.57%	12.12%	⁄	0	−13.33%	0.18%	−0.51%	6.34%	−0.02%
$\mathbf{g}^{o}_{A_{ss}}$	2.63%	23.33%	⁄	0	−13.33%	0.18%	−0.51%	6.34%	−0.02%
$\mathbf{g}^{o}_{z_{ss}}$	−0.86%	23.33%	⁄	0	−13.33%	−1.30%	−5.81%	1.93%	−0.28%
$\mathbf{g}^{o}_{S_{ss}}$	−0.25%	23.33%	⁄	0	−13.33%	−1.30%	3.61%	−45.11%	−3.05%
$\mathbf{M}^{o}_{ss}$	0.3510	7.38%	⁄	0	2.62%	−9.47%	−1.92%	−0.38%	0.06%
$\mathbf{a}^{o}_{ss}$	0.3362	6.67%	⁄	0	3.32%	−9.82%	−25.87%	−0.83%	0.05%
$\mathbf{N}^{o}_{ss}$	0.0025	−22.70%	⁄	19.73%	12.97%	1.27%	−3.51%	43.89%	2.97%
$\mathbf{b}^{o}_{ss}$	0.0462	0.62%	⁄	1.08%	8.30%	−0.03%	0.10%	−1.20%	0.18%

Tableau 2.a. Résultats des simulations numériques pour $\eta = 0$, avec les indices o pour l'optimum et ss pour *steady state* et les variables (stables à long terme) : $M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}$, $a_t \equiv \frac{C_t}{K_t}$, $N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}$, $b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t}$ et n_t.

$\boldsymbol{\eta = 1}$	Réf.	$\triangle^{+}\boldsymbol{\delta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\eta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\Theta}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\rho}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\alpha}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\gamma}$	$\triangle^{-}\boldsymbol{\varepsilon}$	$\triangle^{+}\boldsymbol{\varpi}$
$\mathbf{g}^{o}_{c_{ss}}$	2.28%	23.33%	3.22%	0	−13.33%	−0.10%	0.29%	13.67%	0.16%
$\mathbf{n}^{o}_{ss}$	34.72%	12.12%	−0.75%	0	−13.33%	0.02%	−0.07%	10.12%	−0.04%
$\mathbf{g}^{o}_{A_{ss}}$	2.43%	23.33%	−0.75%	0	−13.33%	0.02%	−0.07%	10.12%	−0.04%
$\mathbf{g}^{o}_{z_{ss}}$	−0.11%	23.33%	60.30%	0	−13.33%	−1.46%	−5.39%	−43.16%	−3.07%
$\mathbf{g}^{o}_{S_{ss}}$	−0.38%	23.33%	3.22%	0	−13.33%	−0.10%	0.29%	−43.16%	−3.07%
$\mathbf{M}^{o}_{ss}$	0.4110	9.70%	1.34%	0	0.29%	−9.13%	−2.91%	0.96%	0.07%
$\mathbf{a}^{o}_{ss}$	0.3881	8.90%	1.23%	0	1.09%	−9.66%	−3.10%	0.21%	0.06%
$\mathbf{N}^{o}_{ss}$	0.0012	−73.68%	−10.16%	41.58%	42.10%	0.32%	−0.91%	136.31%	9.69%
$\mathbf{b}^{o}_{ss}$	0.0479	0.94%	0.13%	1.07%	7.9892%	−0.004%	0.01%	−1.75%	0.27%

Tableau 2.b. Résultats des simulations numériques pour $\eta = 1$, avec les indices o pour l'optimum et ss pour *steady state* et les variables (stables à long terme) : $M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}$, $a_t \equiv \frac{C_t}{K_t}$, $N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}$, $b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t}$ et n_t.

Réf. : simulation numérique de référence. $\triangle^{+}x$: augmentation de 10 % du paramètre x. $\triangle^{-}y$: diminution de 10 % du paramètre y. Tous les % sont arrondis au deuxième chiffres après la virgule (*i.e.* ici le point en anglais).

Commentons ces résultats.

Tout d'abord, on retrouve les résultats mis en évidence analytiquement dans la section précédente, à savoir que les technologies propres ($\eta > 0$) permettent d'atteindre des objectifs environnementaux plus élevés tout en garantissant plus de croissance économique et un recours moins important en recherche.

Ensuite, les résultats des tableaux ci-dessus montrent que l'ensemble des taux de croissance est particulièrement sensible aux paramètres δ, ρ et ε : une variation de

10 % de l'un de ces paramètres entraîne une modification plus forte des agrégats. Ces paramètres sont des variables clefs dans l'analyse en statique comparatives d'économies différentes. Par ailleurs, on remarque que g_z^o est particulièrement sensible à η : une hausse de 10 % de η conduit à une augmentation de 60.30 % de l'effort de dépollution. Les conditions de durabilité de la croissance endogène reposent sur l'ensemble formé par les quatre paramètres (δ, ρ, ε, η). Nous détaillons les mécanismes dans la suite de notre commentaire.

Si, à présent, on lit les résultats en fonction de la valeur du paramètre η (pour η qui vaut 0 ou 1), les variations des paramètres δ, ρ et Θ ont des impacts identiques sur les deux économies (tableaux 2.a et 2.b).

Une augmentation de δ entraîne à la hausse tous les taux de croissance des agrégats puisqu'un indice de productivité des chercheurs plus élevé permet d'atteindre une croissance de long terme forte et ainsi des objectifs de dépollution plus grands.

Une augmentation du taux de préférence pour le présent (ρ) entraîne au contraire à la baisse tous les taux de croissance de long terme parce que l'effort de recherche (qui représente une perte de production immédiate) est revu à la baisse ce qui réduit d'autant les possibilités de substitution factorielle entre le capital intangible (A) et le capital naturel (P).

Le taux d'assimilation naturelle (Θ) n'a lui aucun effet sur les taux de croissance de long terme mais joue logiquement sur les variables composites de la sphère environnementale : N et b.

On distingue enfin les paramètres α, γ et ϖ qui ont des effets allant dans le même sens pour les deux économies (*i.e.* $\eta = 0$ et $\eta = 1$), du paramètre ε qui a un impact différent sur l'intensité polluante (z) entre les deux économies.

Pour ε, avec $\eta = 0$, les variations des taux de croissance de l'intensité polluante et du stock de pollution vont dans le même sens : une diminution de l'élasticité de substitution intertemporelle de la consommation conduit à des profils de consommation moins fluctuants, favorisant la croissance économique au détriment de l'amélioration de la qualité environnementale parce que les consommateurs sont réticents à modifier leurs

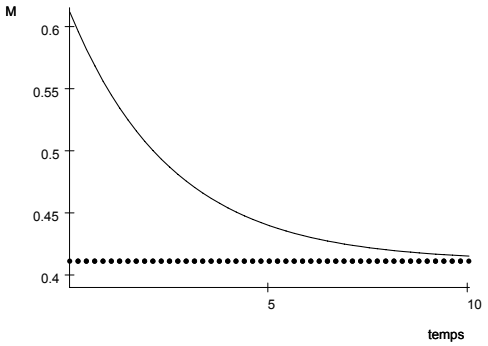
habitudes de consommation. Avec $\eta = 1$, on peut faire moins d'effort de dépollution, puisque g_S diminue (-43.16 %).

Pour α, on fait plus de recherche lorsque ce paramètre augmente, puisque les gains espérés des innovateurs s'accroissent avec le pouvoir de marché des firmes du secteur intermédiaire. Par contre, la croissance économique et la décroissance du stock de polluants sont plus faibles parce que les coûts de production du secteur final augmentent à cause des taux de marge qui croissent avec le pouvoir de marché du secteur intermédiaire.

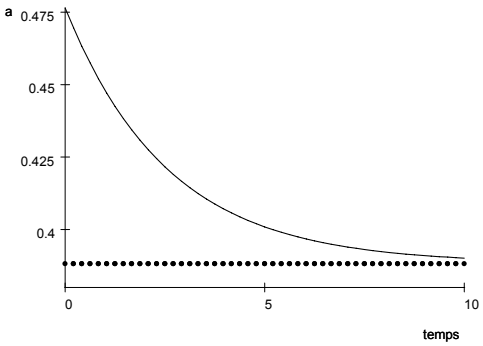
Le paramètre γ traduit le rendement des efforts de dépollution sur la réduction des émissions. Plus ce rendement est fort, plus il est possible d'atteindre des objectifs élevés à moindre coût de dépollution (par exemple -5.39 % avec $\eta = 1$).

Pour terminer, le paramètre ϖ joue sur l'utilité marginale du stock de pollution : plus ϖ est élevé, moins l'environnement est valorisé dans le critère de bien-être du centralisateur. Ainsi, les objectifs environnementaux sont revus à la baisse ce qui permet d'accélérer la croissance de long terme (par exemple $+0.18$ % avec $\eta = 0$).

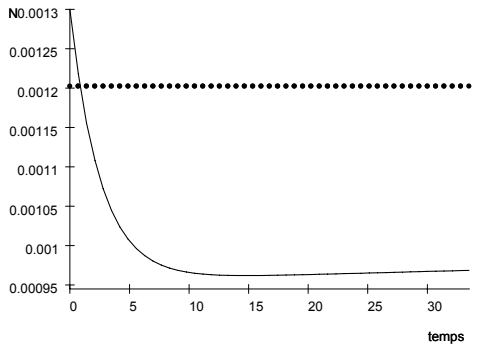
Les graphiques ci-dessous présentent la dynamique (pour $\eta = 1$) des variables composites stables à long terme (*i.e.* $M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}$, $a_t \equiv \frac{C_t}{K_t}$, $N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}$, $b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t}$ et n_t), à partir des conditions initiales permettant d'être sur le bras stable de la dynamique en point-selle, jusqu'aux valeurs stables du long terme :



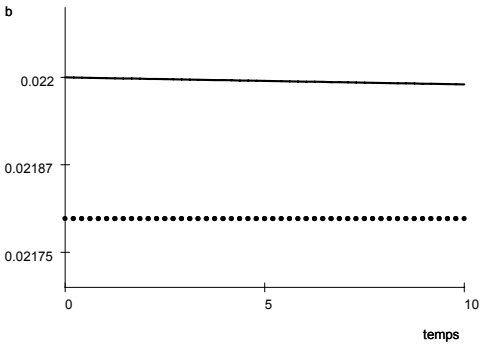
(a) M



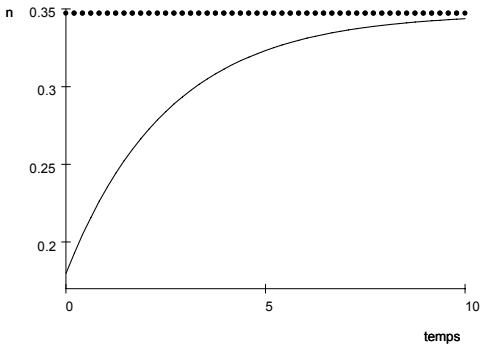
(b) a



(c) N



(d) b



(e) n

Graphique 2.c. Dynamique optimale avec $\eta = 1$ pour $N_0 = 0.0013$ et $b_0 = 0.047$
(a) $M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}$, (b) $a_t \equiv \frac{C_t}{K_t}$, (c) $N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}$, (d) $b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t}$, (e) n_t
En abscisses : le temps ; en pointillés : valeurs stationnaires des variables

À titre d'exemple, le déterminant de la matrice jacobienne du système dynamique évaluée à l'état stationnaire (les détails sont présentés en annexe A) vaut 1.4737×10^{-5}. Le déterminant est positif et les valeurs propres négatives associées aux vecteurs propres

concernent les deux variables prédéterminées (ou variables *backward*) b et N. D'après les conditions de Blanchard et Khan, l'équilibre stationnaire du système formé par les équations dynamiques des variables composites est un point-selle. Pour tous les couples de valeurs initiales (b_0, N_0), il existe un unique triplet de valeurs initiales pour les variables de saut (ou variables non-prédéterminées) (M_0, a_0, n_0) qui mène le long du sentier de croissance à l'équilibre de long terme.
Sur le graphique 2.c.(c), pour la trajectoire de $N \equiv \frac{P}{S}$, on remarque que la variable N est toujours inférieure au taux d'assimilation ($\Theta = 0.005$) et par conséquent $g_{St} < 0$ pour tout t. Le fait que le stock des émissions polluantes décroisse immédiatement s'explique par notre choix sur N_0. De plus, l'ajustement dynamique de N est particulier dans le sens où il y a "surréaction", c'est-à-dire que la dynamique n'est pas monotone décroissante puisqu'après être passée sous sa valeur de long terme avant la deuxième période, N connaît un minimum autour de la quinzième période et reprend ensuite une dynamique asymptotique vers sa valeur constante de long terme. Cela retrace le fait que le flux des émissions polluantes est réduit très fortement dès la première période.
Nous avons vérifié que les contraintes de signes et d'encadrements sur les variables étaient vérifiées pour tout instant.

Nous étudions maintenant le comportement de l'économie décentralisée.

2.3 L'économie décentralisée

Nous allons voir que, sans intervention étatique, l'économie ne peut pas atteindre le sentier de croissance durable défini dans cette section, à cause des multiples externalités et distorsions de marché présentes dans l'économie.

2.3.1 Trois instruments économiques pour rétablir l'optimum

Notre économie souffre de trois types de distorsions de marché et d'effets externes. Nous rappelons rapidement ces éléments déjà rencontrés dans la section 2.1 de ce chapitre.

Premièrement, le pouvoir de monopole des producteurs des biens intermédiaires conduit à vendre à un prix supérieur au coût marginal de production.
Ensuite, le secteur du bien final est à l'origine d'un effet externe : il produit avec une intensité polluante maximale s'il n'est soumis à aucun paiement pour les polluants qu'il émet.
L'activité de R&D est la dernière source d'externalités. On devrait dire des externalités multiples. La première externalité positive concerne le fait que le stock de connaissance soit un bien public. Ce phénomène entraîne un effort trop faible de recherche dans l'économie de laisser-faire parce que le rendement privé de la recherche est inférieur à son rendement social. Il existe un deuxième effet distorsif dans la R&D qui est lié à la différenciation verticale : le phénomène de destruction créatrice entraîne l'effort de recherche dans deux directions différentes : trop de recherche lorsque les rentes que peut s'accaparer l'innovateur potentiel sont surestimées ; et pas assez de recherche lorsque l'innovateur potentiel surestime la probabilité d'être remplacé. Parce que l'objectif unique porte sur l'intensité de la recherche, l'ensemble de ces externalités peut être internalisé grâce à un seul instrument économique qui incite à l'effort de R&D optimal.

D'après la règle de Tinbergen qui veut que l'on se fixe autant d'instruments économiques que d'objectifs à atteindre, l'étude de ce modèle de croissance durable s'ouvre donc sur la recommandation des trois instruments suivants :

- D'abord, une subvention à l'achat des biens intermédiaires (τ) qui est équivalente à subventionner la production des biens intermédiaires pour que les producteurs abandonnent leur pouvoir de monopole ;
- Ensuite, une taxe incitative sur les émissions polluantes du secteur du bien final (h) ;[26]
- Enfin, une subvention de l'activité de la R&D qui portera sur une baisse du coût du travail de la recherche (σ).

Déterminons l'équilibre de marché de notre économie.

2.3.2 Le comportement des agents

Nous déterminons, agent par agent, les demandes issues de l'optimisation de leur comportement.

Le secteur du bien final

La firme maximise donc son profit instantané (Ψ) afin de déterminer son intensité polluante (z), sa demande de travail ($1-n$) et la quantité des biens intermédiaires qu'elle désire (x_j). Le profit se compose du chiffre d'affaires (on suppose que le prix de vente du bien final est le numéraire.) auquel est soustrait les coûts de production, dont la taxe sur les émissions polluantes (h). Ainsi :

$$\begin{cases} \max\limits_{(1-n_t,\, x_{jt},\, zt)} \Psi_t = Y_t - w_t\left(1-n_t\right) - \int\limits_0^1 p_{jt}\left(1-\tau_t\right)x_{jt}dj - h_t \int\limits_0^1 P_{jt}dj \\ \text{s. c. } / \left| \begin{array}{c} \int\limits_0^1 P_{jt}dj = \frac{z_t^{\gamma} Y_t}{A_t^{\eta}} \text{ et} \\ Y_t = z_t\left(1-n_t\right)^{1-\alpha} \int\limits_0^1 A_{jt}x_{jt}^{\alpha}dj \end{array} \right. \end{cases}$$

avec w_t, le taux de salaire et p_{jt}, le prix du bien intermédiaire j. Le producteur du bien

[26] Concernant la pollution, Grimaud (1999) propose la création d'un marché de droits à polluer qui consiste, dans une économie produisant un bien final homogène, à fixer le montant maximal des émissions à chaque instant. Les montants accordés diminuent dans le temps ce qui, par l'intermédiaire du marché des permis négociables, détermine un prix "d'équilibre" toujours croissant. Nous étudions ici les effets d'une taxe sur les émissions qui a les mêmes caractéristiques que le prix des permis à polluer (croissance du prix), la détermination des quantités de polluants émises étant décentralisée au secteur final.

final décide donc de l'intensité polluante de sa production ce qui détermine le niveau des émissions.

La résolution de ce programme aboutit aux conditions du premier ordre suivantes :

$$w_t = (1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{Y_t}{1-n_t} \tag{2.12}$$

$$p_{jt} = \left(\frac{\alpha}{1-\tau}\right)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right) z_t\,(1-n_t)^{1-\alpha}\,A_{jt}x_{jt}^{\alpha-1} \tag{2.13}$$

$$z_t = \begin{cases} \left[\frac{(\gamma+1)h_t}{A_t^{\eta}}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}, \text{ si } h_t > \frac{A_t^{\eta}}{\gamma+1} \\ 1, \text{ si } h \leqslant \frac{A_t^{\eta}}{\gamma+1} \end{cases} \tag{2.14}$$

On retrouve dans l'équation (2.13) le fait connu dans la littérature sur la différenciation verticale que la quantité de bien intermédiaire demandée x_j décroît avec son prix tel qu'il est perçu par le secteur final $(1-\tau)\,p_j$, croît avec la qualité du bien intermédiaire A_j et, enfin, décroît avec l'effort de dépollution $(1-z)$. L'équation (2.14) nous montre qu'avec l'existence d'un effet direct de la R&D sur la pollution (η), l'effort de dépollution $(1-z)$ décroît avec la qualité moyenne des biens intermédiaires. Cependant, **si la taxe est suffisamment élevée et croît continûment** (*i.e.* $h_t > \frac{A_t^{\eta}}{\gamma+1}$, soit $g_h > \eta g_A$) **alors** z_t **diminuera continûment le long du sentier de croissance régulière**.

Le secteur des biens intermédiaires

Le programme instantané d'une firme monopolistique j du secteur des biens intermédiaires est :

$$\begin{cases} \max\limits_{(x_{jt})} \Pi_{jt} = p_{jt}x_{jt} - r_t A_{jt}x_{jt} \\ \text{s. c. } / \;\Big|\; p_{jt} = \left(\frac{\alpha}{1-\tau}\right)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right) z_t\,(1-n_t)^{1-\alpha}\,A_{jt}x_{jt}^{\alpha-1} \end{cases}$$

Fort de son pouvoir de marché qui lui permet de connaître la demande inverse qui lui

est adressée, la résolution du programme de la firme j conduit à :

$$p_{jt} = \frac{r_t A_{jt}}{\alpha} \tag{2.15}$$

$$x_{jt} = (1-n_t)\left[\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{\alpha^2 z_t}{(1-\tau)\,r_t}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}} = x_t,\ \forall j \tag{2.16}$$

Dans ce modèle avec différenciation verticale, la quantité vendue par tous les producteurs des biens intermédiaires est identique, par contre le prix de vente est une fonction croissante de la qualité du bien en question (A_j).

Le profit qui est égal à $\Pi_{jt} = (1-\alpha)\,p_{jt}x_t$ est ensuite redistribué aux ménages. On peut finalement calculer le profit des firmes produisant les biens intermédiaires qui incorporent la qualité de pointe $(\bar{A})$:

$$\Pi_{jt}\left(\bar{A}_t\right) = \Pi_{jt}\left((1+\kappa)\,A_t\right) = \frac{\alpha\,(1-\alpha)}{1-\tau}\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)(1+\kappa)\,Y_t(A_t,...)\ \forall j \tag{2.17}$$

Le profit est le même pour tous les innovateurs qui ont atteint en t la qualité de pointe.

Le secteur de la recherche et développement

Le programme de maximisation d'une firme j du secteur de la recherche est :

$$\begin{cases} \max\limits_{(n_{jt})} V_{jt}p_{Rjt} - (1-\sigma_t)\,w_t n_j \\ \text{s. c. } /\ p_{Rjt} = \beta n_{jt} \end{cases}$$

avec V_{jt}, le prix de vente du brevet de l'innovation.

Le seul coût de production du secteur de la recherche est la somme des salaires versés aux chercheurs, diminuée des subventions de l'État. La résolution du programme nous donne :

$$V_{jt} = \frac{(1-\sigma)}{\beta}w_t = V_t,\ \forall j \tag{2.18}$$

Avec l'équation (2.12), on peut écrire la valeur de l'innovation :

$$V_{jt} = \frac{(1-\sigma_t)}{\beta}(1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}\left[\frac{\alpha^2}{(1-\tau_t)\,r_t}\right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} A_t^{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}}\left[(\gamma+1)\,h_t\right]^{-\frac{1}{\gamma(1-\alpha)}} \tag{2.19}$$

À partir des équations (2.13) et (2.14), l'équation (2.19) devient :

$$V_{jt} = \frac{1-\sigma_t}{\beta}(1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\left[\frac{K_t}{(1-n_t)}\right]^{\alpha} A_t^{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}}\left[(\gamma+1)\,h_t\right]^{-\frac{1}{\gamma}}$$

Enfin, la condition d'absence d'arbitrage pour une fonction de production des innovations aléatoire est donnée par :

$$V_t = \int_t^{\infty} e^{-\int_t^s r_u du} e^{-\beta \int_t^s n_u du} \Pi_s(\bar{A}_t) ds \tag{2.20}$$

La valeur d'une innovation (V_t) est égale à l'ensemble des profits futurs générés par l'incorporation de l'innovation en question ($\int_t^{\infty} \Pi_s(\bar{A}_t) ds$), actualisés au taux d'intérêt du marché ($\int_t^s r_u du$), auquel s'ajoute le probabilité d'être remplacé ($\beta \int_t^s n_u du$) qui permet d'estimer la durée de vie de l'innovation. En dérivant la valeur de l'innovation (2.20) par rapport au temps et en faisant l'hypothèse d'un taux d'intérêt unique du marché, on détermine la condition de non-arbitrage :

$$\dot{V}_t = -\Pi_t(\bar{A}_t) + (r_t + \beta n_t) \int_t^{\infty} e^{-\int_t^s r_u du} e^{-\beta \int_t^s n_u du} \Pi_s(\bar{A}_t) ds \;\Leftrightarrow \dot{V}_t = -\Pi_t(\bar{A}_t) + (r_t + \beta n_t)\, V_t$$

soit :

$$r_t + \beta n_t = \frac{\Pi_t(\bar{A}_t)}{V_t} + \frac{\dot{V}_t}{V_t} \tag{2.21}$$

L'équation (2.21) est la condition de non-arbitrage dans la R&D : le taux de dividende ($\frac{\Pi}{V}$) auquel s'ajoute le gain en valeur ($\frac{\dot{V}}{V}$) égalise le taux d'intérêt unique du marché (r) augmenté du taux de destruction créatrice (βn). Le flux des profits est actualisé par le taux du placement alternatif à l'achat d'un brevet et par la probabilité de survie de la firme j, puisque cette dernière sera un jour chassée par une firme plus innovante qui produira un bien de qualité supérieure.

Le consommateur représentatif

En univers concurrentiel, le consommateur maximise son utilité intertemporelle escomptée au taux de préférence pour le présent sous la contrainte de son revenu intertem-

porel. Le programme intertemporel d'optimisation du ménage représentatif s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l|l} \max\limits_{(c_t)_{t=0}^{+\infty}} \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t}\left(\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon}-\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right)dt & \\ \text{s. c. } / & \dot{W}_t = w_t + rW_t - c_t - T_t \\ & \text{et } \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t = 0 \end{array} \right.$$

avec W_t, la richesse du ménage (ou valeur de l'actif financier détenu par l'agent à la période t) ; et T_t, l'impôt payé par les ménages.

L'hamiltonien issu du problème précédent vaut :

$$H = e^{-\rho t}U(c,S) - \chi\dot{W} = e^{-\rho t}\left(\frac{c^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right) - \chi\left(w + rW - C + T\right)$$

Les conditions du premier ordre sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial c} = 0 \\ \dot{\chi} = -\frac{\partial H}{\partial W} \end{array} \right.$$

On tire du système ci-dessus "la règle de Keynes-Ramsey" :

$$g_{c,t} = \frac{r_t - \rho}{\varepsilon} \tag{2.22}$$

Dans une économie fermée (et le résultat reste vrai pour une économie polluante[27]), $W_t = K_t$. Enfin, on s'assure que la condition de transversalité sur la richesse, *i.e.* $\lim\limits_{t\to\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t = 0$, est bien vérifiée[28].

---

[27] La démonstration est la suivante :
L'équilibre emploi-ressource macroéconomique est $\dot{K}_t + C_t = Y_t$. La contrainte budgétaire du ménage représentatif est $\dot{W}_t + c_t = w_t + rW_t - T_t$. On voit que la concordance entre ces deux contraintes est assurée si $Y_t = w_t L_t + rW_t + T_t$ et $\dot{W}_t = \dot{K}_t$. On a déjà $W_t = K_t$. Mais assurons-nous que la première relation soit comptablement cohérente :
$Y_t = w_t L_t + r_t W_t + T_t \Longleftrightarrow w_t(1-n_t) + \int\limits_0^1 p_{jt}(1-\tau_t)x_{jt}dj + h_t\int\limits_0^1 P_{jt}dj = .w_t n_t + w_t(1-n_t) + r_t K_t + h_t P_t + \tau_t r_t K_t - \sigma w_t n_t$ (soit (i)) sachant que les profits sont nuls.
Et $(i) \Longleftrightarrow \int\limits_0^1 p_{jt}x_{jt}dj = (1-\sigma)w_t n_t + r_t K_t \Longleftrightarrow \int\limits_0^1 \Pi_{jt}dj = V_{jt}p_{Rjt}$: on a bien des profits strictement positifs pour le secteur intermédiaire qui sont entièrement reversés aux innovateurs en R&D.
La cohérence comptable générale du modèle est ainsi assurée.

[28] On remarque que $\varepsilon > 1$ est une condition suffisante à la réalisation de cette condition de transversalité. En effet, sachant $W_t = K_t$, on a $\lim\limits_{t\to\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t = \lim\limits_{t\to\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} K_t = \lim\limits_{t\to\infty} e^{-\left(\varepsilon g_c^d + \rho + l\right)t} K_0 e^{\left(g_c^d + l\right)t} = \lim\limits_{t\to\infty} e^{-\left((\varepsilon-1)g_c^d + \rho\right)t} K_0$: la condition de transversalité est vérifiée pour $\varepsilon > 1$ et $g_c^d > 0$.

L'équilibre budgétaire du gouvernement

Enfin l'équilibre fiscal instantané de l'État s'écrit :

$$T_t - h_t P_t + \tau_t \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj + \sigma w_t n_t = 0$$

Nous pouvons maintenant déterminer l'équilibre de notre économie décentralisée.

2.3.3 L'équilibre décentralisé de long terme

Nous précisons maintenant que la stabilité de l'équilibre de l'économie décentralisé a été démontrée analytiquement (*cf.* annexe D). Nous déterminons dans cette section les valeurs d'équilibre des variables stables du modèle.

L'impact des politiques économiques à long terme

L'équilibre de croissance équilibrée de l'économie décentralisée est caractérisé par les vecteurs des prix et des quantités tels que chaque agent maximise sa fonction objectif, que tous les marchés soient à l'équilibre et que les variables (C, K, Y, A, P, S) croissent à taux constants.

À partir de la condition de non-arbitrage dans la R&D (équation 2.21), on détermine :

- l'intensité de la recherche constante de l'équilibre de long terme :

$$n_{ss}^d = \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right) + (1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{\varepsilon-1}{\gamma(1-\alpha)}\frac{g_h}{\delta} - \frac{\rho}{\delta}\right)}{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right) + (1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{1}{\kappa} + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}(\varepsilon-1)\right)} \ ;$$

- le taux d'intérêt d'équilibre :

$$r_{ss}^d = \varepsilon\left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\delta n^d - \frac{1}{\gamma(1-\alpha)}g_h\right] + \rho \ ;$$

- les taux de croissance des variables agrégées de notre économie :

$$\begin{cases} g_c^d = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} g_A^d - \frac{1}{\gamma(1-\alpha)} g_h \\ g_S^d = g_P^d = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} g_A^d - \frac{\gamma(1-\alpha)+1}{\gamma(1-\alpha)} g_h \\ g_z^d = \frac{\eta}{\gamma} g_A^d - \frac{1}{\gamma} g_h \text{ si } g_h > \eta g_A, \text{ sinon } z_t = 1 \ \forall t \\ g_A^d = \delta n_{ss}^d = \delta \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{\varepsilon-1}{\gamma(1-\alpha)}\frac{g_h}{\delta}-\frac{\rho}{\delta}\right)}{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{1}{\kappa}+\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}(\varepsilon-1)\right)} \end{cases}$$

Avec une taxe trop faible ($h \leqslant \frac{A^\eta}{\gamma+1}$), le secteur final choisi une intensité polluante constante et maximale ($z = 1$). L'économie de laisser-faire atteint alors une croissance du produit maximale dont le taux est juste égale au taux de croissance de la dégradation de la qualité environnementale.

Par contre, si le producteur du bien final est soumis à un niveau d'imposition dont la croissance est suffisante (*i.e.* $g_h > \eta g_A$), il aura intérêt à diminuer l'intensité polluante de sa production de façon continue (et $g_z^d = \frac{\eta}{\gamma} g_A^d - \frac{1}{\gamma} g_h$). Cet effort de dépollution vient mécaniquement baisser les niveaux de la production et de la productivité de tous les facteurs. Ce dernier phénomène entraîne une baisse du niveau des salaires ce qui diminue le coût de la recherche et incite donc le secteur de la R&D à embaucher d'avantage : g_h vient donc croître n ce qui valide l'hypothèse de Porter (Porter et Van der Linde 1995) à savoir que la réduction de la pollution tend à stimuler l'innovation. L'effet de *win-win* n'est possible que si $\varepsilon > 1$, hypothèse que nous avons faite.
Remarquons cependant que le phénomène de destruction créatrice, propre aux modèles de différenciation par la qualité du type de ceux que nous utilisons ici, entraîne une diminution de l'incitation à faire de la recherche puisque les profits qu'en retireront les firmes du secteur des biens intermédiaires n'ont plus une durée de vie illimitée.

La politique environnementale de second rang

Avec un taux de croissance strictement positif de la taxe environnementale, le découplage entre la croissance du produit et la croissance du stock de polluants est possible. Il existe une "plage optimale" de valeur du taux de croissance de la taxe $[\overline{\mathbf{g}}_h, \underline{\mathbf{g}}_h]$, pour laquelle on obtient un taux de croissance du produit positif et un taux de croissance

des émissions négatif ($g_c^d > 0$ et $g_S^d < 0$). Soit[29] :

$$\bar{\mathbf{g}}_h > \mathbf{g}_h > \underline{\mathbf{g}}_h \tag{2.23}$$

avec $\bar{\mathbf{g}}_h = \delta\left(\gamma\left(1-\alpha\right)+\eta\right)\frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)-(1-\sigma)(1-\tau)\frac{\rho}{\delta}}{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\frac{1}{\kappa}}$ et

$\underline{\mathbf{g}}_h = \frac{\delta(\gamma(1-\alpha)+\eta)\left[\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)-(1-\sigma)(1-\tau)\frac{\rho}{\delta}\right]}{(\gamma(1-\alpha)+1)\left(\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\frac{1}{\kappa}\right)+(\gamma(1-\alpha)+\eta)(1-\sigma)(1-\tau)(\varepsilon-1)}$

Nous réalisons un test de sensibilité sur la condition (2.23) avec les valeurs suivantes des paramètres :

$\boldsymbol{\delta}$	$\boldsymbol{\kappa}$	$\boldsymbol{\rho}$	$\boldsymbol{\varepsilon}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\gamma}$	$\boldsymbol{\sigma}$	$\boldsymbol{\tau}$	$\boldsymbol{\eta}$
0.07	1.75	0.02	1.25	0.25	3	0	0	1

Il s'agit d'une situation où seule la politique environnementale de second rang est mise en œuvre ($g_h > 0$ et τ=σ=0) dans le cas où η vaut 1.

	$\bar{\mathbf{g}}_h$	$\underline{\mathbf{g}}_h$
Réf.	2.53	0.62
$\triangle^+\boldsymbol{\delta}$	10	10
$\triangle^+\boldsymbol{\kappa}$	−5.78	−7.16
$\triangle^+\boldsymbol{\rho}$	−26.67	−26.67
$\triangle^+\boldsymbol{\varepsilon}$	0	−9.33
$\triangle^+\boldsymbol{\alpha}$	28.29	32.38
$\triangle^+\boldsymbol{\gamma}$	6.92	0

Tableau 2.c. Résultats des simulations numériques en pourcentages pour la politique environnementale de second rang

Réf. : simulation numérique de référence. $\triangle^+x$: augmentation de 10 % du paramètre x. Tous les % sont arrondis au deuxième chiffres après la virgule (*i.e.* ici le point en anglais).

La "plage" des taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes qui rend possible un développement durable dans une optique de second rang est particulièrement sensible aux paramètres α et ρ : une augmentation de 10 % de ces paramètres entraîne des variations de l'ordre de 30 % des taux de croissance de la taxe encadrant la politique environnementale de second rang.

Si α est plus grand, le pouvoir de monopole du secteur intermédiaire augmente et ses profits également ce qui incitera à faire plus de la R&D. Cela a deux effets : d'un côté,

[29] La condition (2.23) suivante est toujours vérifiée puisque $\bar{\mathbf{g}}_h > \underline{\mathbf{g}}_h \Leftrightarrow \frac{(\gamma(1-\alpha)+1)\left(\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\frac{1}{\kappa}\right)+(\gamma(1-\alpha)+\eta)(1-\sigma)(1-\tau)(\varepsilon-1)}{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)+(1-\sigma)(1-\tau)\frac{1}{\kappa}} > 1.$

le taux de croissance de long terme va augmenter ce qui impose un g_h plus élevé pour maintenir ce taux de croissance dans la zone de développement durable ; de l'autre, plus de recherche permet d'accélérer le découplage croissance/environnement. Dans notre simulation, c'est le premier effet qui l'emporte.
Pour ρ, le mécanisme d'influence est simple : si les ménages, qui subissent l'externalité négative de pollution, ont une préférence pour le présent qui augmente, le taux de croissance de la taxe peut diminuer puisque l'augmentation attendue du stock de pollution est jugée, aujourd'hui, moins néfaste.

Calculons maintenant les niveaux optimaux des trois instruments économiques.

2.4 La politique économique optimale pour un développement durable

Les niveaux optimaux des instruments de la politique économique permettent de restaurer l'optimalité de l'équilibre concurrentiel de l'économie.

2.4.1 Subventionner l'achat des biens intermédiaires

La subvention de l'achat des biens intermédiaires doit permettre l'égalisation du prix payé par le producteur du bien final (subvention comprise) au prix de concurrence pure et parfaite, soit : $p_{jt}(1-\tau) = rA_{jt}$ avec $p_{jt} = \frac{rA_{jt}}{\alpha}$ (équation 2.15) ; ce qui donne :

$$\tau^o = 1 - \alpha$$

Avec cette subvention, le producteur du bien final paye le bien intermédiaire j au prix $p_j\alpha$ égale au coût marginal. α est le taux de *mark-up* appliqué par la firme intermédiaire qui est égale à l'élasticité de substitution entre les biens intermédiaires. Ici la substituabilité entre les biens intermédiaires est parfaite (fonction Cobb-Douglas) ce qui réduit le taux de *mark-up* et le pouvoir de marché des firmes intermédiaires.

2.4.2 Subventionner ou taxer la recherche et développement

Ensuite, la subvention du travail alloué à la recherche doit permettre au secteur d'employer le nombre optimal de chercheurs, soit $n^o = n^d$. Ainsi :

$$1 - \sigma^o = \frac{\frac{1+\kappa}{\kappa}\left(1 - n^o\right)}{\left[\frac{1}{\kappa} + \frac{[\gamma(1-\alpha)+\eta](\varepsilon-1)}{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}\right] n^o + \frac{\rho}{\delta}}$$

Il existe une possibilité théorique pour que la subvention à la R&D (σ^o) soit négative. L'instrument économique s'avèrerait alors être une taxe incitative. Ce cas correspond à un effort trop important de recherche, comparé à l'optimum, qui apparaît lorsque les rentes que peut s'accaparer l'innovateur potentiel sont surestimées.

2.4.3 Taxer les émissions polluantes

Enfin, une fois σ^o déterminé, la croissance optimale de la taxe sur les émissions doit être telle que les taux de croissance des émissions polluantes des économies centralisée et décentralisée s'égalisent. La croissance optimale de la taxe sur les émissions polluantes (h) est donnée par :

$$g_h^o = \frac{\varepsilon + \varpi}{1 + \varpi} g_c^o \tag{2.24}$$

soit :

$$g_h^o = \frac{\left[\gamma\left(1-\alpha\right)+\eta\right]\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}{\gamma\left(1-\alpha\right)\varepsilon + \eta\left(\varepsilon-1\right) + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}\left(\delta - \rho\right) > 0$$

On montre facilement que le taux optimal de croissance de la taxe du modèle de Grimaud et Ricci (2004) est inférieur à g_h^o (équation 2.24) puisque notre économie connaît une croissance régulière supérieure du fait de η.

Nous déterminons la même règle de politique économique que Grimaud et Ricci (2004) qui permet de calculer le niveau de la taxe incitative :

$$\frac{h_t^o P_t^o}{Y_t^o} = \frac{1}{1+\gamma} \tag{2.25}$$

avec $\frac{1}{1+\gamma}$ l'élasticité du bien final par rapport à l'*input* environnemental (émissions polluantes). Maintenant pour dynamique transitionnelle :

$$g_{h_t} = \eta\delta n_t - \gamma g_{z_t} \tag{2.26}$$

Il apparaît donc que la part des revenus de la taxe dans la production totale (équation 2.25) reste constante. De plus, le taux de croissance de la taxe (g_h^o) est la mesure de l'écart instantané entre le taux de croissance économique (g_Y^o) et le taux de croissance des émissions polluantes (g_P^o).
On remarque également que si $\eta = \eta^* = \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$ (ce qui revient à saturer la condition de durabilité 2.10) alors d'après les équations (2.24) et (2.26), $g_h^o = \eta g_c^o = \eta g_A^o$ et $g_z^o = 0$. Dans ce dernier cas, la technologie propre suffit à réduire les émissions le long du régime de croissance que nous avions qualifié de "techno-écologique".

2.4.4 L'existence d'une courbe environnementale de Kuznets

Quelques données sur la courbe de Kuznets

Au début des années 1990, plusieurs études empiriques ont constaté l'existence d'une courbe en cloche entre divers indices de pollution et le niveau des revenus par tête[30]. Ces auteurs lui attribuèrent le nom de "courbe environnementale de Kuznets" à cause de la similitude avec les résultats des travaux de Kuznets (1955) sur les liens entre la croissance du revenu et les inégalités sociales. Plus précisément, pour Grossman et Krueger (1993) (1995), le point de retournement pour la pollution par le SO_2 intervient pour un revenu moyen par habitant de l'ordre de 4000 à 5000 dollars US. Il est souvent plus élevé pour les autres polluants, mais en général se trouve aux alentours de 8000 dollars US par habitant.[31] Donc au-delà d'un certain niveau de richesse, la croissance économique s'accompagnerait d'une amélioration de l'état de l'environnement[32].

---

[30] Concernant la courbe de Kuznets pour l'environnement : *cf.* Lieb (2001) pour une revue de la littérature sur les estimations empiriques existantes.

[31] Pour un pays ayant un revenu moyen de 10 000 $ (base 1985). Les données utilisées sont celles du *Global Environemental Monitoring System* qui concernent à la fois des pays développés et des pays en développement.

[32] Grossman et Krueger (1993) (1995) ont cherché à établir une corrélation générale entre la croissance économique et les évolutions environnementales contemporaines, en rapprochant le revenu par habitant et les mesures concernant un certain nombre d'émissions polluantes. Les résultats de l'étude économétrique laissent à penser que les émissions polluantes augmentent en fonction des revenus jusqu'à une certaine limite, puis décroissent. L'explication fournie par les auteurs est que, initialement, il y a peu d'émissions polluantes du fait du faible niveau de production. Puis les débuts mal maîtrisés de l'industrialisation provoquent un surcroît de pollution. Enfin, les moyens financiers dégagés par l'augmentation de la richesse, le poids croissant des

Il est important de préciser ici qu'il existe de nombreuses incertitudes sur l'évaluation de l'existence de cette courbe. Des résultats probants existent cependant pour certaines ressources (forêts) ou polluants (pollution de l'eau et certains gaz atmosphériques). Mais il est clair que ces résultats concernent un petit nombre de polluants et les régions les plus riches.

Malgré les incertitudes statistiques, des outils novateurs ont récemment été utilisés pour tenter de mesurer le phénomène plus large de dématérialisation[33]. On peut déjà en tirer la conclusion qu'il existe un découplage de l'agrégat énergie par rapport à la croissance du PIB pour les pays du Nord (Europe, États-Unis d'Amérique et Japon) qui, cependant, cache une forte disparité entre les évolutions des différents polluants.

Les simulations numériques de la dynamique transitionnelle

Maintenant, à l'aide de notre modèle simulé, nous déterminons la trajectoire transitionnelle d'une économie de laisser-faire qui décide au moment où elle atteint une intensité polluante maximale ($z_T = 1$) de mettre en œuvre la politique décrite à la section précédente permettant de se situer sur le sentier optimal de croissance. Avant la date T (que l'on prend ici comme exogène) qui voit la mise en œuvre du sentier de croissance durable, on a donc l'ensemble des instruments à un niveau nul ($\sigma = \tau = g_h = 0$). Après la date T, nous simulons la dynamique de l'économie optimale dont les conditions initiales sur les variables de stock sont les valeurs des stocks de l'économie de laisser-faire. Nous allons voir que cette trajectoire peut être considérée comme étant proche de la courbe environnementale de Kuznets.

Le tableau suivant rappelle les valeurs des différents paramètres du modèle que l'on retient pour la simulation numérique :

---

services et les changements des préférences des individus (plus portés vers la qualité de la vie à mesure que leur revenu individuel augmente) permettent de réduire les émissions.

[33] Bringezu (2003) et Holmberg (2003) présentent les principaux résultats obtenus au niveau statistique et mènent une analyse sur les conséquences en terme d'amélioration de l'efficacité de la ressource d'un facteur 10 et d'existence d'une courbe de Kuznets pour l'environnement. Il ressort de ces études que les décideurs publics doivent d'abord se concentrer sur l'étude d'indicateurs clés spécifiques (émissions de métaux, CO_2, substances acides...) et non pas sur des indicateurs globaux de dématérialisation.

$\boldsymbol{\delta}$	$\boldsymbol{\beta}$	$\boldsymbol{\rho}$	$\boldsymbol{\varepsilon}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\varpi}$	$\boldsymbol{\gamma}$	$\boldsymbol{\Theta}$	$\boldsymbol{\eta}$
0.07	0.04	0.01	1.25	0.25	0.5	2	0.012	1

On note que le taux d'assimilation naturel retenu ici correspond à une durée de *turnover* des émissions polluantes de 83 années, soit une valeur plus faible de celle utilisée par l'IPCC dans ses simulations (100 ans pour le CO_2). Pour ces paramètres, on a les valeurs suivantes des taux de croissance à long terme de l'économie de laisser-faire :

$\mathbf{n}_{ss}$	$\mathbf{r}_{ss}$	$\mathbf{g}_A$	$\mathbf{g}_c$	$\mathbf{g}_S$
18.10%	1.74%	1.27%	2.1%	2.1%

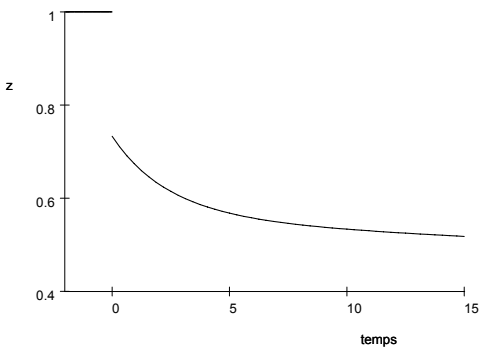
Atteindre l'équilibre de long terme impose les valeurs d'équilibre suivantes pour les instruments de la politique économique :

$\boldsymbol{\tau}^o$	$\boldsymbol{\sigma}^o$	$\mathbf{g}_h^o$
0.75	0.3163	5.32%

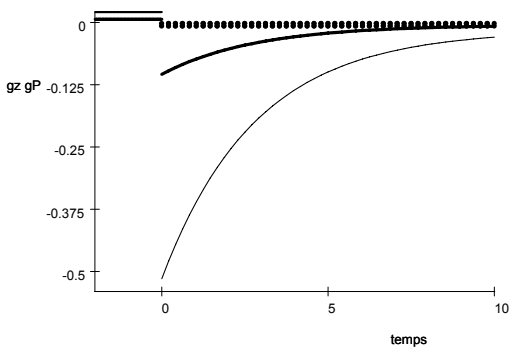
Dans ce cas les taux de croissance optimaux valent :

$\mathbf{n}_{ss}^o$	$\mathbf{g}_A^o$	$\mathbf{g}_c^o$	$\mathbf{g}_\mathbf{S}^o$	$\mathbf{g}_z^o$
69.4%	2.43%	4.56%	−0.76%	−0.23%

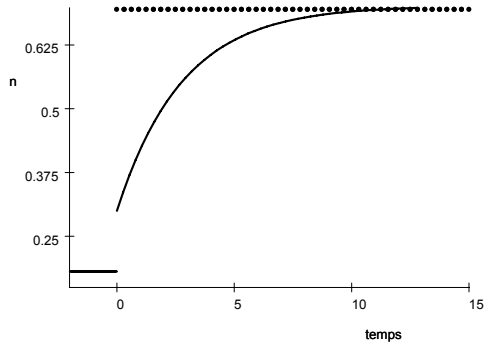
La dynamique transitionnelle simulée est décrite par l'ensemble des graphiques ci-dessous. Nous insistons sur le fait qu'après la date T, entre en vigueur la dynamique optimale issue de la résolution du programme (2.5) du planificateur.



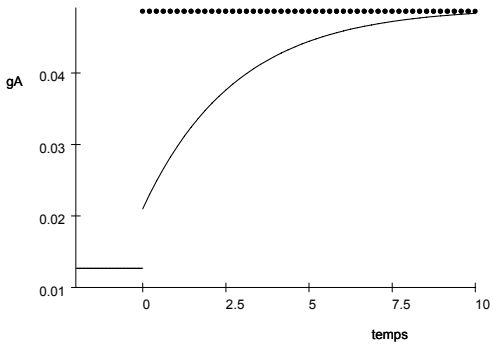
(a) z



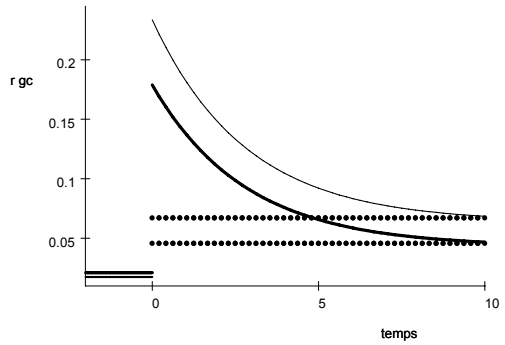
(b) g_z (en gras) ; g_P



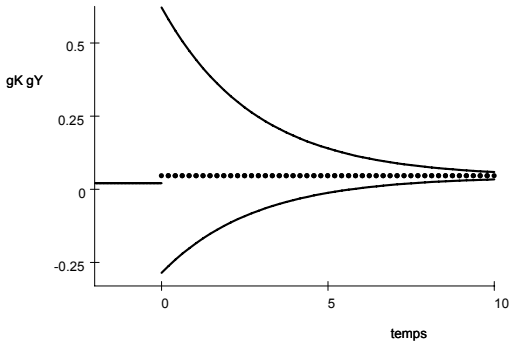
(c) n



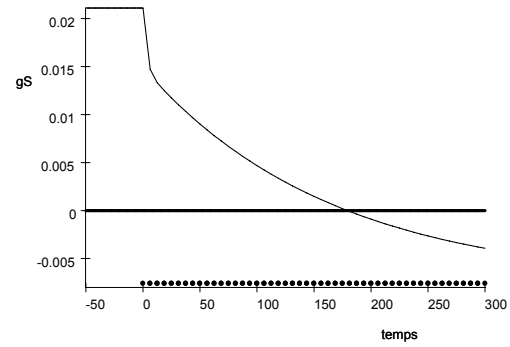
(c') g_A



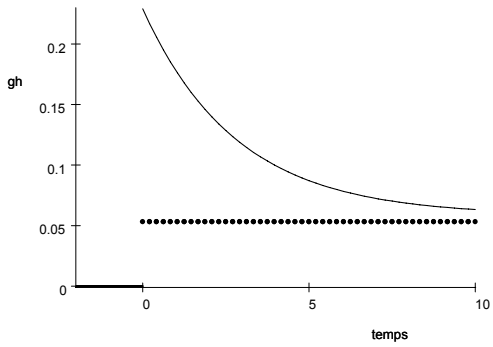
(d) r ; g_c (en gras)



(e) g_K (en haut) ; g_Y (en bas)



(f) g_S



(g) g_h

Graphique 2.d. Courbe de Kuznets pour l'environnement

(a) Intensité polluante, (b) Taux de croissance de l'intensité polluante et du stock de pollution, (c) et (c') Intensité de la recherche et taux de croissance des innovations, (d) Taux d'intérêt et taux de croissance de la consommation, (e) Taux de croissance du capital et du revenu, (f) Taux de croissance du stock de pollution, (g) Évolution optimale de g_h

Avec les conditions initiales suivantes sur les variables prédéterminées : N_0=0.033 12 et $b_0 = 1.$ $648\,0 \times 10^{-2}$. En pointillés : valeurs stationnaires des variables

La principale contrainte sur les variables de stock qui relie la dynamique des deux équilibres (laisser-faire et optimum) concerne la variable $N \equiv P/S$. À la date T, on doit avoir $N_T = g_S + \Theta$ (avec g_S, le taux de croissance d'équilibre du stock de pollution dans l'économie de laisser-faire).[34]

La dynamique transitionnelle simulée dans cette section permet d'atteindre une décroissance du stock de pollution longtemps après que les variables économiques se soient ajustées (graphique 2.d.(f) le stock de pollution décroît après 180 années). L'inertie de l'écosystème est forte alors qu'une diminution instantanée du flux des émissions est obtenue grâce à un effort de dépollution immédiat et très important (voir graphique 2.d.(b)). L'inertie naturelle de l'écosystème qui est retracée par un taux de régénération faible est à l'origine de la lenteur de l'ajustement observé : l'obtention de la décroissance du stock de pollution est d'autant plus tardive que le taux d'assimilation naturel est faible.

La mise en œuvre de cette diminution du stock de pollution repose sur une taxe sur les émissions dont le taux de croissance initial est très important (nous sommes encore à +10 % de croissance de la taxe avant la période 5, *cf.* graphique 2.d.(g)). L'effort initial, très élevé, est à l'origine de la réduction temporaire de la production finale (*cf.* graphique 2.d.(e)).[35]

À long terme, les gains en croissance sont significatifs, grâce au secteur de la recherche et développement, dont l'activité finit par porter ses fruits. Le secteur de R&D devient alors le principal secteur employant le facteur travail.

Les résultats commentés ici tiennent également pour $\eta = 0$. Mais, pour cette valeur, le coût initial en terme de réduction du produit est plus important encore.

---

[34] À titre d'exemple, pour la simulation présentée ici, $N_0 = 0.03312$.

[35] Pour cette simulation, toute valeur initiale de la production qui est telle que $Y_0 \gtrapprox 1.7$ permet de garantir une production non négative pour tout t, malgré une décroissance du produit ($\frac{\dot{Y}}{Y} < 0$) jusqu'en $t \approx 5.7$.

Conclusion

Une économie polluante dotée de la technologie propre peut donc atteindre un sentier de croissance endogène durable supérieur, c'est-à-dire : une croissance plus forte et une qualité environnementale meilleure. L'évaluation des effets bénéfiques du développement de ces technologies a été formellement menée grâce à l'introduction du paramètre η mesurant l'efficacité des technologies pour réduire les émissions polluantes. Les simulations numériques pour la dynamique transitionnelle[36] nous ont permis d'évaluer à quel point (notamment dans le cadre de la lutte contre le dérèglement climatique qui passe par la réduction du stock des émissions de CO_2), le recours aux technologies propres s'avère nécessaire. En effet, la capacité de régénération de l'écosystème vis-à-vis du CO_2 est très faible ce qui rend difficile l'obtention du développement durable à un horizon acceptable. Dans cette perspective, seule une hausse du paramètre d'efficacité de la technologie pour diminuer le niveau des émissions permet de réduire cet horizon.

Dans ce chapitre, la démonstration de l'existence d'une courbe environnementale de Kuznets a donc été menée. Cette courbe s'appuie ici sur la croissance des idées plutôt que sur l'économie matérielle. Or, la sphère matérielle est traditionnellement dominante dans l'analyse de la courbe de Kuznets.

Dans les faits, la richesse s'explique de moins en moins par la propriété d'éléments matériels (terre, ressources naturelles, machines) et se fonde désormais davantage sur la maîtrise de facteurs immatériels (connaissance scientifique, haute technologie, information, communication, publicité, finances). La notion de dématérialisation se trouve donc éclairée par les nouvelles théories de la croissance. Ces dernières, lorsqu'elles se fondent sur une différenciation verticale du processus de production, mettent en évidence une possibilité de croissance à quantité d'input injectée constante. Toute la difficulté réside alors dans le fait de séparer, dans la croissance d'une quantité exprimée en valeur, la part de cette croissance qui provient des purs volumes de celle qui provient d'une évolution de la qualité. Quoi qu'il en soit, cette croissance par la

[36] Nous les avons également réalisées pour démontrer la stabilité de l'économie centralisée, à cause de la grande taille de la matrice dynamique

qualité s'interprète donc comme un phénomène de dématérialisation qui représente un nouveau concept de protection de l'environnement et de réduction de la pollution à la source (puisqu'elle vise à réduire l'input en flux de matières dans l'économie ; chaque matière utilisée dans l'économie devenant tôt ou tard un impact pour l'environnement). Les entreprises industrielles sont à l'origine d'un volume essentiel de flux de matières : la transformation du processus productif vers une moindre consommation de matières est donc favorable au développement durable. Si l'on souhaite, plus étroitement, associer croissance économique et réduction de la pression exercée sur les ressources naturelles, nous avons montré qu'il est important d'améliorer l'efficacité avec laquelle les ressources sont utilisées (effet technique) ; et d'étudier les voies permettant de dissocier l'utilisation des ressources de la croissance économique (effet de composition). Enfin, il est important de souligner le fait que l'existence de la courbe environnementale de Kuznets, dans le sens où nous l'entendons, est conditionnée, dans notre modèle, par la mise en œuvre conjointe des politiques environnementales et de l'innovation ambitieuses. Comme l'écrit Smulders (2005) :

> " *When we connect our insights about technological change and environmental resource scarcity to the empirical findings, two clear conclusions emerge. First, despite the discovery of an EKC* [Environmental Kuznets Curve] *for several pollutants, pollution will not decline automatically as an economy grows richer; we may find an EKC pattern only because richer economies implement more stringent environmental policies. Second, reduced pollution is more likely the result of a deliberate change in technology, rather than a byproduct of technological change or growth*".

Ce chapitre nous a donc permis de démontrer que la stratégie pour un développement durable consiste à améliorer la productivité globale de l'économie à travers la dématérialisation des activités et la limitation des prélèvements sur l'environnement. Cependant, au regard du chapitre précédent, force est de constater que le modèle que nous venons de développer souffre d'un effet d'échelle, lequel consiste à faire dépendre le taux de croissance économique de la taille de la population ce qui est contraire à certains faits stylisés ; de sorte que les économistes spécialistes de la croissance discutent du fondement empirique de cet effet d'échelle.

C'est pourquoi nous allons, dans la seconde partie de la thèse, exposer une analyse

théorique de la croissance fondée sur l'innovation qui permettra d'éviter cette lacune principale des modèles de croissance durable. Les enjeux pour le développement durable sont centraux : les conditions nécessaires pour l'obtention d'une croissance durable au sens fort, ainsi que les politiques économiques permettant la décentralisation du sentier de croissance durable, seront-elles modifiées ? Si oui, dans quelle mesure ?

Annexe A. L'optimum

Détermination de l'équilibre de long terme

Le problème (2.5) est dit "autonome" dans la mesure où la fonction d'utilité est la même à chaque période (puisqu'elle ne dépend pas du temps). Ainsi le système d'équations formé par les conditions nécessaires d'optimalité est le suivant :

$$\begin{cases} c_t^{-\varepsilon} = \vartheta_t \\ z_t = \left(\frac{\vartheta_t A_t^{\eta}}{(\gamma+1)\zeta_t}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ \mu_t \delta A_t = \vartheta_t \left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)(1-\alpha)\frac{Y_t}{1-n_t} \\ \frac{\dot{\vartheta}_t}{\vartheta_t} = \rho - \left[\alpha\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{Y_t}{K_t}\right] \\ \frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = \rho - \delta \\ \frac{\dot{\zeta}_t}{\zeta_t} = \rho + \Theta - \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t} \end{cases}$$

On rappelle que le stock de pollution évolue de manière régulière à long terme si $g_S = g_P$. L'évolution du prix implicite de la ressource naturelle est également régulière à long terme si $\varpi g_S = g_\zeta$. Ainsi, les taux de croissance de long terme sont donnés par :

$$\begin{cases} g_c^o = g_y^o = g_k^o = \frac{1}{1-\alpha} g z^o + \delta n^o \\ g_S^o = g_P^o = \frac{\gamma(1-\alpha)}{1-\alpha} g z^o + (1-\eta)\,\delta n^o \\ g_A^o = \delta n^o = (1-\varepsilon)\, g_c^o + (\delta - \rho) \\ \gamma g_z^o + \varpi g_S^o - \eta \delta n^o = -\varepsilon g_c^o \end{cases}$$

On peut exprimer tous les taux de croissance et l'intensité de la recherche (n) en fonction des paramètres du modèle :

$$\begin{cases} g_c^o = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)\varepsilon+\eta(\varepsilon-1)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}(\delta-\rho) \\ g_S^o = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi}\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)\varepsilon+\eta(\varepsilon-1)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}(\delta-\rho) \\ n^o = \frac{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}{\gamma(1-\alpha)\varepsilon+\eta(\varepsilon-1)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}\frac{\delta-\rho}{\delta} \\ g_z^o = \frac{(1-\alpha)\left(\eta-\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}\right)}{\gamma(1-\alpha)\varepsilon+\eta(\varepsilon-1)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}}(\delta-\rho) \end{cases}$$

Existence de la trajectoire optimale de croissance durable

Nous devons vérifier les 3 ensembles de conditions suivants pour démontrer l'existence de la trajectoire de croissance :

- Le taux de croissance d'équilibre doit être positif et toutes les contraintes de signes ou d'encadrement des variables doivent être respectées.

C'est le cas pour les conditions de soutenabilité forte (2.8), (2.9), (2.10) et (2.11).

- L'utilité intertemporelle des consommateurs doit être bornée, soit $\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t, S_t)=0$.

Démonstration :

$$\begin{aligned}
\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t, S_t) &= 0 \Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\left[\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right] = 0 \\
&\Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi} = 0 \\
&\Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g_c^o \cdot t}c_0\right)^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g_S^o \cdot t}S_0\right)^{1+\varpi}}{1+\varpi} = 0
\end{aligned}$$

Ce qui équivaut à faire l'hypothèse que

$$(1-\varepsilon)\, g_c^o = (1+\varpi)\, g_S^o$$

Sachant (2.7), la condition est donc toujours vérifiée.

- Les conditions de transversalité associées au programme (2.5) du planificateur central doivent être vérifiées en plus des conditions nécessaires d'optimalité, puisqu'elles garantissent la convergence du critère de choix social à long terme le long d'une trajectoire optimale, soit
$\begin{cases} \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\vartheta_t K_t = 0 \\ \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\mu_t A_t = 0 \\ \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\zeta_t S_t = 0 \end{cases}$.

Démonstration :

$$\left\{\begin{array}{l}\lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\vartheta_t K_t = 0\\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\mu_t A_t = 0\\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\zeta_t S_t = 0\end{array}\right. \iff \left\{\begin{array}{l}\lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\vartheta_t \left(e^{g_K^o.t}K_0\right) = 0\\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\mu_t \left(e^{g_A^o.t}A_0\right) = 0\\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\zeta_t \left(e^{g_S^o.t}S_0\right) = 0\end{array}\right.$$

$$\text{"} \iff \left\{\begin{array}{l}-\rho + g_{\vartheta ss} + g_K^o < 0\\ -\rho + g_{\mu t} + g_A^o < 0\\ -\rho + g_{\zeta ss} + g_S^o < 0\end{array}\right.$$

$$\text{"} \iff \left\{\begin{array}{c}\text{or } g_{\vartheta ss} + g_K^o = (1-\varepsilon)\, g_c^o < 0 \quad (i)\\ n^o < 1\\ b_{ss} > N_{ss} \quad (ii)\end{array}\right.$$

À l'aide des variables stables à l'équilibre qui sont calculées dans la section suivante de l'annexe A, on peut dire que : (i) toujours vérifié avec $\varepsilon > 1$; de plus, on a $\left\{\begin{array}{l} b_{ss} = N_{ss} + \overset{\wedge}{\rho}\\ \text{avec } \overset{\wedge}{\rho} = \rho - (1-\varepsilon)\, g_c^o > 0\end{array}\right.$ et donc (ii) est vraie.

Dynamique transitionnelle de l'économie centralisée

Une solution optimale de croissance équilibrée à taux constant est un vecteur constant :

$$(M_{ss}^o,\ a_{ss}^o,\ N_{ss}^o,\ n_{ss}^o,\ b_{ss}^o) \text{ avec } \left\{\begin{array}{l} M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}\\ a_t \equiv \frac{C_t}{K_t}\\ N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}\\ n_t\\ b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t}\end{array}\right.$$

Les variables à l'état stable $(M_{ss}^o, a_{ss}^o, N_{ss}^o, n_{ss}^o, b_{ss}^o)$ valent :

$$\left\{\begin{array}{l} M_{ss} = \frac{\gamma+1}{\gamma\alpha}\left(\rho + \varepsilon g_c^o\right)\\ N_{ss} = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi} g_c^o + \Theta\\ b_{ss} = \Theta + \rho - \varpi\frac{1-\varepsilon}{1+\varpi} g_c^o\\ a_{ss} = \left(\frac{(\gamma+1)\varepsilon-\gamma\alpha}{\gamma\alpha}\right) g_c^o + \frac{\gamma+1}{\gamma\alpha}\rho\\ \delta\left(\gamma\alpha - \eta\right) n_{ss} = -\left[\varpi\frac{1-\varepsilon}{1+\varpi} + \frac{(\gamma+1)\varepsilon-\gamma\alpha}{\alpha}\right] g_c^o + \delta\gamma - \left(\frac{\gamma+1-\alpha}{\alpha}\right)\rho\end{array}\right.$$

La contrainte N_{ss} positif impose la condition (2.11) ; a_{ss} positif impose $\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) > \frac{\alpha}{\varepsilon}$ qui est toujours vérifié pour $\varepsilon > 1$.

Notre système dynamique s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{M} = \left[\left(\alpha\frac{\gamma}{\gamma+1} - 1\right) M + \frac{\delta\eta}{\gamma\alpha}n + \frac{1}{\gamma\alpha}b + \delta\frac{1-\alpha}{\alpha} - \frac{\Theta}{\gamma\alpha}\right] M \\ \dot{b} = \left[\omega N + b - (\omega+1)\Theta - \rho\right] b \\ \dot{a} = \left[\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\frac{\gamma}{\gamma+1} - 1\right) M + a - \frac{\rho}{\varepsilon}\right] a \\ \dot{N} = \left[-a - N + \frac{\delta\eta}{\gamma\alpha}n + \frac{\gamma\alpha+1}{\gamma\alpha}b + \delta\frac{1-\alpha}{\alpha} - \frac{\Theta}{\gamma\alpha}\right] N \\ \dot{n} = \left[a + \delta\left(1 - \frac{\eta}{\gamma\alpha}\right) n - \frac{1}{\gamma\alpha}b - \frac{\delta}{\alpha} + \frac{\Theta}{\gamma\alpha}\right](1-n) \end{cases}$$

L'approximation linéaire dans le voisinage du sentier équilibré[37] permet de réécrire le système dynamique comme suit :

$$\begin{pmatrix} \dot{M} \\ \dot{b} \\ \dot{a} \\ \dot{N} \\ \dot{n} \end{pmatrix} = J^o_{ss}.\begin{pmatrix} \hat{M} \\ \hat{b} \\ \hat{a} \\ \hat{N} \\ \hat{n} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \begin{cases} \hat{M} = M - M_{ss} \\ \hat{b} = b - b_{ss} \\ \hat{a} = a - a_{ss} \\ \hat{N} = N - N_{ss} \\ \hat{n} = n - n_{ss} \end{cases}$$

avec J^o_{ss} la matrice jacobienne du système dynamique de l'économie centralisée, évaluée à l'état stable. On détermine analytiquement la matrice J^o_{ss} carrée de dimension cinq composée de constantes :

$$J^o_{ss} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\alpha\gamma}{\gamma+1} - 1\right) M_{ss} & \frac{M_{ss}}{\gamma\alpha} & 0 & 0 & \frac{\delta\eta}{\gamma\alpha}M_{ss} \\ 0 & b_{ss} & 0 & \omega b_{ss} & 0 \\ \left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\frac{\gamma}{\gamma+1} - 1\right) a_{ss} & 0 & a_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\gamma\alpha+1}{\gamma\alpha}N_{ss} & -N_{ss} & -N_{ss} & \frac{\delta\eta}{\gamma\alpha}N_{ss} \\ 0 & -\frac{1-n_{ss}}{\gamma\alpha} & 1 - n_{ss} & 0 & \delta\left(1 - \frac{\eta}{\gamma\alpha}\right)(1 - n_{ss}) \end{pmatrix} \tag{2.27}$$

---

[37] Sachant que l'approximation au voisinage de son état régulier du système dynamique composé de fonctions non linéaires de type :

$$\begin{cases} \dot{y_1}(t) = f_1(y_1(t), ..., y_n(t)) \\ \dot{y_2}(t) = f_1(y_1(t), ..., y_n(t)) \\ \quad ... \\ \dot{y_n}(t) = f_1(y_1(t), ..., y_n(t)) \end{cases}$$, grâce au développement limité de Taylor, nous donne :

$$\begin{cases} \dot{y_1}(t) = f_1(y_{1,ss}, ..., y_{n,ss}) + \left.\frac{\partial f_1(y_1,...,y_n)}{\partial y_1}\right|_{ss}(y_1 - y_{1,ss}) + ... + \left.\frac{\partial f_1(y_1,...,y_n)}{\partial y_n}\right|_{ss}(y_n - y_{n,ss}) \\ \quad ... \\ \dot{y_n}(t) = f_n(y_{1,ss}, ..., y_{n,ss}) + \left.\frac{\partial f_n(y_1,...,y_n)}{\partial y_1}\right|_{ss}(y_1 - y_{1,ss}) + ... + \left.\frac{\partial f_n(y_1,...,y_n)}{\partial y_n}\right|_{ss}(y_n - y_{n,ss}) \end{cases}$$

Comme $f_n(y_{1,ss}, ..., y_{n,ss}) = 0$ pour tout n soit :

$$\begin{cases} \dot{y_1}(t) = \left.\frac{\partial f_1(y_1,...,y_n)}{\partial y_1}\right|_{ss}(y_1 - y_{1,ss}) + ... + \left.\frac{\partial f_1(y_1,...,y_n)}{\partial y_n}\right|_{ss}(y_n - y_{n,ss}) \\ \quad ... \\ \dot{y_n}(t) = \left.\frac{\partial f_n(y_1,...,y_n)}{\partial y_1}\right|_{ss}(y_1 - y_{1,ss}) + ... + \left.\frac{\partial f_n(y_1,...,y_n)}{\partial y_n}\right|_{ss}(y_n - y_{n,ss}) \end{cases}$$

Son déterminant vaut :

$$\det\left(J_{ss}^{o}\right)=\underbrace{Z}_{>0}.\left[\begin{array}{c}\delta\left(\gamma\alpha-\eta\right)\left(1-\frac{\alpha\gamma}{\gamma+1}-\omega\right)+\left(1-\frac{\alpha\gamma}{\varepsilon(\gamma+1)}\right)+\frac{\varpi(1-\delta)}{\gamma\alpha}\left(1-\delta\eta\right)\\ -\frac{\omega\alpha\gamma}{\varepsilon(\gamma+1)}\left[1-\delta\gamma\alpha\varepsilon+\frac{1}{\gamma\alpha}\left(1-\delta\eta\right)+\delta\eta\left(\varepsilon-\delta\right)+\delta\left(1-\varepsilon\right)\right]\end{array}\right]$$

avec la constante positive $Z=\frac{b_{ss}(1-n_{ss})M_{ss}a_{ss}N_{ss}}{\gamma\alpha}$.

La trace de la matrice jacobienne qui est la somme des coefficients diagonaux :

$$tr\left(J_{ss}^{o}\right)=\left(\frac{\alpha\gamma}{\gamma+1}-1\right)M_{ss}+b_{ss}+a_{ss}-N_{ss}+\delta\left(1-\frac{\eta}{\gamma\alpha}\right)\left(1-n_{ss}\right)$$

Nous ne sommes pas en mesure de déterminer analytiquement le signe du déterminant, c'est pourquoi nous nous aidons de la simulation numérique présentée dans la section 2.2. Ainsi, le déterminant de la matrice jacobienne du système dynamique évaluée à l'état stationnaire vaut $1.473\,7\times10^{-5}$, pour les valeurs suivantes des paramètres :

$\boldsymbol{\delta}$	$\boldsymbol{\beta}$	$\boldsymbol{\rho}$	$\boldsymbol{\varepsilon}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\varpi}$	$\boldsymbol{\gamma}$	$\boldsymbol{\Theta}$	$\boldsymbol{\eta}$
0.07	0.04	0.04	1.25	0.25	0.5	2	0.005	1

Les deux valeurs propres négatives associées au déterminant positif concernent donc nos deux variables prédéterminées : N et b.

Annexe B. L'économie décentralisée

L'intensité de la recherche et le taux d'intérêt de long terme

Nous déterminons l'intensité de la recherche dans l'économie à partir de l'équation de libre arbitrage (2.21).

L'équation (2.12) et l'équation (2.18) nous donne l'expression de V_t :

$$V_t = \left(\frac{1-\sigma}{\beta}\right)(1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{Y_t}{1-n} \tag{2.28}$$

Ainsi $\frac{\dot{V}}{V}\Big|_{ss} = g_c^d$. Les équations (2.17) et (2.28) nous permettent de calculer $\frac{\Pi}{V}$:

$$\frac{\Pi}{V} = \delta\left(\frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)}{(1-\sigma)(1-\tau)}\right)(1-n)$$

La condition de non-arbitrage s'écrit $(1-\varepsilon)\left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\delta n - \frac{1}{\gamma(1-\alpha)}g_h\right] + \frac{\delta\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)}{(1-\tau)(1-\sigma)}(1-n)$ $= \frac{\delta}{\kappa}n + \rho$ soit finalement :

$$n_{ss}^d = \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right) + (1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{\varepsilon-1}{\gamma(1-\alpha)}\frac{g_h}{\delta} - \frac{\rho}{\delta}\right)}{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right) + (1-\sigma)(1-\tau)\left(\frac{1}{\kappa} + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}(\varepsilon-1)\right)}$$

Les conditions de signes sur n_{ss}^d sont :

- $n_{ss}^d > 0$ si, et seulement si, $g_h > \frac{\gamma(1-\alpha)}{\varepsilon-1}\rho$ *(i)* ;
- $n_{ss}^d < 1$ si, et seulement si, $g_h < \delta\frac{\gamma(1-\alpha)}{\varepsilon-1}\left[\frac{\rho}{\delta} + \frac{1}{\kappa} + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}(\varepsilon-1)\right]$ *(ii)*.

Et $(ii) > (i)$ toujours vérifié.

Démonstration analytique de la stabilité en point-selle de l'équilibre décentralisé

Soient $M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t}$, $a_t \equiv \frac{c_t}{K_t}$, $N_t \equiv \frac{P_t}{S_t}$, n_t, r_t, les variables stationnaires de l'économie décentralisée.

On a déjà déterminé les valeurs de long terme $\left(n_{ss}^d, r_{ss}^d\right)$ des variables n_t et r_t. Il

reste à calculer les variables composites à l'état stationnaire (M_{ss}, a_{ss}, N_{ss}) sachant que $r_t = \frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}M_t$ (*cf.* équation 2.15):

$$\left\{\begin{array}{c} a_{ss} = M_{ss} - g_c^d \\ a_{ss} = M_{ss}\left(1 - \frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}\right) + \frac{\rho}{\varepsilon} \\ N_{ss} = g_c^d - g_h + \Theta \end{array}\right. \Longleftrightarrow \left\{\begin{array}{c} a_{ss} = \frac{\left(\varepsilon - \frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)g_c^d + \rho}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}} \\ M_{ss} = \frac{\varepsilon g_c^d + \rho}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}} \\ N_{ss} = g_c^d - g_h + \Theta \end{array}\right.$$

Le système dynamique du sentier transitionnel de l'économie décentralisée est le suivant :

$$\begin{aligned}
g_M &= \frac{(1-\alpha)\,\delta n}{\alpha}\left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} - \frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} - \frac{1}{\kappa}\right] - \frac{g_h}{\alpha\gamma} \\
&\quad - \frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{\alpha(1-\alpha)M}{1-\tau} + \frac{\delta(1-\alpha)\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \\
g_a &= \left(\frac{\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha^2}{(1-\tau)\varepsilon} - 1\right)M + a - \frac{\rho}{\varepsilon} \\
g_n &= \left[\begin{array}{c} \frac{g_h}{\alpha\gamma} + \frac{a}{\alpha} + \left(\frac{\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha}{1-\tau} - 1\right)M - \frac{\delta\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma_t)(1-\tau)} \\ - \left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma\alpha} - \frac{\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} - \frac{1}{\alpha\kappa}\right]\delta n \end{array}\right]\left(\frac{1-n}{n}\right) \\
g_N &= \left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} - \frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} - \frac{1}{\kappa}\right]\frac{(1-\alpha)\,\delta n}{\alpha} - N \\
&\quad - \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} + \alpha\right)a - \left(\frac{\frac{\gamma}{\gamma+1}(1-\alpha)\alpha}{1-\tau} - 1\right)M - \frac{(\alpha\gamma+1)\,g_h}{\alpha\gamma} + \Theta + \frac{\delta(1-\alpha)\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}
\end{aligned}$$

On remarque que l'évolution de la variable N est en dehors du cœur du modèle. La matrice jacobienne carrée du système dynamique précédent est donc formée à partir des équations dynamiques pour M, a et n :

$$J_{cc}^d = \left(\begin{array}{ccc} \frac{-(1-\alpha)\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}M_{ss} & 0 & \left(\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} - \frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} - \frac{1}{\kappa}\right)\frac{\delta(1-\alpha)M_{ss}}{\alpha} \\ \left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1} - 1\right)a_{ss} & a_{ss} & 0 \\ \left(\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1} - 1\right)(1-n_{ss}) & \frac{1-n_{ss}}{\alpha} & \left(\frac{\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} + \frac{1}{\alpha\kappa} - \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma\alpha}\right)\delta(1-n_{ss}) \end{array}\right)$$

Le déterminant de J_{cc}^{d} vaut :

$$\det\left(J_{cc}^{d}\right)=\underbrace{X}_{>0}\left[\begin{array}{c}\underbrace{\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}-1\right)}_{<0}\left(\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}-\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}-\frac{1}{\kappa}\right)\\ -\left(\frac{\alpha}{1-\tau}\right)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\end{array}\right]$$

avec la constante positive $X=\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)^{2}a_{ss}\delta\left(1-n_{ss}\right)M_{ss}$. Et, $\det\left(J_{d}^{cc}\right)<0$ a pour condition suffisante $\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}-\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}-\frac{1}{\kappa}>0$.

La trace de la jacobienne vaut :

$$Tr\left(J_{cc}^{d}\right)=a_{ss}-\frac{\frac{\gamma}{\gamma+1}\left(1-\alpha\right)\alpha M_{ss}}{1-\tau}-\left(\frac{\gamma\left(1-\alpha\right)+\eta}{\gamma}-\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{\left(1-\sigma\right)\left(1-\tau\right)}-\frac{1}{\kappa}\right)\frac{\delta\left(1-n_{ss}\right)}{\alpha}$$

Sous la condition suffisante permettant d'avoir un déterminant négatif, *i.e.* $\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}-\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}-\frac{1}{\kappa}>0$, nous avons donc deux valeurs propres positives et une valeur propre négative qui sont associées aux deux variables non-prédéterminées (n et a) et la variable prédéterminée (M). Le modèle de l'économie décentralisée est stable en point-selle.

Références bibliograhiques

[1] **Andreoni, J. & A. Levinson** (2001) "The simple analytics of the environmental Kuznets curve", *Journal of Public Economics* **80**, 269-286.

[2] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[3] **Aghion, P. & P. Howitt** (1998) *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press.

[4] **Barro, R. J. & X. Sala-i-Martin** (1995) *Economic Growth*, McGraw-Hill Inc. New-York.

[5] **Bovenberg, A. L. & S. Smulders** (1995) "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model", *Journal of Public Economics* **57**, 369-391.

[6] **Bringezu, S.** (2003) "Resource use and efficiency in industrial and developing countries: the available evidence of dematerialization", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[7] **Cerisier, F. & K. Schubert** (2000) "L'analyse de l'innovation dans les modèles de croissance endogène", *Revue française d'économie* **15** (1), 123-171.

[8] **Cesar, H.** (1994) "Control and Game Models of the Greenhouse Effect: Economics Essays on the Comedy and Tragedy of the Commons", *Lectures notes in economics and mathematical systems* (416) Spring-Verlag Berlin.

[9] **Cesar, H. & A. de Zeeuw** (1994) "Sustainability and the greenhouse effet: Robustness analysis of the assimilation function", dans *Control and Game Theoritical Models of the Environment* J. Filar et C. Carraro éds., Birkhaüser Boston.

[10] **Chevé, M. & K. Schubert** (2002) "La croissance optimale d'une économie polluante : durabilité économique versus durabilité écologique", *Annales d'économie et de statistiques* (65), 117-136.

[11] **Dasgupta, S., B. Laplante, H. Wang & D. Wheeler** (2002) "Confronting the environmental Kuznets curve", *Journal of Economic Perspectives* **16**, 147–168.

[12] **Egli, H. & T. M. Steger** (2004) "A Dynamic Model of the Environmental Kuznets Curve: Turning Point and Public Policy", document de travail *ETH Zurich* (04/33) Juillet.

[13] **Grimaud, A.** (1999) "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management* **38**, 249-266.

[14] **Grimaud, A. & L. Rougé** (2003) "Non-renewable resources and growth in vertical innovations: optimum, equilibrium and economic policies", *Journal of Environmental Economics and Management* **45**, 433-453.

[15] **Grimaud, A. & F. Ricci** (2004) "The Growth-Environment Trade-off : Horizontal versus Vertical Innovations", *The ICFAI Journal of Environmental Economics* **2** (1) Février, 7-40.

[16] **Grossman, G. M. & A. B. Krueger** (1993) "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement ", dans *The Mexico-U.S. Free Trade Agreement* P. M. Garber éds. Cambridge The MIT Press, 13-56.

[17] **Grossman, G. M. & A. B. Krueger** (1995) "Economic Growth and the Environment ", *Quartely Journal of Economics* **2**, 353-377.

[18] **Holmberg, J.**, **C. Azar & S. Karlsson** (2003) "Decoupling - Past Trends and Prospects for the Future", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[19] **Howitt, P.** (1997) "Capital Accumulation and Innovations in the Endogeneous Growth Confronting the Facts", document de travail *Ohio State Univerity.*

[20] **IPCC** (2001) "The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide", Chapitre 3 dans *Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis.*

[21] **Kuznets, S.** (1955) "Economic growth and income inequality", *American Economic Review* **49**, 1-28.

[22] **Lieb, C. M.** (2001) "The Environmental Kuznets Curve; a survey of possible causes", document de travail *University of Heidelberg.*

[23] **Michel, P.** (1993) "Pollution and Growth Toward the Ecological Paradise", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (80.93).

[24] **Michel, P. & G. Rotillon** (1996) "Desutility of Pollution and Endogenous Growth", *Environmental and Resource Economics* **6**, 279-300.

[25] **Mulligan, C. B. & X. Sala-i-Martin** (1993) "Transitional Dynamics in Two-Sector Models of Endogenous Growth", *Quarterly Journals of Economics* **108** (3), 739-773.

[26] **Musu, I.** (1994) "On Sustainability Endogenous Growth", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (11.94).

[27] **Nordhaus, W. D.** (1992) "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases", *Science* **258** (20) Novembre, 1315-1319.

[28] **Patris, C., F. Warrant & G. Valenduc** (2001) "L'innovation technologique au service du développement durable", dans *Leviers du développement durable* Centre de Recherche Travail & Technologies Février Namur.

[29] **Pontryagin, L. S., V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze & E. F. Mishchenko** (1962) *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, Inter-science Publishers New-York.

[30] **Porter, M. E. & C. van der Linde** (1995) "Toward a new concept of environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives* **9** (4), 97-118.

[31] **Romer, P. M.** (1986) "Increasing Returns and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy* **94** (5) Octobre, 1002-1037.

[32] **Saint-Paul, G.** (2003) "Quels instruments pour une politique environnementale", document de travail *IDEI* (171).

[33] **Schumpeter, J. A.** (1934) *The Theory of Economic Development*, Cambridge MA Harvard University Press.

[34] **Smulders, S.** (2005) "Endogenous Technological Change, Natural Resources, and Growth", Chapitre 8 à paraître dans *Scarcity and Growth Revisited; Natural Resources and the Environment in the New Millennium* R.D. Simpson, M. A. Toman and R. U. Ayres éds. The Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.

[35] **Stockey, N.** (1998) "Are There Limits To Growth?", *International Economic Review* **39** (1), 1-31.

[36] **Thompson, M. V. & J. T. Randerson** (1999) "Impulse response functions of terrestrial carbon cycle models: method and application", *Global Change Biology* **5** (4) Avril, 371-394.

Partie II
La croissance semi-endogène durable

"*Deeper and more interesting models soon emerged in the endogenous growth tradition. Some of them focus on the creation and accumulation of human capital, others on the process of technological invention and innovation (and the temporary monopolies that go with it). There is also a flouristing group of "Schumpeterian" models that emphasize the rivalry (or occasional complementarity) between an innovation and its predecessors. It seems to me that work along these lines is an important endogenous element in the development of new technology* [...] *Up to now, however, I have found that even these deeper and more circumstantial models of endogenous growth all rest at some key point on an essentially arbitrary linearity assumption, on the claim that the rate of growth of this is a function of the level of that, were "that" is some fairly simple and accessible variable that can be maneuvered by policy. Of course such a claim can be true, but the ones I have been neither empirically verified nor overwhelmingly plausible a priori.*", Solow (2001) en supplément à sa conférence pour le prix Nobel de 1987.

Chapitre 3
Technologie propre et croissance semi-endogène

Introduction

Le processus décentralisé de production des innovations est au centre des nouvelles théories de la croissance. De nombreux progrès dans la compréhension des mécanismes de la croissance ont été rendus possibles grâce aux modèles canoniques de la croissance endogène[38], et la critique de Jones (1995 a) (1995 b) (une idée équivalente se retrouve chez Kortum 1997 et Segerstrom 1998) marque une étape supplémentaire dans l'analyse des fondements de la croissance.

En effet, Jones (1995 a) juge que l'effet d'échelle présent dans les modèles de croissance endogène n'est pas pertinent au niveau empirique : si l'effort de recherche double, les taux de croissance du progrès technique et des revenus doublent également. Or, le nombre de scientifiques et l'investissement en éducation ont fortement augmenté dans les pays de l'OCDE depuis cinquante ans, alors que le taux de croissance des innovations est resté constant (voire décroissant en moyenne) et le taux de croissance moyen de la production n'est pas supérieur à ce qu'il était jusqu'au milieu du XX^{e} siècle.

Dans le modèle de croissance sans effet d'échelle proposé par Jones (1995 b), la politique économique n'a d'impact sur le taux de croissance que de façon transitoire. Ce modèle dit de croissance semi-endogène a pour déterminants de la croissance économique de long terme, l'accroissement de la population active et les paramètres d'externalités dans la recherche. Les externalités de connaissance sont à l'origine de l'absence d'effet à long terme de la politique.

---

[38] On peut citer les modèles fondateurs de Romer (1990), Ahion et Howitt (1992), Grossman et Helpman (1991 a b) : *cf.* chapitre 1 pour plus de détail.

Opposée à une conception de la croissance qui retirerait toute efficacité sur le long terme aux politiques économiques, une nouvelle frange de la littérature intitulée la croissance endogène sans effet d'échelle, menée par Aghion et Howitt (1998), Dinopoulos et Thompson (1998), Peretto (1998) et Young (1998), propose une modélisation alternative à celle de Jones. Dans des modèles mêlant à la fois la différenciation horizontale et la différenciation verticale, les auteurs tentent de redonner à la politique économique un effet sur la croissance de long terme sans pour autant faire apparaître un effet d'échelle.

Jones (1999) critique l'hypothèse retenue par ces auteurs pour la ligne horizontale de différenciation qui revient à supposer une stricte proportionnalité entre la variété des biens intermédiaires et la taille de l'économie. Cette hypothèse permet d'éliminer l'effet d'échelle dans le processus d'amélioration de la qualité des biens intermédiaires, puisque l'effort de recherche par secteur détermine l'amélioration de la qualité moyenne. L'argument économique est que l'efficacité de la recherche sur la qualité se réduit à mesure que le nombre de biens augmente puisque l'effort se dilue avec les secteurs supplémentaires (voir van de Klundert et Smulders 1997).

Par ailleurs, Christiians (2004) démontre que les notions de semi-endogénéité et d'effet d'échelle sont logiquement indépendantes : les hypothèses de la croissance semi-endogène ne peuvent pas entraîner d'effet d'échelle ; alors que les hypothèses de l'endogénéité peuvent conduire à un effet d'échelle. De plus, avec une croissance exogène de la population, l'existence de l'état stable de la croissance endogène repose sur des conditions supplémentaires dites "fil du rasoir" (*cf.* Christiians 2004 : propositions 2 et 3). Des arguments similaires sont présents chez Li (2002) (*cf.* chapitre 1).

À nos yeux, ces éléments justifient l'étude des effets de la semi-endogénéité sur le lien entre la croissance et l'environnement. Les enjeux liés au débat qui oppose les adeptes de la croissance semi-endogène de Jones aux tenants des modèles de croissance endogène sans effet d'échelle de Young sont réels pour le développement durable : l'élimination de l'effet d'échelle remet-elle en cause l'efficacité à long terme des politiques économiques de protection de l'environnement ? Les nouvelles externalités dans

la recherche, formalisées par Jones, représentent-elles un frein à la diffusion des technologies propres et, par là même, un obstacle de taille au développement durable ?
Pour répondre à ces questions, nous basons notre analyse, d'une part, sur la structure environnement / croissance développée dans le chapitre précédent et, d'autre part, sur la formalisation de l'activité de la recherche proposée par Segerstrom (1998) (pour la différenciation verticale des innovations) et Jones (1999) (pour la ligne horizontale). Dans notre cadre d'analyse, la ressource naturelle est dégradée au cours du processus de production, dont la productivité globale des facteurs s'accroît au cours du temps grâce à l'activité de recherche et développement. L'existence des technologies propres permet d'accélérer la substitution entre le capital naturel et le capital physique grâce à l'amélioration continue de la qualité de ce dernier (*cf.* chapitre 2). Ce découplage en faveur de la qualité des biens (le capital intangible) conduit notre économie vers un sentier de croissance dématérialisée, donc favorable à la qualité de l'environnement. Nous obtenons deux résultats principaux.

Les politiques incitatives en faveur de la protection de l'environnement ont un impact sur la croissance semi-endogène de long terme[39], alors que les autres instruments (notamment la subvention à la R&D) n'en ont plus. En effet, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la spécificité de la politique environnementale optimale réside dans l'augmentation constante de la taxe sur les émissions, reflétant la valeur toujours plus grande que la société accorde à l'environnement à mesure que elle se fixe des objectifs de protection plus élevés. Mais les conditions d'obtention de la croissance durable dépendent à présent des paramètres clés de la croissance semi-endogène avec environnement.
En effet, le sentier de croissance peut connaître différents profils selon les valeurs, d'une part, de l'efficacité des technologies propres pour réduire les émissions et, d'autre part, des paramètres de difficulté dans la R&D. Pour une efficacité faible des technologies propres et une difficulté élevée dans la R&D, nous montrons que la richesse et la qualité

[39] Notre résultat permet de relativiser l'affirmation suivante d'Aghion et Howitt (2005) : "*The semi-endogenous model of Jones* [...] *has nothing useful role to say about growth policy, since it predicts that long-run growth is independent of any policy that does not affect population growth*", page 7.

de l'environnement peuvent décroître ensemble. En définitive, malgré une exploitation forte du capital naturel (et la dégradation de la qualité de l'environnement qui en résulte), l'économie peut subir une décroissance irrémédiable de ses revenus à long terme.

Après avoir présenté l'ensemble des hypothèses du modèle (section 3.1), nous déterminons, d'abord, l'équilibre de l'économie centralisée et les conditions nécessaires d'existence du sentier de croissance soutenable (section 3.2), puis, l'équilibre de l'économie décentralisée (section 3.3).
Enfin, les niveaux optimaux des instruments économiques, ainsi que la dynamique transitionnelle d'une économie qui met en œuvre une politique économique de second-rang, dont le niveau est calibré sur données françaises, sont étudiés à la section 3.4.

3.1 Présentation du modèle

Notre économie est composée de trois secteurs : le secteur concurrentiel du bien final ; le secteur des biens intermédiaires où un nombre croissant de firmes se livrent une concurrence monopolistique ; et le secteur de la recherche et développement dont l'activité consiste à améliorer la qualité des biens intermédiaires.

Nous commençons la présentation des hypothèses du modèle par les éléments déjà décrits dans le chapitre précédent et que nous reprenons ici.

3.1.1 Les consommateurs face à la pollution

Le stock de pollution et l'utilité des ménages

L'équation d'accumulation du stock de pollution est similaire à celle du chapitre précédent. Elle s'écrit :

$$\dot{S}_t = P_t - \Theta S_t$$

avec $\Theta \in [0, 1]$, le taux d'assimilation naturelle.

La fonction d'utilité du consommateur représentatif est donnée par :

$$U_t(c_t, S_t) = \frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}$$

Elle est composée de la consommation par tête et du niveau du stock de la pollution tel que la concavité de la fonction est assurée, c'est-à-dire pour $\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial c_t} > 0$, $\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial S_t} < 0$, $\frac{\partial U' c_t}{\partial S_t} = 0$.

L'effet direct des innovations sur les émissions polluantes

Si l'on considère que les "meilleures technologies disponibles" sont les techniques de production les plus économes du point de vue de la consommation intermédiaire en ressources naturelles (et donc les moins polluantes), il devrait alors apparaître une diminution des émissions de pollution, à mesure que le secteur de la recherche innove dans ces technologies. Pour cette raison (*cf.* chapitre 2 pour plus de détail), nous formalisons le flux de pollution de la manière suivante :

$$P_t = \left(\frac{z_t^{\gamma}}{A_t^{\eta}}\right) Y_t \tag{3.1}$$

avec :

- $\gamma > 0$;
- $z_t \in [0, 1]$, l'intensité polluante de l'économie sous le contrôle du secteur du bien final. Si $z_t = 1$, alors l'intensité polluante est maximale et la production atteint son niveau potentiel. Si au contraire $z_t < 1$, la production se trouve diminuée ;
- $\eta \geqslant 0$, le degré des rendements de la qualité environnementale des biens intermédiaires est une mesure de l'effet direct des innovations sur les émissions. On parle également d'efficacité de la technologie pour réduire les émissions polluantes.

3.1.2 La R&D face à la difficulté de la recherche

Les mécanismes d'apparition des idées

Le secteur de la R&D est constitué d'un *continuum* de firmes spécialisées, dont le nombre croissant est B_t (en t). L'innovation verticale consiste, elle, à intégrer dans un bien intermédiaire j ($j_t \in [0, B_t]$) la meilleure qualité disponible $\bar{A}_t$. Autrement dit, la technologie de pointe pour le bien j, dont la productivité est $\bar{A}_t = \max_j \{A_{jt}\}$, est appliquée si le projet de recherche de la firme spécialisée dans la qualité du bien intermédiaire j abouti, à l'instant t. On se place donc dans un modèle de type "rattrapage de la qualité de pointe" (Aghion et Howitt 1992).

On définit par $A_t = \frac{\int_0^{B_t} A_{jt} dj}{B_t}$ l'indice de productivité moyenne. Enfin, la fonction de production du bien intermédiaire j est $x_{jt} = \frac{K_{jt}}{A_{jt}}$. Ainsi, le capital physique agrégé est donné par $K_t = \int_0^{B_t} A_{jt} x_{jt} dj$.

Des rendements décroissants dans l'activité de recherche sur la qualité

Dans un modèle de croissance endogène, la spécification de la fonction de production des innovations rend le taux de croissance de l'économie directement proportionnel aux ressources en niveau allouées à la recherche. On peut mettre en évidence l'existence, d'abord, d'un effet de la politique économique à travers l'intensité de la recherche (n) et, ensuite, la présence d'un effet d'échelle avec la taille de la population (L). Bien que certains considèrent que l'effet d'échelle est souhaitable, par exemple pour justifier l'intégration économique par ses effets positifs sur la croissance (Grossman et Helpman 1991 a, Rivera-Batiz et Romer 1991), la majeure partie des économistes rejette aujourd'hui le principe de l'effet d'échelle aux vues des faits empiriques. C'est pourquoi, nous proposons la formalisation suivante du flux instantané d'amélioration de la technologie de pointe :

$$p_t = \beta \frac{\left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)}{X_t} \tag{3.2}$$

avec $\frac{n_t L_t}{B_t}$ l'effort de recherche par variété, β le paramètre d'arrivée instantanée de la loi de Poisson, X_t la difficulté de la recherche qui résume les effets externes dans la recherche, telle que :

$$X_t = \left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{1-\lambda} \bar{A}_t^{1-\phi}$$

où $\bar{A}_t$ est la qualité de pointe de l'économie, $\lambda \leqslant 1$ le paramètre de duplication des projets de recherche, $\phi \leqslant 1$ le paramètre d'externalité intertemporelle de la R&D. La signification exacte de ces deux paramètres sera discutée dans quelques paragraphes. Nous pouvons déjà écrire que la difficulté de la recherche (X) croît avec l'amélioration de la qualité, l'augmentation du nombre de chercheurs, et décroît avec le nombre de biens intermédiaires.

L'équation précédente avec l'équation (3.2) nous donne :

$$p_t = \beta \left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{\lambda} \bar{A}_t^{\phi-1} \tag{3.3}$$

De l'équation (3.3), on tire que $\dot{\bar{A}}_t = \kappa\beta \left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{\lambda} \bar{A}_t^{\phi}$, avec $\kappa > 0$ tel que $\delta \equiv \kappa\beta$. On sait que $A_t = \frac{\bar{A}_t}{1+\kappa}$, soit $\left.\frac{A}{A}\right|_t = \left.\frac{\dot{\bar{A}}}{\bar{A}}\right|_t$ sur le sentier de croissance équilibrée.

Les externalités dans le processus d'innovation au niveau sectoriel

Pour l'innovateur spécialisé dans le bien intermédiaire j, la probabilité instantanée d'innover (ou, plus exactement, l'estimation au niveau individuel) vaut :

$$p_{jt} = \tilde{\beta} \left(\frac{n_{jt} L_t}{B_t}\right) \tag{3.4}$$

avec $\tilde{\beta} = \frac{\beta}{X_t}$, le paramètre d'externalité qui concentre tous les *spillovers* intemporels de connaissance dans la R&D. Ce paramètre est inconnu de l'innovateur au moment où il prend sa décision d'investir en recherche. En effet, du point de vue atomistique de la firme de R&D, les rendements de la R&D sont constants parce que les firmes perçoivent leur produit marginal comme étant égal au produit moyen dans la R&D.

Par contre, la probabilité "réelle" d'innover vaut :

$$p_{jt} = \beta \left(\frac{n_{jt} L_t}{B_t}\right) \left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{\lambda-1} \bar{A}_t^{\phi-1} \tag{3.5}$$

À partir de l'équation (3.5), on peut différencier deux types de *spillovers* intertemporels de connaissance dans la R&D : un *spillover* intra-sectoriel de R&D avec $\bar{A}_t^{\phi}$ (*knowledge spillovers within quality R&D*) dans la mesure où la qualité du secteur j est influencée (ϕ) par l'évolution de la qualité de pointe ; et un *spillover* inter-sectoriel de R&D avec $B_t^{\lambda-1}$ (*knowledge spillovers within variety R&D*) qui signifie que la variété croissante pèse $(\lambda - 1)$ sur l'amélioration de la qualité du secteur j.

Décrivons maintenant les mécanismes à l'origine de l'accroissement de la gamme des biens intermédiaires.

L'accroissement de la variété des biens intermédiaires

Comme la majeure partie des modèles de croissance endogène sans effet d'échelle, on fait l'hypothèse qu'à long terme la croissance de la taille de l'économie est proportionnelle à une augmentation du nombre des biens intermédiaires disponibles.

En effet, dans le cadre d'un modèle bi-sectoriel de R&D, avec un secteur de R&D dévoué à l'amélioration de la qualité et l'autre spécialisé dans la variété, on peut poser :

$$\dot{B}_t = (n_{Bt} L_t)^{\theta} \tag{3.6}$$

avec n_{Bt} l'intensité de la recherche en variété. À l'état stable, $g_B = \frac{\dot{B}}{B}$ étant constant, on doit avoir $\frac{(n_{Bt}L_t)^{\theta}}{B}$ également constant, ce qui est possible si, et seulement si, $g_B = \theta \frac{\dot{L}_t}{L_t} = \theta l$ à long terme. Par la suite, en intégrant la relation précédente, nous simplifions l'exercice en posant $B_t = L_t^{\theta}\ \forall t$. En faisant cette hypothèse, nous exogénéisons les fondements micro-économiques décrits juste avant, sans pour autant modifier les résultats à long terme.

Remarquons que les modèles de croissance endogène sans effet d'échelle en retenant la spécification (3.6) pour le secteur de R&D en variété font l'hypothèse de la semi-endogénéité dans la variété. En effet, l'équation (3.6) correspond à un paramètre d'externalité intertemporelle nul. Si on note ϕ_B ce paramètre, on a la relation suivante $\dot{B} = (n_B L)^{\theta} \dot{B}^{\phi_B}$ qui donne à long terme $\frac{\dot{B}}{B} = \frac{\theta l}{1-\phi_B}$. Pour $\phi_B = 0$, on a bien la relation recherchée.

Les modèles de croissance endogène sans effet d'échelle font une seconde hypothèse : $\theta = 1$. Elle permet d'éliminer l'effet d'échelle dans les équations (3.3) et (3.5) de production des innovations en qualité. Cette stricte proportionnalité entre le nombre de biens intermédiaires et la taille de la population est donc centrale dans ces modèles. Ces deux hypothèses ($\theta = \phi = 1$) peuvent être exclues pour au moins trois raisons :

- Premièrement, les hypothèses reviennent, comme nous venons de le démontrer, à avoir le secteur de R&D en variété qui est semi-endogène alors que le secteur de R&D en qualité est endogène. Ces hypothèses sont plus restrictives que d'avoir les deux secteurs semi-endogènes (*cf.* Li 2002 ou chapitre 1) ;

- Deuxièmement, et de façon tout à fait intuitive, $\theta = 1$ est une hypothèse difficilement soutenable puisqu'on ne voit pas pourquoi la variété serait juste égale au nombre de travailleurs (hormis pour les raisons techniques permettant l'élimination de l'effet d'échelle) ;

- Troisièmement, comme l'indique le tableau 3.a, si on maintient encore l'hypothèse de stricte proportionnalité entre la variété et la taille de la population dans le cadre de notre formalisation (équations 3.3 et 3.8 avec $\theta = 1$ et $\phi < 1$), on voit s'annuler le taux de croissance des innovations.

Dès lors que l'on prend en compte les paramètres d'externalités de connaissance dans la R&D ($\phi \neq 1$) et que l'on se place dans le cadre de l'analyse d'une croissance strictement positive et continue du produit, on ne peut donc plus considérer une variété des produits strictement proportionnelle à la taille de la population. Pour cette raison, nous préférons à $B_t = L_t$, la formalisation suivante de la différenciation horizontale :

$$B_t = L_t^{\theta} \tag{3.7}$$

avec $\theta > 0$ mais $\theta \neq 1$. L'idée attenante à l'équation (3.7) est qu'un accroissement de la taille de l'économie vient augmenter les profits que peuvent s'approprier des firmes produisant des biens intermédiaires nouveaux. Ce faisant la profitabilité de l'activité de la recherche en est augmentée. Mais deux alternatives se présentent selon la valeur de θ par rapport à l'unité :

- Si $\theta > 1$, le nombre de secteurs des biens intermédiaires croît plus que proportionnellement avec la population. Par contre, la taille de chaque secteur diminue

dans le temps. Comme l'indique le tableau 3.a, le modèle conduit alors à une diminution du taux de croissance de la qualité des biens intermédiaires ;

- Si au contraire $\theta < 1$, alors le nombre de biens intermédiaires croît moins que proportionnellement avec la population active et la taille de chaque secteur augmente dans le temps. Ainsi on est assuré de la croissance stricte des innovations à long terme.

Nous rappelons le fait que la différenciation horizontale n'est pas le fruit d'une activité de R&D délibérée dans notre modèle[40] : seules les innovations verticales tireront la croissance de notre économie.

Le taux de croissance de long terme de la productivité

À long terme $\frac{\dot{\bar{A}}}{\bar{A}_t}$ est constant et strictement positif si, et seulement si, (*cf.* tableau 3.a) :

$$g_{\bar{A}} = \lambda \frac{1-\theta}{1-\phi} l \text{ avec } \theta < 1 \text{ puisque } l > 0, \phi < 1 \text{ et } 0 < \lambda < 1 \qquad (3.8)$$

La difficulté de mise au point des innovations augmente avec le nombre de chercheurs lorsque $\lambda < 1$ et avec le stock de connaissance si $\phi < 1$.Nous avons deux effets :

- D'une part, avec $\lambda < 1$, il se met en place dans l'activité de recherche un effet dit de congestion lié à la duplication des projets de recherche. Les chercheurs qui travaillent sur des sujets analogues de façon décentralisée (*steping on toes effect*) réduisent la productivité de leurs travaux ;

- D'autre part, si $\phi > 0$, la productivité de la recherche augmente avec les innovations et il apparaît alors un effet de *spillover* intertemporel ou encore appelé "*standing on shoulders*"[41]. Les agents privés sont dans l'incapacité d'évaluer ce phénomène intertemporel d'externalité (voir Kortum 1993 et Evenson 1984). Maintenant si $\phi < 0$, alors toute nouvelle innovation diminue la productivité de la recherche future : il s'agit de l'effet d'épuisement des opportunités technologiques ("*fishing out effect*") qui revient à avoir un stock d'idées potentielles limité ce qui rend les premières découvertes plus faciles à effectuer.

---

[40] Nous avons préféré cette formalisation de la variété des biens de production au modèle de Young (1998) où est formalisée explicitement une activité de Recherche pour augmenter la variété des innovations. Comme l'a démontré Howitt (1997), le choix que nous avons opéré dans la formalisation des innovations horizontales n'affectera pas la portée des résultats de notre modèle qui retracera avec une aussi grande précision le cycle de vie des produits.

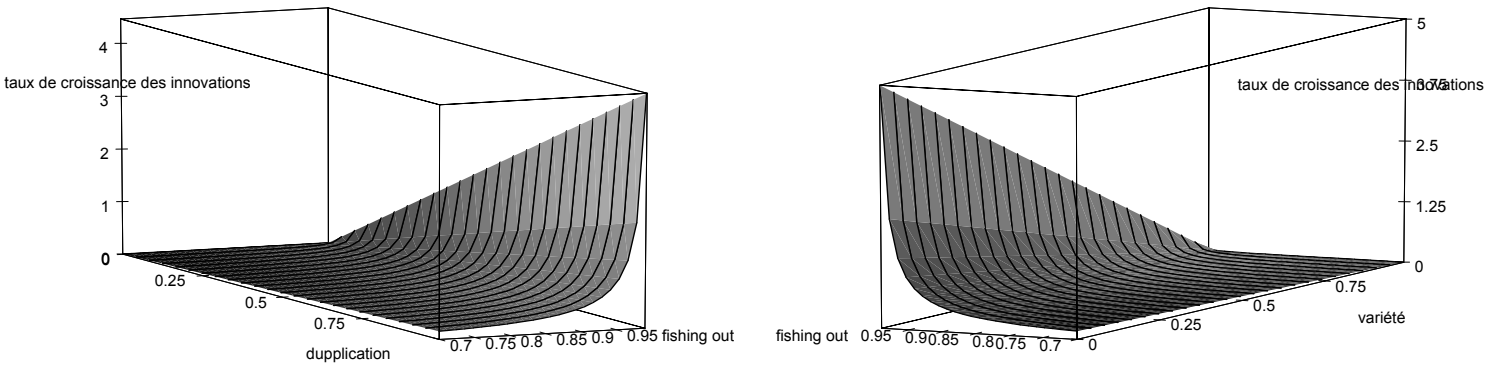
[41] "*Si j'ai vu plus loin que les autres, c'est parce que j'étais debout sur les épaules de géants*" : expression attribuée à Newton.

avec $0 < \lambda < 1$ et :	$\theta < 1$	$\theta = 1$	$\theta > 1$
$\phi = 0$	$g_A = \lambda (1-\theta) l > 0$	$g_A = 0$	$g_A = \lambda (1-\theta) l < 0$
$\phi < 1$	$g_A = \lambda \frac{1-\theta}{1-\phi} l > 0$	$g_A = 0$	$g_A = \lambda \frac{1-\theta}{1-\phi} l < 0$
$\phi = 1$	$g_A = \lambda (1-\theta) l > 0$	$g_A = \delta n^{\lambda}$	$g_A = \lambda (1-\theta) l < 0$

Tableau 3.a. Valeur du taux de croissance de la qualité des innovations selon la valeur des paramètres d'externalité dans la R&D.

Du tableau 3.a, on tire l'enseignement que seul le cas où $\theta = \phi = 1$ correspond à la croissance endogène à long terme.

Enfin, les graphiques 3.a suivants nous donnent l'influence générale des paramètres d'externalités dans la R&D sur le taux de croissance des innovations :



(1) (2)

Graphiques 3.a. Evolution du taux de croissance des innovations de long terme en fonction des paramètres λ, ϕ et θ ;
avec pour (1) $\theta = 0.1$ et $l = 0.05$; et (2) $\lambda = 1$ et $l = 0.05$

Plus la recherche est difficile (λ et ϕ tendent vers 0 ; et θ tend vers 1), plus le taux de croissance de long terme des innovations est faible. Le graphique précédent est une illustration simulée de ce phénomène.

Pour conclure cette section, nous précisons qu'Aghion et Howitt (2004) critiquent les résultats du modèle de Jones (1995 b) (1999) à l'aide de nouveaux faits empiriques que ce dernier ne permet pas de prendre en compte : à savoir, principalement, le fait que le taux de croissance du nombre de chercheurs diminue depuis cinquante ans alors que la part du PIB qui est investie dans les dépenses en R&D est relativement stable. En

effet, la part des dépenses en R&D est bien une constante dans le cadre de la croissance endogène sans effet d'échelle (elle est égale à n constant à long terme), tandis que la variable explicative l dans les modèles de croissance semi-endogène est constante (et donc non décroissante comme les faits empiriques le laisseraient entendre). Les auteurs peuvent conclure que :

> "*The rival semi-endogenous theory of Jones* [...] *which denies endogenous growth in the very long run, is inconsistent with the observation that productivity growth can be sustained through half a century of falling growth in R&D labor*", Aghion et Howitt (2004), page 29.

Cet argument récent à l'encontre de la semi-endogénéité de la croissance, d'une part, et les critiques des hypothèses de la croissance endogène sans effet d'échelle qui ont été discutées et mises en évidence dans cette section, d'autre part, nous montrent, en définitive, que les deux approches ont chacune leurs propres limites.

3.1.3 Le bien final homogène

Comme il existe deux dimensions dans l'espace des innovations possibles, la fonction de production du bien final est donnée par la relation suivante :

$$Y_t = \left(A_t^{\eta-1} \int_0^{B_t} A_{jt} P_{jt} dj \right)^{\frac{1}{\gamma+1}} \left[\int_0^{B_t} \left(\frac{(1-n_t) L_t}{B_t} \right)^{1-\alpha} A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj \right]^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{3.9}$$

avec :

- $1 > \alpha > 0$;
- $1 - n_t$, la part du facteur travail consacrée à la production du bien final et L_t, la population active telle que $L_t = L_0 e^{lt}$ avec $l > 0$;
- $\frac{(1-n)L}{B}$, le facteur travail associé dans le processus productif à un bien intermédiaire ;
- $A_t^{\eta-1} \int_0^{B_t} A_{jt} P_{jt} dj$, les émissions polluantes exprimées en terme de qualité environnementale.

La fonction de production est composée de deux niveaux de Cobb-Douglas : le premier relie le facteur travail et le capital utilisés sur chaque unité de production ; le second relie le premier aux émissions associées à chacune des unités de production. Sachant que $\int_0^{B_t} A_{jt}dj = B_t A_t$, $K_t = B_t A_t x_t$, $x_{jt} = x_t \ \forall j$ [42] et donc que $P_{jt} = \frac{P_t}{B_t} \ \forall j$, nous pouvons reformuler la fonction de production du bien final (équation 3.9) à l'aide de la fonction des émissions polluantes (équation 3.1) comme suit :

$$Y_t = z_t \left[A_t \left(1 - n_t\right) L_t\right]^{1-\alpha} K_t^{\alpha}$$

Les hypothèses de notre modèle maintenant justifiées, nous cherchons de répondre aux questions suivantes : quelles sont les répartitions optimales des facteurs ? Quel est l'objectif optimal de production ?

3.2 L'optimum social

Dans cette section, nous allons déterminer les niveaux des variables économiques et leurs évolutions qui correspondent à l'optimum parétien.

3.2.1 Le critère de la maximisation du bien-être

Le planificateur social maximise l'utilité intertemporelle de l'agent représentatif dans le but de déterminer les valeurs optimales de la consommation par tête (c_t), de l'intensité de la recherche (n_t) et de l'intensité polluante de l'économie (z_t). Les variables d'état sont le stock de capital physique (K_t), la qualité (A_t) et le stock de pollution (S_t). Le

[42] *Cf.* annexe D : conditions d'équilibre de l'économie décentralisée.

programme du planificateur s'écrit :

$$\left\{\begin{array}{l|l} \max\limits_{\{(c_t,\, n_t,\, z_t)\}_{t=0}^{+\infty}} \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t} U_t(c_t, S_t)dt & \\ & \dot{K}_t = Y_t - L_t c_t \\ & \dot{A}_t = \delta \left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{\lambda} A_t^{\phi} \\ & \dot{S}_t = P_t - \Theta S_t \\ \text{s. c. /} & \lim\limits_{t\to+\infty} e^{\rho t}\vartheta_t K_t \geqslant 0 \\ & \lim\limits_{t\to+\infty} e^{\rho t}\mu_t A_t \geqslant 0 \\ & \lim\limits_{t\to+\infty} e^{\rho t}\zeta_t S_t \geqslant 0 \\ & K_t \geqslant 0,\, A_t \geqslant 0,\, S_t \geqslant 0... \\ & K_0,\, A_0,\, S_0 \text{ donnés} \end{array}\right. \tag{3.10}$$

avec ϑ_t le prix implicite du capital ; μ_t le prix implicite des innovations ; ζ_t le prix implicite du stock de pollution.

3.2.2 Le sentier optimal de croissance semi-endogène

La résolution du programme précédent[43] permet de déterminer les taux de croissance optimale de long terme des variables économiques et environnementales de notre modèle[44] :

$$\left\{\begin{array}{l} g_A = \frac{1-\theta}{1-\phi}\lambda l > 0 \\ g_c^o = \frac{[\gamma(1-\alpha)+\eta]g_A - l}{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}} \\ g_z^o = \frac{1}{\gamma}\left(\eta g_A - \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}g_c^o - l\right) \\ g_S^o = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi}g_c^o \\ n^o = \frac{1}{1+Z^o} \text{ avec } Z^o = \frac{(\varepsilon-1)g_c^o+\rho+(1-\theta)\lambda l}{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\lambda g_A} \end{array}\right.$$

Sous quelles conditions l'économie centralisée atteindra-t-elle un sentier de croissance durable au sens fort ?

---

[43] *Cf.* annexe C pour la résolution de l'optimum social.

[44] A long terme : $g_y = g_c = g_k$ et $g_P = g_S$.

3.2.3 L'existence d'un sentier de croissance semi-endogène durable

Les conditions nécessaires pour un développement durable

Il est nécessaire de réunir les quatre conditions suivantes pour obtenir une croissance optimale qui soit durable au sens fort.

1. L'efficacité des technologies pour réduire les émissions doit être suffisante :

$$g_c^o > 0 \textbf{ si et seulement si}$$
$$\eta > \frac{l}{g_A} - \gamma\,(1-\alpha) \tag{3.11}$$

L'inégalité (3.11) représente une condition propre à la croissance semi-endogène durable qui est la conséquence directe de la prise en compte de la critique de Jones (1995 b). Une valeur trop faible du paramètre η (*i.e.* la condition 3.11 non respectée, soit $\eta < \frac{l}{g_A} - \gamma\,(1-\alpha)$) peut contraindre le système économique à la décroissance. La valeur seuil du paramètre η est d'autant plus faible, et donc moins contraignante, que la recherche est moins difficile (*i.e.* $\lambda \to 1$ et $\phi \to 1$), que la part du capital diminue ($\alpha \to 0$) et que le paramètre $\frac{1}{\gamma}$ (un indicateur du caractère polluant de la production) augmente.

2. L'élasticité intertemporelle de substitution doit être inférieure à l'unité :

$$g_S^o < 0 \textbf{ si et seulement si } \varepsilon > 1 \tag{3.12}$$

La deuxième condition est similaire à celle de la croissance endogène durable (chapitre précédent). Elle correspond à une utilité marginale de la consommation fortement décroissante afin de permettre à la population de choisir de faire des sacrifices dans sa consommation présente, pour atteindre une croissance durable au sens fort.

Avec ces deux premières conditions, on a déjà : $g_c^o > 0$, $g_S^o < 0$, $g_A^o > 0$ et $n^o \in [0,1]$. Mais, le taux de croissance de l'intensité polluante de l'économie dépend également du rendement η.

Une troisième condition est donc nécessaire pour caractériser notre sentier.

3. L'efficacité de la technologie pour réduire les émissions doit être limitée pour que l'intensité polluante soit décroissante à long terme :

$$g_z^o \leqslant 0 \textbf{ si et seulement si}$$

$$\eta \leqslant \frac{\gamma\left(1-\alpha\right)l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi} \tag{3.13}$$

Si l'effet direct de la R&D sur la pollution est important au point de saturer l'inégalité (3.13) (*i.e.* $\eta = \frac{\gamma(1-\alpha)l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$) alors l'intensité polluante devient unitaire ($z = 1$) : l'efficacité des innovations serait telle que le secteur de la recherche permettrait à lui seul la décroissance de la pollution. Cette valeur plafond est d'autant plus faible (ce qui revient à améliorer l'efficacité des technologies propres) que la recherche est moins difficile (*i.e.* $\lambda \rightarrow 1$ et $\phi \rightarrow 1$), que l'élasticité intertemporelle de substitution ($\frac{1}{\varepsilon}$) augmente, que la part du capital (α) augmente, que le paramètre γ diminue...

Enfin, la dernière condition d'existence de l'équilibre du sentier de croissance semi-endogène durable concerne le taux d'assimilation naturelle.

4. $N = \frac{P}{S}$ est positif à long terme :

$$\textbf{si et seulement si } \Theta > \frac{\varepsilon-1}{\varpi+1}\frac{\left[\gamma\left(1-\alpha\right)+\eta\right]g_A - l}{\gamma\left(1-\alpha\right)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}} \tag{3.14}$$

Sous les conditions (3.11) et (3.12), la valeur minimale du taux de régénération naturelle est positive. Nous pouvons résumer la condition (3.14) en disant qu'une valeur plus élevée du taux de croissance de la production à long terme peut être accompagnée d'une réduction du stock de pollution si, et seulement si, le taux de régénération naturelle augmente (la condition 3.14 pouvant s'écrire $\Theta > (-g_S^o)$ et sachant que $g_S^o = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi} g_c^o$...).

Sous l'ensemble de ces conditions, les variables en niveaux ont également des valeurs

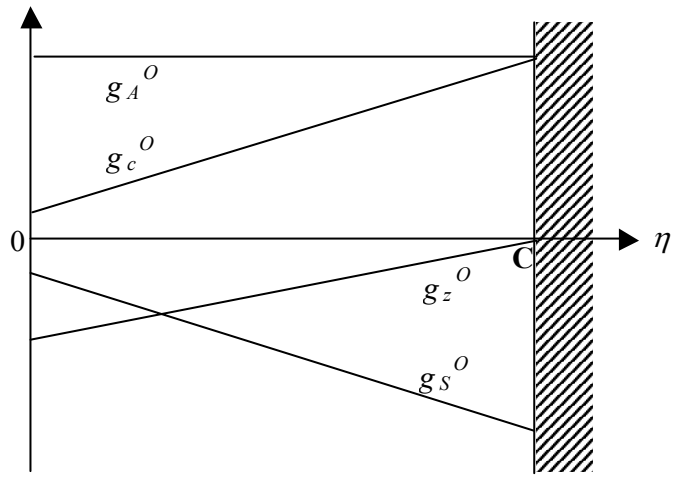
cohérentes. Notamment le niveau de la production est strictement positif à long terme malgré une intensité polluante qui devient extrêmement faible à long terme, la réduction de l'intensité étant compensée par l'accroissement continu, à un rythme adéquat, de la qualité des biens intermédiaires. Pour preuve, la variable stable à long terme $M \equiv \frac{Y}{K}$ est strictement positive (*cf.* annexe C. / Dynamique de l'équilibre centralisé) ce qui assure le résultat précédent.

Résumons maintenant les effets de ces quatre conditions.

Les différents équilibres possibles

Si le membre de droite de l'inégalité (3.11) est négatif (*i.e.* $g_A > \frac{l}{1-\alpha}$), nous pouvons écrire que la qualité croît à un taux exogène de long terme "élevé" et que la condition (3.11) n'a plus lieu d'être puisque, par définition, $\eta \geqslant 0$. Dans ce cas, seule la condition (3.13) prévaut et notre économie est caractérisée par un sentier de croissance durable avec une intensité polluante :

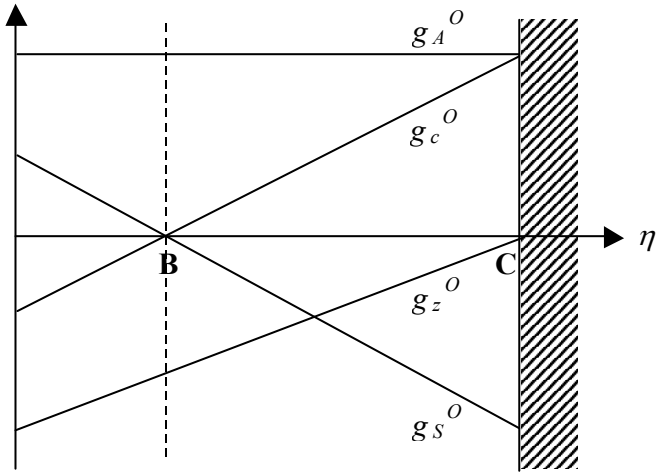
- décroissante lorsque η est faible, c'est-à-dire $\eta < \frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$,ou
- constante et égale à un, lorsque η vaut exactement $\frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$ (point **C** sur le graphique 3.b ci-dessous).



Graphique 3.b. La nature du sentier de croissance en fonction de l'efficacité des technologies propres (paramètre η), avec au point **C** : $\eta = \frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$.

Maintenant, avec un taux de croissance des innovations en qualité qui est plus "faible" (autrement dit, avec ϕ et λ plus faibles) et strictement inférieur à $\frac{l}{1-\alpha}$ (ce qui correspond à un membre de droite de l'inégalité 3.11 cette fois positif), si la condition (3.11) n'est pas satisfaite alors notre économie n'est plus sûre de tendre vers un développement économique soutenable. L'économie peut connaître quatre natures différentes d'équilibre de long terme selon la valeur du paramètre η :

- Le premier équilibre (*cf.* graphique 3.c ci-dessous, avec $0 < \eta < \frac{\gamma l}{g_A} - \gamma(1-\alpha)$) est caractérisé par une décroissance économique qui s'accompagne d'un stock de pollution croissant ;
- Pour une efficacité des technologies propres (η) plus élevée et juste égale à $\frac{\gamma l}{g_A} - \gamma(1-\alpha)$ (point **B** sur le graphique 3.c), l'équilibre est défini par des taux de croissance nuls de la production et des émissions. Il s'agit d'un état stationnaire ;
- Les deux derniers équilibres (tels que : $\frac{\gamma l}{g_A} - \gamma(1-\alpha) < \eta < \frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$; et $\eta = \frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$ *i.e.* point **C** sur le graphique 3.c) correspondent à un développement durable avec une intensité polluante décroissante ou unitaire respectivement.



Graphique 3.c. La nature du sentier de croissance, fonction de l'efficacité des technologies propres (paramètre η), avec au point **B :** $\eta = \frac{\gamma l}{g_A} - \gamma(1-\alpha)$; et au point **C :** $\eta = \frac{\gamma l}{g_A} + \frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}$.

Dans le cadre de la croissance semi-endogène, il est donc possible qu'il y ait décroissance simultanée des revenus et de la qualité de l'environnement à long terme. Cette situation correspond au cas où la difficulté dans la R&D est élevée et l'efficacité

des technologies pour réduire les émissions polluantes est faible, soit $g_A < \frac{l}{(1-\alpha)}$ et $\eta < \frac{\gamma l}{g_A} - \gamma(1-\alpha)$.

3.2.4 La dynamique transitionnelle

Nous n'avons pas été en mesure d'étudier analytiquement les propriétés du sentier optimal de croissance durable. C'est pourquoi nous réalisons, dans cette section, et à titre d'exemple, des simulations numériques des trajectoires optimales.

Quelques résultats numériques

Les valeurs données aux paramètres sont identiques à celles utilisées dans le chapitre précédent. Elles ont donc déjà été justifiées. C'est pourquoi ne nous reviendrons pas ici sur la raison de nos choix. Seuls les nouveaux paramètres, c'est-à-dire ceux qui sont liés aux mécanismes de la semi-endogénéité de la croissance, donneront lieu à un commentaire. Les valeurs retenues sont :

δ	ϕ	κ	ρ	l	λ	θ	ε	α	ϖ	γ	Θ
0.07	0	1.75	0.04	0.015	0.9	0.1	2	0.25	0.5	2	0.005

Nous réalisons nos simulations numériques avec $\phi = 0$. Nous nous plaçons dans le cas fort de la semi-endogénéité, c'est-à-dire qu'il y a absence d'externalités de connaissance. Jones (1995 b) va jusqu'à dire que $\phi = 0$ est une hypothèse moins forte que de poser $\phi = 1$ à la manière de Romer (1990), Aghion et Howitt (1992), etc. Avec ces paramètres, nous pouvons décrire le fait que le taux de croissance de la productivité globale des facteurs ($(1-\alpha)\, g_A$) est inférieur au taux de croissance des innovations. Ce fait stylisé est absent du modèle de croissance endogène du chapitre précédent. Nous avons aussi choisi une duplication faible ($\lambda = 0.9$) et une variété des biens intermédiaires qui croît lentement ($\theta = 0.1$ ce qui donne un taux de croissance de la variété de $\theta l = 0.15$ %). Pour ces différents paramètres, on atteint un taux de croissance des innovations verticales de 1.21 %.

Nous évaluons ensuite la sensibilité du modèle au paramètre d'efficacité des technologies propres avec $\eta = 1$ et $\eta = 0$. Les tableaux 3.b et 3.c suivants reprennent les

résultats des tests de sensibilité du modèle pour l'ensemble des paramètres qui le composent (il s'agit des variations des variables économiques, exprimées en pourcentage, suite à une hausse de 10 % de l'un des paramètres du modèle) :

$\boldsymbol{\eta = 1}$	$\mathbf{g}^o_{c_{ss}}$	$\mathbf{n}^o_{ss}$	$\mathbf{g}^o_{A_{ss}}$	$\mathbf{g}^o_{z_{ss}}$	$\mathbf{g}^o_{S_{ss}}$
Réf.	0.48	24.2 2	1.21	-0.55	-0.32
$\triangle^+\boldsymbol{\delta}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\eta}$	7.90	2.48	0	-5.26	7.90
$\triangle^+\boldsymbol{\Theta}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\rho}$	0	-5.05	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\alpha}$	-2.41	1.20	0	-1.78	-2.41
$\triangle^+\boldsymbol{\gamma}$	6.80	-3.21	0	-4.52	6.80
$\triangle^+\boldsymbol{\varepsilon}$	-4.04	-0.97	0	2.69	15.15
$\triangle^+\boldsymbol{\varpi}$	0.68	-0.04	0	-0.45	-2.56
$\triangle^+\boldsymbol{\kappa}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\mathbf{l}$	10	5.08	10	10	10
$\triangle^+\boldsymbol{\lambda}$	19.75	12.06	10	3.50	19.75
$\triangle^+\boldsymbol{\theta}$	-2.19	-0.52	-1.11	-0.39	-2.19

Tableau 3.b. Résultats des simulations numériques pour $\eta = 1$,
avec les indices o pour l'optimum et ss pour *steady state.*

$\boldsymbol{\eta = 0}$	$\mathbf{g}^o_{c_{ss}}$	$\mathbf{n}^o_{ss}$	$\mathbf{g}^o_{A_{ss}}$	$\mathbf{g}^o_{z_{ss}}$	$\mathbf{g}^o_{S_{ss}}$
Réf.	0.10	17.06	1.2 1	-0.83	-0.07
$\triangle^+\boldsymbol{\delta}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\eta}$	/	/	/	/	/
$\triangle^+\boldsymbol{\Theta}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\rho}$	0	-5.87	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\alpha}$	17.53	0.28	0	-1.78	17.53
$\triangle^+\boldsymbol{\gamma}$	49.43	-0.78	0	-4.52	49.43
$\triangle^+\boldsymbol{\varepsilon}$	-4.04	-0.24	0	0.37	15.15
$\triangle^+\boldsymbol{\varpi}$	0.68	-0.01	0	-0.06	-2.56
$\triangle^+\boldsymbol{\kappa}$	0	0	0	0	0
$\triangle^+\mathbf{l}$	10	6.01	10	10	10
$\triangle^+\boldsymbol{\lambda}$	56.52	13.75	10	5.74	56.52
$\triangle^+\boldsymbol{\theta}$	-6.28	-0.61	-1.11	-0.64	-6.28

Tableau 3.c. Résultats des simulations numériques pour η=0,
avec les indices o pour l'optimum et ss pour *steady state.*
Variations exprimées en pourcentage suite à une hausse de 10 % ($\triangle^+$) de l'un des paramètres du modèle.

Les résultats des simulations numériques sont conformes au regard du travail déjà réalisé dans le chapitre précédent. Ensuite, on retrouve la différence forte liée à la

semi-endogénéité de la croissance qui réside dans le fait, déjà commenté, que seuls les paramètres d'externalité dans la R&D jouent sur la valeur de long terme du taux de croissance des innovations. On remarque également que le modèle est particulièrement sensible au paramètre de duplication de la recherche (λ) ; d'autant plus sensible que l'efficacité des technologies propres (η) est faible. Pour $\eta = 0$, la réduction des externalités négatives liées à la duplication des projets de recherche (soit une augmentation de 10 % du paramètre λ) permet d'améliorer de façon importante le taux de croissance des revenus de long terme (précisément, une augmentation de 56.52 % du taux de croissance à long terme, tableau 3.c). Le pendant au paramètre η, du côté de l'intensité polluante, c'est-à-dire le paramètre γ, est également très influent sur l'équilibre de long terme (pour $\eta = 0$, une augmentation de 10 % de γ augmente de 49.43 % le taux de croissance de long terme, tableau 3.c) puisque l'effort de réduction de l'intensité polluante est réduit (en terme de croissance) pour un γ plus élevé.

L'annexe C présente en détail la dynamique de l'économie centralisée. Nous précisons ici que le déterminant de la jacobienne (évaluée à l'aide des valeurs données aux paramètres dans cette section) est négatif et nous calculons trois valeurs propres négatives qui sont associées aux trois variables prédéterminées du modèle. D'après les conditions de Blanchard et Khan, l'équilibre stationnaire de l'économie centralisée est un point-selle.

Sans une politique économique adaptée, l'économie décentralisée ne pourra pas tendre vers le sentier de croissance semi-endogène durable dont nous venons de démontrer les conditions d'existence et de stabilité.

3.3 L'économie décentralisée

L'étude du modèle de croissance durable s'ouvre donc sur la recommandation des instruments économiques.

3.3.1 Trois instruments économiques pour rétablir l'optimum

Les instruments sont les suivants : la subvention à l'achat des biens intermédiaires (τ), la taxation des émissions polluantes (h) et la subvention (ou la taxation) du coût de production dans la R&D (σ).
Notre économie souffre, en effet, de trois effets externes et distorsions de marchés. Ils concernent le pouvoir de monopole des producteurs des biens intermédiaires et les émissions de polluants du secteur du bien final. L'activité de recherche et développement est source de la dernière externalité dont la multiplicité des mécanismes est rendue plus complexe par la prise en compte des phénomènes de duplication et des *spillovers* inhérents à la recherche.

Détaillons maintenant les comportements des agents.

3.3.2 Le comportement des agents

L'innovateur j

Le programme de maximisation d'une firme du secteur de la recherche est :

$$\begin{cases} \max\limits_{(n_{jt})} V_{jt} p_{jt} - (1-\sigma_t)\, w_t \frac{n_{jt} L_t}{B_t} \\ \text{s. c. } / \left| \begin{array}{l} p_{jt} = \widetilde{\beta} \left(\frac{n_{jt} L_t}{B_t} \right) \\ B_t = L_t^{\theta} \end{array} \right. \end{cases}$$

avec V_{jt}, la valeur de l'innovation. On remarque que $\widetilde{\beta}$ est donné pour l'innovateur atomistique. Ce paramètre concentre en fait toutes les externalités liées à la R&D.

Le programme aboutit à la condition de libre-entrée :

$$V_{jt} = \left(\frac{1-\sigma_t}{\widetilde{\beta}}\right) w_t$$

Pour l'équilibre macro-économique, on remplace $\widetilde{\beta}$:

$$V_{jt} = \left(\frac{1-\sigma_t}{\beta}\right)\left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{1-\lambda} \bar{A}_t^{1-\phi} w_t = V_t \tag{3.15}$$

La valeur de l'innovation est la même pour tous les innovateurs puisqu'ils atteignent la qualité de pointe ($\bar{A}$).

Le secteur du bien final

Le programme du producteur du bien final consiste à maximiser son profit instantané[45] en déterminant l'intensité polluante de sa production, sa demande de travail et la quantité des biens intermédiaires qu'elle désire. Le programme aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{aligned}
z_t &= \begin{cases} \left[\frac{(\gamma+1)h_t}{A_t^{\eta}}\right]^{-\frac{1}{\gamma}}, \text{ si } h_t > \frac{A_t^{\eta}}{\gamma+1} \\ 1, \text{ si } h_t \leqslant \frac{A_t^{\eta}}{\gamma+1} \end{cases} \\
w_t &= (1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{Y_t}{\frac{(1-n_t)L_t}{B_t}} \\
p_{jt} &= \left(\frac{\alpha}{1-\tau_t}\right)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right) z_t \left[\frac{(1-n_t)\,L_t}{B_t}\right]^{1-\alpha} A_{jt} x_{jt}^{\alpha-1}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Les résultats relatifs à l'effet sur l'intensité polluante d'une taxe minimale sur les émissions ont déjà été mis en évidence dans le chapitre précédent.

Le secteur des biens intermédiaires

Fort de son pouvoir de marché, la résolution du programme de la firme monopolistique

[45] *i.e.* $\Psi_t = Y_t - w_t\,(1-n_t)\,L_t - \int_0^{B_t} p_{jt}\,(1-\tau_t)\,x_{jt}dj - h_t \int_0^{B_t} P_{jt}dj$.

j du secteur des biens intermédiaires[46] conduit à :

$$\begin{cases} p_{jt} = \frac{r_t A_{jt}}{\alpha} \\ x_{jt} = \frac{(1-n_t)L_t}{B_t}\left[\alpha^2\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\frac{z_t}{(1-\tau_t)r_t}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}} = x_t,\ \forall j \end{cases}$$

On remarque que $x_{jt} = x_t$, $\forall j$. Ce résultat est nécessaire à l'agrégation sectorielle qui permet de déterminer les variables au niveau macro-économique. Et :

$$r_t = \frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{Y_t}{K_t}$$

Le profit de la firme j est :

$$\Pi_{jt} = (1-\alpha)\, p_{jt} x_t \tag{3.17}$$

Avec l'équation (3.16), on peut finalement réécrire le profit (équation 3.17) de l'innovateur :

$$\Pi_t\left(\bar{A}_t\right) = (1+\kappa)\,\frac{(1-\alpha)\,\alpha}{1-\tau_t}\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)Y_t \tag{3.18}$$

Ainsi, la quantité vendue par les producteurs de biens intermédiaires est une fonction décroissante de la variété de ces mêmes biens ; le prix de vente est une fonction croissante de la qualité du bien en question ; et le profit est dépendant des deux paramètres à la fois. Le cycle de vie du produit, en plus d'avoir une durée de vie finie et aléatoire, voit donc ses ventes diminuer dans le temps à cause d'un nombre accru de biens intermédiaires concurrents.

Le consommateur représentatif

Le consommateur représentatif maximise sa fonction d'utilité intertemporelle sous la contrainte budgétaire dynamique, sans qu'il ne puisse influencer le montant des émissions qu'il subit. Cette externalité est à l'origine de la justification de la politique environnementale que nous décrirons dans la suite du chapitre. Le programme du

[46] *i.e.* $\max \Pi_t = p_{jt}x_{jt} - r_t A_{jt} x_{jt}$ sous (3.16).

consommateur est donc donné par le problème dynamique suivant :

$$\begin{cases} \max\limits_{(c_t)_{t=0}^{+\infty}} \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t}\left(\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right) dt \\ \text{s. c. } / \left| \begin{array}{c} \dot{W}_t = w_t L_t + rW_t - L_t c_t + T_t \\ \text{et } \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t \geqslant 0 \end{array} \right. \end{cases}$$

avec $\dot{W}_t = w_t + rW_t - L_t c_t + T_t$ la contrainte budgétaire du ménage représentatif, où $r_t W_t$ est la richesse du ménage et T_t, la taxe (une subvention ici) qui permet d'équilibrer le budget du gouvernement.

La résolution du problème précédent revient à poser l'hamiltonien :

$$H = e^{-\rho t} U(c, S) - \chi \dot{W} = e^{-\rho t}\left(\frac{c^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right) - \chi\left(wL + rW - C + T\right)$$

Et les conditions du premier ordre sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial c} = 0 \\ \dot{\chi} = -\frac{\partial H}{\partial W} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} e^{-\rho t} c^{-\varepsilon} = \chi \\ \frac{\dot{\chi}}{\chi} = -r \end{cases}$$

Le système précédent conduit à "la règle de Keynes-Ramsey" suivante[47] :

$$g_{c,t} = \frac{r_t - \rho - l}{\varepsilon}$$

De cette règle découlera le calcul du taux d'intérêt unique du marché (r_t). L'optimalité du programme du consommateur représentatif nous donne également la condition suivante $\lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t = 0$.

L'État

Enfin, l'équilibre fiscal de l'État s'écrit $T_t + \sigma w_t n_t L_t + \tau r_t K_t = h_t P_t$.

[47] Le taux de croissance de la consommation par tête est ici conforme à celui de Jones (1995 b) pour avoir suivi la même procédure : *cf.* équation (A14) de l'annexe, page 782.

3.3.3 L'équilibre décentralisé de long terme

Détermination de l'intensité de la recherche à long terme

L'équation de libre arbitrage à partir de laquelle nous allons déterminer l'intensité de la recherche de notre économie s'écrit :

$$V\left(\bar{A}_t\right) = \frac{\Pi\left(\bar{A}_t\right)}{r_t + p\left(\bar{A}_t\right) - \left.\frac{\dot{V}}{V}\right|_t} \tag{3.19}$$

Avec, (*cf.* équations 3.18 et 3.15) :

$$\begin{aligned} \frac{\Pi\left(\bar{A}_t\right)}{V_t} &= \delta \frac{\alpha^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \left(\frac{1-n_t}{n_t}\right) g_{A_t} \text{ et} \\ V_t &= (1-\alpha)\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\left(\frac{1-\sigma_t}{\beta}\right)\left(\frac{n_t}{1-n_t}\right)\frac{Y_t}{g_{A_t}} \end{aligned}$$

Cela nous donne les valeurs de long terme de l'intensité de la recherche et du taux d'intérêt :

$$n_{ss}^d = \frac{1}{Z_{ss}^d + 1} \text{ avec } Z_{ss}^d = \frac{(1-\sigma)(1-\tau)}{\alpha\delta^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}} \left[(\varepsilon-1)\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} + \frac{\delta}{\kappa} - \frac{\frac{\varepsilon-1}{\gamma(1-\alpha)}g_h - \rho}{\lambda\frac{(1-\theta)}{1-\phi}l}\right]$$

et :

$$r_{ss}^d = \varepsilon\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\lambda\frac{(1-\theta)}{1-\phi}l - \frac{\varepsilon}{\gamma(1-\alpha)}g_h + \rho + l$$

L'intensité de la recherche croît avec les trois instruments économiques et décroît avec l'efficacité des technologies propres (η). Plus le taux exogène de croissance des innovations est élevé, plus le taux d'intérêt est grand.

Détermination des taux de croissance de long terme

Le système suivant représente l'ensemble des relations économiques à long terme :

$$\begin{cases} g_A = \frac{1-\theta}{1-\phi}\lambda l \\ g_c^d = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}g_A - \frac{1}{\gamma(1-\alpha)}g_h \\ g_S^d = \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}g_A - \frac{\gamma(1-\alpha)+1}{\gamma(1-\alpha)}g_h + l \\ g_z^d = \frac{\eta}{\gamma}g_A - \frac{1}{\gamma}g_h \text{ si } g_h > \eta g_A \end{cases}$$

Commentons ces résultats. Avec un taux de croissance des innovations exogène à

long terme, la politique environnementale de taxation croissante des émissions aura toujours pour conséquence de diminuer le taux de croissance de long terme, quel que soit le niveau de la politique de soutien de l'effort de R&D. Aussi, le taux de croissance de la consommation dans l'économie de laisser-faire (croissance nulle de la taxe sur les émissions) est toujours supérieur à celui de l'économie centralisée : $g_c^d\big|_{(g_h=0)} > g_c^o$. On rappelle qu'au chapitre précédent, l'endogénéité du taux de croissance à long terme permettait d'atteindre une croissance avec un effort de recherche plus élevé grâce aux mécanismes d'incitation de la R&D, malgré la présence d'une taxe élevée et croissante sur les émissions polluantes.

Avec la politique environnementale, le producteur du bien final va être soumis à un niveau d'imposition de ses émissions dont la croissance sera telle qu'il aura intérêt à diminuer l'intensité polluante de sa production de façon continue. La diminution de z_t vient mécaniquement baisser le niveau de la production effective et de ce fait la productivité de tous les facteurs. Malgré cela, le secteur du bien final demande moins de travail et moins de biens intermédiaires à cause de la réduction du niveau de la production. Côté R&D, ni la baisse du niveau des salaires (due à la diminution de la demande de travail du secteur final) ni celle des profits des producteurs des biens intermédiaires (liée à la diminution de la demande du secteur final en biens intermédiaires) ne peuvent influencer le taux de croissance de long terme puisque la recherche est ici indépendante de tous les paramètres endogènes. La subvention de la recherche n'a donc d'effet que sur le niveau de revenu de l'économie, mais pas sur le taux de croissance de la production à long terme.

3.4 La politique économique pour un développement durable

Nous calculons maintenant les niveaux des trois instruments économiques instaurés par l'État qui permettent de faire correspondre les taux de croissance de long terme des économies centralisée et décentralisée.

3.4.1 Les instruments optimaux

Subventionner l'achat des biens intermédiaires

Comme attendu (*cf.* chapitre 2), la subvention optimale à l'achat des biens intermédiaires vaut :

$$\tau^o = 1 - \alpha$$

α est le taux de marge appliqué par le producteur du bien intermédiaire qui est égale à l'élasticité de substitution entre les biens intermédiaires, pour la technologie de production du bien final.

Taxer les émissions de polluants

La croissance optimale de la taxe sur les émissions polluantes doit être telle que les taux de croissance des émissions polluantes des économies centralisée et décentralisée s'égalisent, soit $g_S^o = g_S^d$:

$$g_h^o = \frac{\left[\gamma\left(1-\alpha\right)+\eta\right]\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}g_A + \gamma\left(1-\alpha\right)l}{\gamma\left(1-\alpha\right)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}} \tag{3.20}$$

g_h^o dépend positivement des externalités technologiques (λ et ϕ) puisque moins la recherche est difficile (*i.e.* $\lambda \to 1$ et $\phi \to 1$) plus on a d'innovations en qualité qui permettent d'améliorer le taux de croissance économique et, à l'optimum, la taxe croît plus vite afin de maintenir un taux de croissance des émissions négatif. Finalement, on obtient la règle connue de politique économique suivante pour le niveau optimal de la

taxe :

$$\frac{h_t^o P_t^o}{Y_t^o} = \frac{1}{1+\gamma}$$

$\frac{1}{1+\gamma}$ est l'élasticité du bien final par rapport aux émissions polluantes.

Subventionner ou Taxer la recherche et développement ?

L'instrument concernant le coût du travail alloué à la recherche doit permettre au secteur de la R&D d'employer le nombre optimal de chercheurs, soit $n^o = n^d$. On trouve :

$$1-\sigma^o = \delta \frac{\alpha}{1-\tau} \frac{1+\kappa}{\kappa} \frac{(\varepsilon-1)\, g_A \left(\frac{[\gamma(1-\alpha)+\eta]-\frac{l}{g_A}}{\gamma(1-\alpha)+\frac{\varepsilon+\varpi}{1+\varpi}} \right) + \rho + (1-\theta)\,\lambda l}{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} \lambda g_A \left[(\varepsilon-1)\, \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} + \frac{\delta}{\kappa} - \frac{\frac{\varepsilon-1}{\gamma(1-\alpha)} g_h - \rho}{g_A} \right]}$$

Le taux σ^o décroît logiquement avec g_A. Cependant, il existe une possibilité pour que l'instrument soit négatif. Ce cas se présente lorsque l'effort de recherche de l'équilibre décentralisé est trop élevé par rapport à ce qu'exigerait l'optimum parétien. L'exercice de simulation suivant permet d'évaluer l'importance du phénomène. Pour simplifier l'application numérique, les autres instruments économiques sont posés égaux à zéro et les valeurs des paramètres du modèle sont :

$\boldsymbol{\delta}$	$\boldsymbol{\kappa}$	$\boldsymbol{\rho}$	l	$\boldsymbol{\varepsilon}$	$\boldsymbol{\varpi}$	$\boldsymbol{\gamma}$	$\mathbf{g}_{Ass}$
0.07	1.75	0.04	0.015	2	0.5	2	0.015

Sachant que, dans le cadre d'une croissance semi-endogène, le taux de croissance des innovations est une variable exogène, on peut donc donner une valeur à g_A. Ce paramètre supplémentaire, dans l'exercice de calibration présenté ici, nous permet de laisser libre la variable ϕ dont la valeur sera fonction de celles des paramètres g_A, θ et λ ; soit exactement $\phi = \frac{g_A-(1-\theta)\lambda l}{g_A}$. En nous appuyant sur les travaux de Jones et Williams (2000), nous déterminons ainsi un exercice de statique comparative consistant à faire varier les paramètres les plus influents du modèle, à savoir α, θ, η et λ. Les tableaux suivants reprennent les résultats que nous allons commenter ensuite. Plus précisément, nous calculons l'incidence du paramètre λ (pour quatre valeurs comprises entre 0 et 1) sur le rapport des intensités de la recherche centralisée et de laisser-faire, en fonction

de différentes valeurs de θ (quatre valeurs également comprises entre 0 et 1) : tableaux 3.d à 3.g.

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.999	6.25×10^{-3}	5.3×10^{-4}	11.784
0.01	0.99	6.25×10^{-3}	5.26×10^{-3}	1.1874
0.1	0.9	6.25×10^{-3}	4.892×10^{-2}	0.1277
0.25	0.75	6.25×10^{-3}	0.109	5.709×10^{-2}
1	0	6.25×10^{-3}	0.287	2.177×10^{-2}

Tableau 3.d.

pour $\theta = 0$ et $\eta = 1$ et $\alpha = 0.25$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.99925	6.25×10^{-3}	5.30×10^{-4}	11.783
0.01	0.9925	6.25×10^{-3}	5.267×10^{-3}	1.1865
0.1	0.925	6.25×10^{-3}	4.9281×10^{-2}	0.12680
0.25	0.812 5	6.25×10^{-3}	0.11127	5.616×10^{-2}
1	0.25	6.25×10^{-3}	0.29992	2.083×10^{-2}

Tableau 3.e.

pour $\theta = 0.25$ et $\eta = 1$ et $\alpha = 0.25$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.9995	6.25×10^{-3}	5.30×10^{-4}	11.782
0.01	0.995	6.25×10^{-3}	5.271×10^{-3}	1.1855
0.1	0.95	6.25×10^{-3}	4.965×10^{-2}	0.12586
0.25	0.875	6.25×10^{-3}	0.11316	5.522×10^{-2}
1	0.5	6.25×10^{-3}	0.31405	1.989×10^{-2}

Tableau 3.f.

pour $\theta = 0.5$ et $\eta = 1$ et $\alpha = 0.25$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.9999	6.25×10^{-3}	5.30×10^{-4}	11.781
0.01	0.999	6.25×10^{-3}	5.278×10^{-3}	1.184
0.1	0.99	6.25×10^{-3}	5.025×10^{-2}	0.12436
0.25	0.975	6.25×10^{-3}	0.1163	5.372×10^{-2}
1	0.9	6.25×10^{-3}	0.3396	1.839×10^{-2}

Tableau 3.g.

pour $\theta = 0.9$ et $\eta = 1$ et $\alpha = 0.25$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

Enfin, on teste l'influence de η et α à l'aide de deux simulations pour une valeur donnée de θ (ici $\theta = 0.5$) et cinq valeurs de λ (compris entre 0 et 1) (tableaux 3.h et 3.i).

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.9995	7.36×10^{-3}	3.54×10^{-4}	20.812
0.01	0.995	7.36×10^{-3}	3.52×10^{-3}	2.091
0.1	0.95	7.36×10^{-3}	3.362×10^{-2}	0.219
0.25	0.875	7.36×10^{-3}	7.814×10^{-2}	9.425×10^{-2}
1	0.5	7.36×10^{-3}	0.23124	3.184×10^{-2}

Tableau 3.h.
pour $\theta = 0.5$ et $\eta = 0$ et $\alpha = 0.25$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

$\boldsymbol{\lambda}$	$\boldsymbol{\phi}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}$	$\mathbf{n}_{ss}^{o}$	$\mathbf{n}_{ss}^{d}/\mathbf{n}_{ss}^{o}$
0.001	0.9995	1.15×10^{-2}	6.57×10^{-4}	17.581
0.01	0.995	1.15×10^{-2}	6.522×10^{-3}	1.7711
0.1	0.95	1.15×10^{-2}	0.06076	0.1901
0.25	0.875	1.15×10^{-2}	0.13636	8.471×10^{-2}
1	0.5	1.15×10^{-2}	0.3609	3.201×10^{-2}

Tableau 3.i.
pour $\theta = 0.5$ et $\eta = 1$ et $\alpha = 0.5$ (avec $\phi = \frac{g_A - (1-\theta)\lambda l}{g_A}$)

Commentons ces résultats. D'un côté, il existe des valeurs des paramètres pour lesquelles on fait trop de R&D dans l'économie décentralisée par rapport à l'équilibre de l'économie centralisée et cela en l'absence de tout instrument économique. Il s'agit de faible valeur de λ. Soit, plus la duplication des projets de R&D est forte, plus on est poussé à faire plus de R&D à cause de la diminution de la productivité moyenne de la R&D dans l'économie que le phénomène entraîne. Dans le cas de la course aux brevets, les coûts privés qui égalisent les salaires attendus des chercheurs sont supérieurs aux bénéfices sociaux marginaux. D'un autre côté, le rapport n_{ss}^{d}/n_{ss}^{o} augmente avec α et diminue avec θ et η. Pour α, la pouvoir de monopole des firmes intermédiaires croît avec ce paramètre ; et donc le financement des firmes de R&D puisqu'elles s'accaparent les profits des firmes intermédiaires. Le pouvoir de marché d'une firme de bien intermédiaire décroît avec une substituabilité plus grande entre les biens intermédiaires. ici la substituabilité est parfaite, ce qui vient limiter l'effet du pouvoir de marché. On aurait un taux de *mark-up* plus élevé avec une fonction de production de type CES. Pour η,

une augmentation du paramètre d'efficacité vient diminuer le volume de la production finale et les profits ce qui explique la réduction de l'incitation à "investir" en R&D. Globalement, on conclut grâce aux résultats simulés ici qu'une économie peut sur-investir en R&D pour deux raisons principales : d'abord, à cause de la destruction créatrice présente dans le modèle de différenciation verticale qui permet à l'innovateur de s'accaparer tout le flux de rente qui peut être surestimée ; ensuite, à cause de la congestion liée au phénomène de duplication des projets de recherche. Congestion et destruction créatrice augmentent le rendement privé de la R&D et le placent au-dessus du rendement social.

Enfin, on souligne le fait qu'il existe d'autres distorsions qui ne sont pas présentent ici et qui peuvent expliquer au contraire le sous investissement privé en R&D comme l'imitation ou l'imperfection du marché du capital due aux problèmes d'information asy-
métriques.[48]

3.4.2 La dynamique transitionnelle liée à la politique de second rang

Nous étudions maintenant la dynamique transitionnelle d'une économie de laisser-faire qui poursuit, à partir d'une date donnée, une politique internalisatrice de second rang non anticipée par les agents. Pour cela, nous donnons des valeurs aux paramètres conformément aux études déjà menées dans cette thèse et nous calibrons la valeur des instruments de la politique économique. Ces derniers sont estimés par rapport à la politique française actuelle dans le domaine technologique et environnemental.

Calibrage des politiques de la concurrence et l'innovation

Concernant la politique de subvention à l'achat des biens intermédiaires, nous exogénéisons le paramètre τ que nous posons égal à 0.227. Avec un choc de 10 % sur cet instrument, sa valeur s'égalise à $\alpha = 0.25$, soit le tiers de la valeur optimale de

[48] Sur ces deux points, on recommande la lecteur de Tirole (1988).

l'instrument. Pourquoi faire ce choix ? Il n'existe pas d'évaluation empirique de l'instrument théorique. Dans les faits, la politique de lutte contre les monopoles passe au contraire par la législation. Dans l'optique du calibrage, on ne peut donc pas poser à zéro le niveau de l'instrument. Nous considérons que la valeur posée ici est une estimation imparfaite mais utile à l'exercice de simulation de cette section.

La politique de soutien à la R&D est calibrée en fonction des données empiriques pour la France :

Moyenne annuelle de 1993 à 2002	**en millions d'€**	**en % du total**
Financement des dépenses totales de R&D des entreprises	19705.2	100
- par les entreprises	15552.4	78.92
- par l'État	2311.9	11.74
- par l'étranger	1840.9	9.34

Tableau 3.j. : Répartition du financement moyen de la dépense totale de R&D en France pour la période 1993-2002.

Source : calculs personnels d'après le rapport de la CISAD (2005).

On peut en effet considérer que la part du financement par l'État des dépenses totales de recherche et développement des entreprises est une estimation correcte du soutien du centralisateur à la R&D privée. C'est pourquoi, d'après le tableau 3.j, nous réaliserons la simulation avec une valeur de l'instrument de soutien à la R&D qui vaut $\sigma = 0.1174$.

Pour compléter la lecture du tableau précédent, nous ajoutons qu'en 2002, la dépense intérieure de recherche et développement (DIRD), correspondant à l'ensemble des travaux de R&D exécutés sur le territoire national (quelle que soit l'origine de leur financement) s'élève à 34.5 milliards d'euros. La part de la DIRD dans le PIB s'établit à 2.26 %, ratio en progression depuis 1999.[49]

[49] À titre d'exemple, le Japon a un taux de 3,12 %, les États-Unis 2,67 % et l'Allemagne 2,52 %. Sur les six dernières années, la croissance des dépenses de R&D a été plus faible en France que dans ces pays.

Par ailleurs, la recherche réalisée par les entreprises française est relativement concentrée : moins de 5 % des entreprises réalisent 2/3 des dépenses, emploient 60 % des chercheurs et reçoivent 87 % des financements publics destinés à la recherche en entreprise.

Calibration de la politique environnementale

La politique environnementale actuelle de la France reste en retrait du mouvement en faveur de l'usage des instruments économiques d'internalisation des effets externes liés à l'environnement[50]. En France, sur la période 1995-2001, les recettes fiscales liées à l'environnement sont relativement stables d'après l'Institut français de l'environnement (IFEN, ministère de l'écologie et du développement durable) (2003) : elles augmentent de 10 %, pour une croissance du PIB nominal de 24 % et une inflation de 8 %. Pour cette raison, nous choisissons un taux de croissance exogène de la taxe égal à 2 %.

Pour préciser le contenu de ces recettes, force est de constater que la part relative des taxes incitatives dans le montant des prélèvements fiscaux pour l'environnement (43 milliards d'euros en 2001 soit 2.8 % de taux de pression fiscale pour l'environnement contre plus de 45 % au total) est faible. En effet, les montants des redevances (et autres paiements rémunérant des services dans le domaine de l'eau et des déchets) et des taxes portant sur les énergies (Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers) sont très importantes. Au final, seule la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) voit son calcul théoriquement déconnecté des aides versées, mais elle reste marginale (492 millions d'euros en 2001, soit à peine 1 % des recettes fiscales de l'environnement).

Enfin, les comparaisons internationales sont rendues d'autant plus délicates que la pression fiscale en matière environnementale diffère essentiellement au niveau de la taxation de l'énergie[51].

La dynamique transitionnelle simulée

L'ensemble des valeurs des paramètres est :

δ	κ	ρ	l	ε	ϖ	γ	η	α	Θ	ϕ	λ	θ
0.07	1.75	0.04	0.015	2	0.5	2	1	0.25	0.005	0.8125	0.25	0.25

[50] *Cf.* OCDE (2001) qui constate que les politiques de la France en matière de protection environnementale reposent essentiellement sur les instruments traditionnels de régulation.

[51] On trouve une pression fiscale deux fois plus faible aux Etats-Unis d'Amérique (1.5 %), par rapport à la France (2.8 %) ; et un taux de 5 % au Danemark, en 2001.

À la date T, la politique économique est mise en œuvre et consiste à instaurer les niveaux suivants des trois instruments économiques :

$\boldsymbol{\tau}$	$\mathbf{g}_h$	$\boldsymbol{\sigma}$
0.227	0.02	0.1174

Les valeurs données aux paramètres sont bien entendu conformes aux conditions de durabilité mise en évidence au début du chapitre (conditions 3.11, 3.12, 3.13, etc.). La dynamique qui est simulée dans cette section est stable en point-selle. L'annexe D présente les calculs et la démonstration.[52]

Les test de sensibilité sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous :

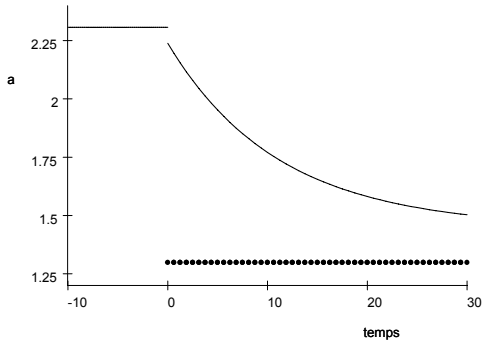
	$\mathbf{g}^d_{C_{ss}}$	$\mathbf{n}^d_{ss}$	$\mathbf{g}^d_{A_{ss}}$	$\mathbf{g}^d_{z_{ss}}$	$\mathbf{g}^d_{S_{ss}}$	$\boldsymbol{\sigma}^o$	$\mathbf{g}^o_h$
Réf.	2.67	1.14	1.5	−0.2 5	0.67	91.85	2.68
$\triangle^+\boldsymbol{\delta}$	0	−0.11	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\eta}$	3.75	−1.87	0	−30	15	0.42	2.94
$\triangle^+\boldsymbol{\Theta}$	0	0	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\rho}$	0	−7.03	0	0	0	−0.71	0
$\triangle^+\boldsymbol{\alpha}$	−0.43	10.11	0	0	−1.72	0.12	−0.79
$\triangle^+\boldsymbol{\gamma}$	−3.41	1.75	0	27.27	4.54	−0.34	2.22
$\triangle^+\boldsymbol{\varepsilon}$	0	−8.64	0	0	0	0.20	1.60
$\triangle^+\boldsymbol{\varpi}$	0	0	0	0	0	−0.009	−0.27
$\triangle^+\boldsymbol{\kappa}$	0	−3.17	0	0	0	0.28	0
$\triangle^+\mathbf{l}$	15	4.80	10	−30	60	0.25	10
$\triangle^+\boldsymbol{\lambda}$	9.37	4.80	10	−30	37.5	0.96	37.35
$\triangle^+\boldsymbol{\theta}$	−3.12	−1.71	−33.33	10	−12.5	−5.90	−2.45
$\triangle^+\phi$	71.69	27.97	76.47	−229.41	286.76	1.25	56.23
$\triangle^+\boldsymbol{\tau}$	0	2.99	0	0	0	0	0
$\triangle^+\boldsymbol{\sigma}$	0	1.33	0	0	0	/	0
$\triangle^+\mathbf{g}_h$	−0.5	2.59	0	40	−50	−0.23	/

Tableau 3.k. Résultats des simulations numériques

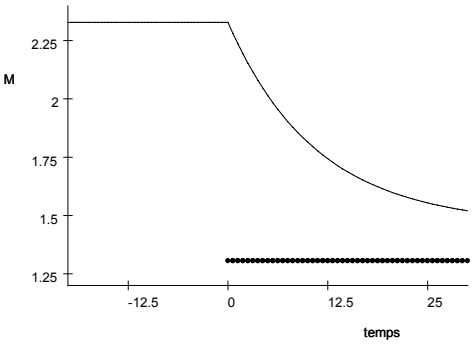
Variations des variables clefs exprimées en pourcentage liées à une hausse de 10 % ($\triangle^+$) des paramètres du modèle. Résultats arrondis au deuxième chiffre après la virgule.

[52] Nous précisons maintenant que deux types de démonstration de la stabilité de l'économie décentralisée ont été réalisés.
D'abord, une démonstration analytique qui se base sur l'hypothèse de Jones (1995 b), à savoir que l'intensité de la recherche peut être considérée comme une constante, c'est-à-dire que cette variable de saut prend directement la valeur stable du long terme.
Ensuite, si cette hypothèse de constance de l'intensité de la recherche est levée, et nous montrons pourquoi elle doit l'être dans le cas de notre modèle, il s'avère alors nécessaire (la matrice jacobienne étant de dimension 4) de simuler le dynamique pour déterminer la stabilité du modèle.
L'annexe D présente la démonstration.

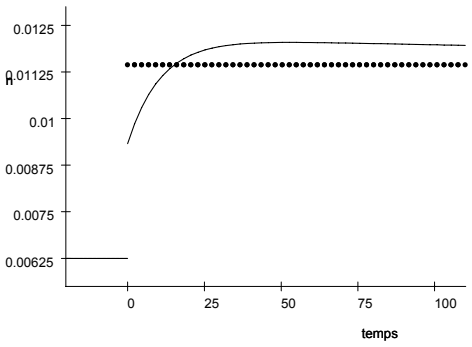
Avant la date T, l'économie est en situation de laisser-faire, c'est-à-dire que tous les instruments sont nuls ($T = 0$ sur les graphiques suivants).



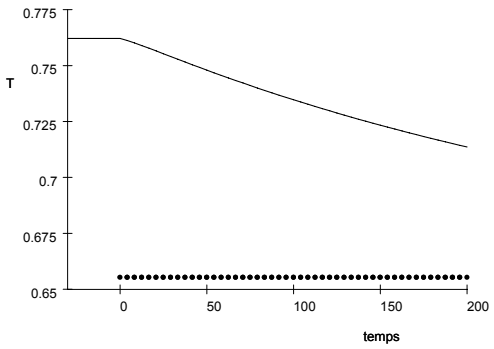
(a) a



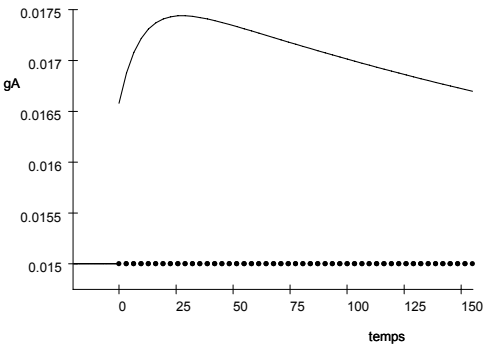
(b) M



(c) n



(d) T

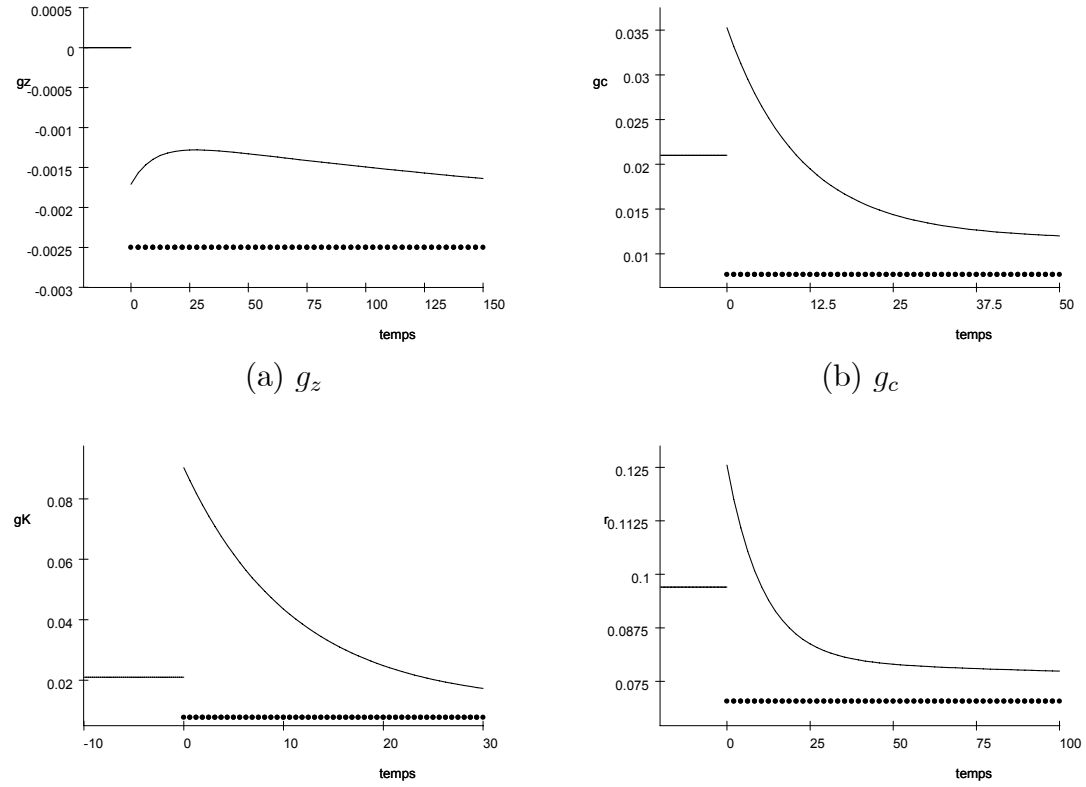


(e) g_A

Graphique 3.d. Dynamique optimale des variables stationnaires avec $\eta = 1$
(a) $a \equiv \frac{C}{K}$, (b) $M \equiv \frac{Y}{K}$, (c) n, (d) $T \equiv \frac{L^{(1-\theta)\lambda}}{A^{1-\phi}}$, (e) g_A
En pointillés : valeurs stationnaires des variables

Les variables de saut de l'économie décentralisée sont les variables a et n. Les variables prédéterminées sont M et T. Sur le graphique 3.d.(e) précédent, la valeur de long terme du taux de croissance de la qualité (g_A) est la même qu'avant le choc de politique économique, soit égale à 0.015 ; et ce malgré la hausse définitive de l'intensité de R&D à long terme (n, graphique 3.d.(c)). Le long de la transition, l'intensité de la recherche augmente d'abord sous l'impulsion des instruments économiques, avant de décroître pour tendre vers sa valeur de long terme qui est supérieure à la valeur initiale. Cette dynamique particulière qui consiste à passer au-dessus de la valeur de long terme, puis à diminuer après la période 50 environ, peut s'expliquer par le fait que les premières innovations sont les plus faciles à découvrir alors que les opportunités technologiques se réduisent à moyen terme. Le paramètre d'externalité de connaissance ($\phi < 1$) est à l'origine de ces effets. Le paramètre de dupplication des projets de recherche λ conduit aussi à stimuler les dépenses en recherche, notamment pendant la première période de la transition, dans la mesure où il faut contre-carrer les pertes dans la productivité des chercheurs.

Les graphiques suivants nous permettent de conclure quant à l'efficacité de cette politique économique de second rang :



(a) g_z (b) g_c

(c) g_K (d) r

Graphique 3.e. Dynamique transitionnelle de second rang
(a) Taux de croissance de l'intensité polluante, (b) Taux de croissance des revenus, (c) Taux de croissance du capital, (d) taux d'intérêt

En pointillés : valeurs stationnaires des variables

La taxation des émissions entraîne la réponse attendue de la part des pollueurs qui révisent donc à la baisse leur intensité polluante. L'effet transitionnel lié à la croissance de l'intensité de la recherche est une augmentation transitionnelle du taux de croissance des innovations qui se répercute sur le taux de croissance de capital. Ce dernier augmente plus vite que le taux de croissance de la consommation.
Une fois les effets transitionnels bénéfiques estompés, les taux de croissance de la consommation et du capital tendent à long terme vers une valeur plus faible qu'initialement (1.17 % contre 2.10 % initialement). Cela tient au fait que le niveau de l'intensité de la recherche ne joue plus sur la croissance de long terme.

De plus, l'insuffisance de la politique environnementale entraîne un taux de crois-

sance du stock de pollution toujours strictement positif ($g^d_{S_{ss}} = 0.67$ %, tableau 3.k) et des niveaux des émissions toujours croissants à long terme.
Ces éléments reflètent le fait que la politique est à un niveau globalement insuffisant. La politique économique calibrée sur données françaises ne permet pas de retourner la tendance naturelle de l'économie de laisser-faire à dégrader la qualité de l'environnement.

Conclusion

La prise en compte de la critique de Jones nous a permis de mettre l'accent sur les externalités de connaissance présentes dans la recherche et développement et leurs effets sur la qualité de l'environnement.
Dans le cadre de la croissance semi-endogène, l'existence d'une croissance économique strictement positive à long terme ne repose pas seulement sur la croissance de la population, mais également sur les paramètres d'externalités dans la R&D. La semi-endogénéité de la croissance diffère, sur ce dernier point, des conclusions traditionnelles de la croissance exogène et permet d'enrichir le débat sur la compréhension des mécanismes de la croissance économique.
De plus, dès lors que l'on intègre l'environnement comme étant un facteur de production supplémentaire, dont le recours engendre des externalités négatives de pollution, nous voyons intervenir dans le taux de croissance optimale de long terme les paramètres de la fonction d'utilité (élasticité intertemporelle de substitution, etc.). Cette influence recouvrée de l'utilité dans le cadre d'une croissance semi-endogène est en soit une nouveauté.
En outre, la comparaison des résultats des approches endogène ou semi-endogène de la croissance durable (chapitre 2 et chapitre 3 respectivement) met l'accent sur l'importance des effets transitionnels des politiques économiques. Par exemple, si la politique de subvention à la recherche n'a plus d'impact sur le taux de croissance de long terme dans ce chapitre, il se pose la question de la durée de ses effets transitoires et des moyens de les allonger. Pour les simulations numériques qui ont été réalisées dans

ce chapitre, l'effet transitoire de la subvention à la recherche sur le taux de croissance des innovations verticales est de plusieurs dizaines d'années (l'accélération du taux de croissance s'étend même sur plus de 25 années). Il s'agit d'un effet transitoire que l'on peut qualifier d'assez long, en comparaison aux objectifs des politiques généralement envisagés dans la réalité. L'opposition entre les effets permanents et les effets transitoires des politiques économiques s'avère donc trompeuse. Mais, au final, quelle est le type de croissance validée à long terme par les données statistiques ?

Concernant la validité de l'approche endogène de la croissance, il n'existe, pour le moment, pas d'indications empiriques justifiant la linéarité par rapport à la connaissance dans l'équation différentielle qui gouverne l'évolution de la technologie. L'étude de Porter et Stern (2000) tente d'estimer directement le paramètre d'externalité intertemporelle de connaissance (ϕ) à partir de données internationales sur les brevets. Les conclusions sont encore une fois ambiguës : la croissance endogène ($\phi = 1$) est validée au niveau mondial mais pas au niveau du pays où la croissance semi-endogène prévaut ($\phi < 1$)...

Après avoir évalué les gains liés au recours aux technologies propres, il s'avère nécessaire d'étudier l'impact sur la croissance et l'environnement d'un lien différent entre la technologie et les émissions polluantes. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le sentier de croissance d'une économie polluante qui doit fournir un effort supplémentaire de recherche et développement spécialisée dans la réduction des intensités polluantes des biens. Il s'agit d'étudier un biais de progrès technique exclusivement en faveur de la réduction des émissions, en plus de l'activité de R&D déjà décrite permettant d'améliorer la productivité des biens. Cette étude est rendue d'autant plus nécessaire que l'intensité polluante en question est généralement considérée comme une variable technologique dont le niveau ne peut pas varier fortement d'une période à une autre. Aussi, le fait de considérer cette variable d'état supplémentaire permet de mettre à jour des problématiques nouvelles. Quelle sera la répartition de l'effort global de recherche et développement entre les deux secteurs de R&D ? Y a-t-il un coût en terme de croissance lié aux dépenses de R&D pour réduire les émissions ? Plus formelle-

ment, comment décrire un système économique caractérisé par des biens différenciés au niveau de leurs productivités, mais aussi au niveau de leur intensité polluante ? Autant de questions auxquelles nous tenterons d'apporter des éclaircissements dans le chapitre suivant.

Annexe C. L'optimum

Équilibre centralisé

L'hamiltonien courant issu du programme (3.10) du planificateur central vaut :

$$\begin{aligned} H &= U(c,S) + \vartheta \dot{K} + \mu \dot{A} - \zeta \dot{S} \\ " &= \frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi} + \vartheta\left[Y - Lc\right] + \mu\left[\delta\left(\frac{n_t L_t}{B_t}\right)^{\lambda} A^{\phi}\right] - \zeta\left[P - \Theta S\right] \end{aligned}$$

Nous obtenons finalement le système d'équations dynamiques composé des conditions du premier ordre :

$$\left\{\begin{array}{l} c_t^{-\varepsilon} = \vartheta_t L_t \\ \vartheta_t = \frac{(\gamma+1)\zeta_t z_t^{\gamma}}{A_t^{\eta}} \\ \mu_t \delta \lambda n_t^{\lambda-1} L_t^{(1-\theta)\lambda} A_t^{\phi} = \vartheta_t \left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)(1-\alpha)\frac{Y_t}{1-n_t} \\ \frac{\dot{\vartheta}_t}{\vartheta_t} = \rho - \left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)\alpha\frac{Y_t}{K_t} \\ \frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = \rho - g_A\left[\lambda\left(\frac{1-n_t}{n_t}\right)\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} + \phi\right] \\ \frac{\dot{\zeta}_t}{\zeta_t} = \rho + \Theta - \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t} \\ z = \left\{\begin{array}{l} 1 \text{ si } \vartheta \geqslant \frac{(\gamma+1)\zeta}{A^{\eta}} \\ \left[\frac{\vartheta A^{\eta}}{(\gamma+1)\zeta}\right]^{\frac{1}{\gamma}} \text{ si } \vartheta < \frac{(\gamma+1)\zeta}{A^{\eta}} \end{array}\right. \\ \vartheta - \frac{(\gamma+1)\zeta z^{\gamma}}{A^{\eta}} \geqslant 0 \text{ si } z < 1 \end{array}\right.$$

La résolution du système précédent permet de déterminer les taux de croissance optimaux de long terme des variables économiques et environnementales de notre modèle.

Existence de la trajectoire optimale de croissance durable

Les conditions, au nombre de trois, sont les suivantes :

- Le taux de croissance d'équilibre doit être positif et, de façon plus générale, toutes les contraintes de signes ou d'encadrement des variables doivent être respectées.

Les conditions énumérées dans la section 3.2 concernent la validité de ces contraintes.

- L'utilité intertemporelle des consommateurs doit être bornée, c'est-à-dire $\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t, S_t) = 0$.

Démonstration :

$$\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t, S_t) = 0 \Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\left[\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right] = 0$$

$$\text{"} \Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g_c^o \cdot t}c_0\right)^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g_S^o \cdot t}S_0\right)^{1+\varpi}}{1+\varpi} = 0$$

La condition suffisante pour satisfaire la contrainte ci-dessus consiste à avoir $g_c^o(1-\varepsilon) < 0$ et $g_S^o(1+\varpi) < 0$ ce qui est vérifié avec les conditions (3.11) et (3.12) (section 3.2).

- Les conditions de transversalité doivent être vérifiées, soient
$$\begin{cases} \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\vartheta_t K_t = 0 \ \textit{(i)} \\ \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\mu_t A_t = 0 \ \textit{(ii)} \\ \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\zeta_t S_t = 0 \ \textit{(iii)} \end{cases}.$$

Démonstration :

Pour *(i)* : $\vartheta_t K_t$ croît au taux de long terme $(1-\varepsilon)g_c^o - l < 0$ donc la condition *(i)* est vérifiée.

Pour *(ii)* : $\mu_t A_t$ croît au taux de long terme $(1-\varepsilon)g_c^o < 0$ donc la condition *(ii)* est vérifiée.

Pour *(iii)* : on doit avoir $-\rho + g_\zeta + g_S < 0$ soit $b_{ss} > N_{ss}$ ce qui équivaut à $\rho > \left(\frac{1-\varepsilon}{1+\varpi}\right)g_c$: *(iii)* est vérifiée pour $\varepsilon > 1$ (condition 3.12).

Dynamique de l'équilibre centralisé

Les six variables composites suivantes sont stationnaires à l'état stable :

$$\left(M_t \equiv \frac{Y_t}{K_t},\, a \equiv \frac{C_t}{K_t},\, b_t \equiv \frac{S_t^{\varpi}}{\zeta_t},\, N_t = \frac{P_t}{S_t},\, n_t,\, T_t \equiv \frac{L_t^{(1-\theta)\lambda}}{A_t^{1-\phi}} \right)$$

Ces variables définissent le système dynamique de l'économie centralisée :

$$\begin{aligned}
g_M &= -\left(1-\alpha\frac{\gamma}{\gamma+1}\right)M + (1-\alpha)\frac{(\lambda-1)(1-n)}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}a + \left[\frac{(\lambda-1)(1-n)-n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{1}{\gamma}b \\
&\quad - \left[\frac{1}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\delta n^{\lambda}T - \left[\frac{(\lambda-1)-\lambda n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{1}{\gamma}\Theta \\
&\quad + \left[\frac{(\lambda-1)-\theta\lambda n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right](1-\alpha)\,l \\
g_a &= -\left(1-\frac{1}{\varepsilon}\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha\right)M + a - \frac{1}{\varepsilon}\rho + \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}l \\
g_b &= b + \varpi N - (\varpi+1)\Theta - \rho \\
g_N &= b - \left(\frac{(\lambda-1)-\lambda n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right)\alpha a + \left[\frac{(\lambda-1)-(\lambda)n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{1}{\gamma}b \\
&\quad - \left[\frac{1}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\delta n^{\lambda}T - N - \left[\frac{(\lambda-1)-\lambda n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right]\frac{1}{\gamma}\Theta \\
&\quad + (1-\alpha)\frac{(\lambda-1)-\theta\lambda n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}l \\
g_n &= \begin{bmatrix} -\alpha a + \frac{1}{\gamma}b + \left(\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\right)\left[1+\frac{\lambda}{1-\alpha}\left(\frac{1-n}{n}\right)\right]\delta n^{\lambda}T \\ -\frac{1}{\gamma}\Theta - ((1-\theta)\lambda-(1-\alpha))\,l \end{bmatrix}\left[\frac{1-n}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n}\right] \\
g_T &= (1-\theta)\lambda l - (1-\phi)\delta n^{\lambda}T
\end{aligned}$$

La matrice Jacobienne de dimension six pour (M, a, b, N, n, T), évaluée à l'état stationnaire, vaut :

$$J^o_{ss} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\gamma\alpha}{\gamma+1}-1\right)M_{ss} & \frac{(1-\alpha)(\lambda-1)(1-n_{ss})M_{ss}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}} & \frac{(\lambda-1)(1-n_{ss})-n_{ss}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}\frac{M_{ss}}{\gamma} & 0 & J_{15} & \frac{-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\frac{M_{ss}}{T_{ss}}g_{Ass}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}} \\ \left(\frac{\alpha\gamma}{\varepsilon(\gamma+1)}-1\right)a_{ss} & a_{ss} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{ss} & \varpi b_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(\lambda n_{ss}-\lambda+1)\alpha N_{ss}}{(\lambda-1)(1-n)-\alpha n_{ss}} & J_{43} & -N_{ss} & J_{45} & \frac{-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\frac{N_{ss}}{T_{ss}}g_{Ass}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}} \\ 0 & \frac{-\alpha n_{ss}(1-n_{ss})}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}} & \frac{(1-n_{ss})\frac{n_{ss}}{\gamma}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}} & 0 & J_{55} & J_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(\phi-1)\lambda T_{ss}g_{A_{ss}}}{n_{ss}} & (\phi-1)\,g_{A_{ss}} \end{pmatrix}$$

avec :

$$J_{15} = \frac{\left(1-\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha\right)(\lambda-1+\alpha)M_{ss}-(1-\alpha)(\lambda-1)a_{ss}-\frac{\lambda}{\gamma}b_{ss}-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\lambda\frac{gA}{n_{ss}}+\frac{\lambda}{\gamma}\Theta-\theta\lambda(1-\alpha)l}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}M_{ss}$$

$$J_{43} = \left(\gamma+\frac{\lambda-1-\lambda n_{ss}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}\right)\frac{N_{ss}}{\gamma}$$

$$J_{45} = \frac{\left[\alpha a_{ss}-\frac{b_{ss}}{\gamma}-(b_{ss}-N_{ss})(\lambda-1+\alpha)-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\frac{\lambda g_{Ass}}{n_{ss}}+\frac{\Theta}{\gamma}-(1-\alpha)\theta\lambda l\right]N_{ss}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}$$

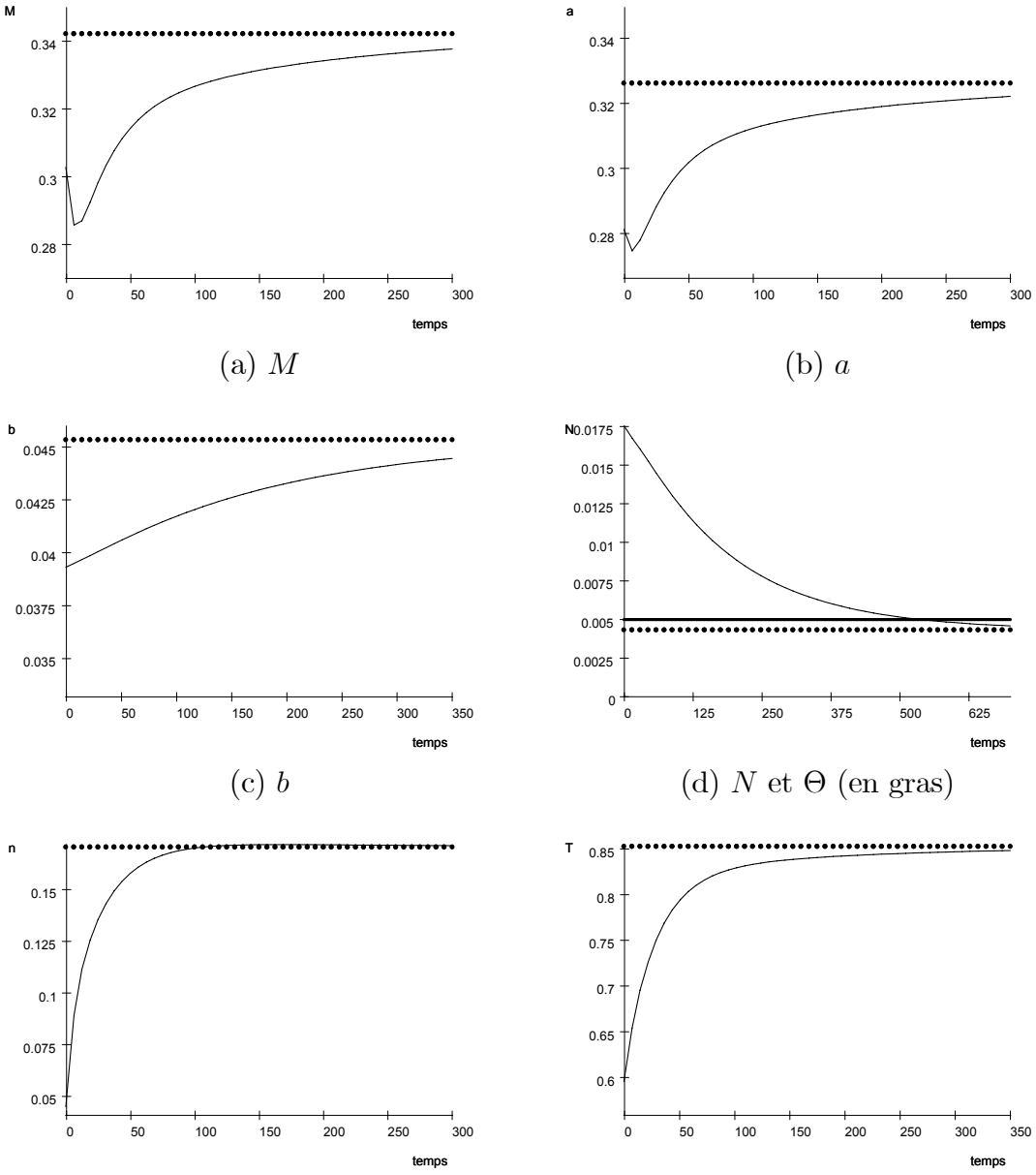
$$J_{55} = \frac{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\left(1-\frac{\lambda}{1-\alpha}\right)\frac{g_{Ass}}{n_{ss}}(1-n_{ss})n_{ss}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}$$

$$J_{56} = \frac{\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\left(1+\frac{\lambda}{1-\alpha}\left(\frac{1-n_{ss}}{n_{ss}}\right)\right)\frac{(1-n)n_{ss}g_{A}{}^{ss}}{T_{ss}}}{(\lambda-1)(1-n_{ss})-\alpha n_{ss}}$$

Les variables à l'état stable notées (M^o_{ss}, a^o_{ss}, N^o_{ss}, n^o_{ss}, b^o_{ss}, T^o_{ss}) valent :

$M^o_{ss} = \frac{g^o_c+\frac{\rho+l}{\varepsilon}}{\frac{\alpha}{\varepsilon}\frac{\gamma}{\gamma+1}}$, $a^o_{ss} = M^o_{ss}-g^o_c-l$, $b^o_{ss} = \rho+\Theta-\varpi\frac{1-\varepsilon}{1+\varpi}g^o_c$, $T^o_{ss} = \frac{I}{\delta(n^o)^\lambda}$, $N^o_{ss} = \frac{1-\varepsilon}{1+\varpi}g^o_c+\Theta$

La simulation numérique, réalisée à l'aide des valeurs des paramètres présentées dans la section 3.2, donne les dynamiques suivantes :



(a) M (b) a

(c) b (d) N et Θ (en gras)

(e) n (f) T

Graphique 3.f. Dynamique optimale des variables composites stationnaires (a) M_t, (b) a_t, (c) b_t, (d) N_t, (e) n_t, (f) T_t.

En pointillés : valeurs stationnaires des variables (N.B. : pour le graphique de N, on a ajouté $\Theta = 0.005$)

Ces variables composites convergent toutes vers leurs niveaux constants de long terme. Les conditions initiales nécessaires pour atteindre la dynamique en point-selle sont : $n_0 = 0.05$, $M_0 = 0.3$, $a_0 = 0.28$, $b_0 = 3.932 \times 10^{-2}$, $N_0 = 1.751\,4 \times 10^{-2}$, $T_0 = 0.60012$.

Le déterminant de la jacobienne ainsi évaluée est négatif et on trouve trois valeurs propres négatives qui sont associées aux trois variables prédéterminées : b, N, T. D'après les conditions de Blanchard et Khan, l'équilibre stationnaire du système formé par les équations dynamiques des variables composites est donc un point-selle.

Annexe D. L'économie décentralisée

Nous démontrons la stabilité de l'économie décentralisée à l'aide des deux méthodes suivantes. D'abord, une démonstration analytique grâce aux hypothèses de Jones (1995 b) qui consistent à rendre l'intensité de la recherche (n) constante le long du sentier de croissance équilibrée. Parce que nous jugeons cela trop restrictif dans le cadre d'un modèle de croissance avec environnement, nous menons, ensuite, la démonstration de façon numérique avec l'ensemble des variables endogènes du modèle (dont n).

Dynamique transitionnelle "restreinte" à la Jones

À la manière de Jones (1995 b), on considère la part du travail allouée à la R&D (n) constant le long de la transition. Jones fait cette hypothèse dans l'objectif de réaliser ensuite des chocs exogènes sur n, sachant que la dynamique transitionnelle sur n consiste à sauter instantanément sur la valeur de long terme de n.

Dans ce cas le système dynamique de l'économie de croissance semi-endogène avec environnement s'écrit :

$$\left\{\begin{array}{c} g_a = \left(\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right)M + a - \frac{\rho+(1-\varepsilon)l}{\varepsilon} \\ g_M = -(1-\alpha)M + (1-\alpha)a + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\delta n^{\lambda}T - \frac{1}{\gamma}gh + (1-\alpha)\mathbf{1} \\ g_T = (1-\theta)\lambda l - (1-\phi)\delta n^{\lambda}T \end{array}\right.$$

Avec les valeur des variables à l'état stable suivantes :

$$\left\{\begin{array}{c} a_{ss} = \frac{\frac{\rho+(1-\varepsilon)l}{\varepsilon} + \left[\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right]\left[-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\frac{(1-\theta)\lambda l}{(1-\phi)} + \frac{1}{\gamma(1-\alpha)}gh - \mathbf{1}\right]}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}} \\ M_{ss} = \frac{(1-\alpha)\frac{\rho+(1-\varepsilon)l}{\varepsilon} + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\frac{(1-\theta)\lambda l}{(1-\phi)} - \frac{1}{\gamma}gh + (1-\alpha)\mathbf{1}}{(1-\alpha)\left[\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}\right]} \\ T_{ss} = \frac{(1-\theta)\lambda l}{(1-\phi)\delta n_t^{\lambda}} \end{array}\right.$$

La matrice jacobienne du système dynamique, évaluée à l'état stationnaire, est :

$$J_{ss}^{d} = \begin{pmatrix} a_{ss} & \left(\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right)a_{ss} & 0 \\ (1-\alpha)M_{ss} & -(1-\alpha)M_{ss} & \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\delta n_{ss}^{\lambda}M_{ss} \\ 0 & 0 & -(1-\theta)\lambda l \end{pmatrix}$$

Enfin, nous calculons les éléments suivants :

$$\begin{aligned}
\det\left(J_{ss}^{d}\right) &= (1-\theta)\,\lambda l a_{ss}\,(1-\alpha)\,M_{ss}\frac{\alpha^{2}}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon} > 0 \\
Tr\left(J_{ss}^{d}\right) &> 0 \\
B(J_{ss}^{d}) &= \underbrace{-(1-\alpha)\,M_{ss}a_{ss}\frac{\alpha^{2}}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}}_{<0} + (1-\theta)\,\lambda l\left[\underbrace{(1-\alpha)\,M_{ss}-a_{ss}}_{<0}\right] < 0
\end{aligned}$$

avec :

$$(1-\alpha)\,M_{ss}-a_{ss} = \frac{-\frac{1}{1-\alpha}\left[\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right]\left[-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\frac{(1-\theta)\lambda l}{(1-\phi)}+\frac{1}{\gamma}g_{h}-(1-\alpha)l\right]-\left[\frac{\rho+(1-\varepsilon)l}{\varepsilon}\right]}{\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}} = -\alpha a_{SS} < 0$$

$$\text{et } B(J_{ss}^{d}) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Le déterminant $\det\left(J_{ss}^{d}\right)$ est positif ce qui signifie (le déterminant étant le produit des valeurs propres) que l'on a soit deux valeurs propres réelles négatives, soit une valeur propre négative. Dans le dernier cas (trois valeurs propres négatives) le modèle est instable.

D'après Tahvonen et Kuuluvainen (1993), si $B(J) < 0$ (B est la somme des produits croisés des valeurs propres), alors on a deux valeurs propres réelles négatives. Ici $B(J_{ss}^{d}) < 0$ et nous avons effectivement deux variables prédéterminées : T et M. Le modèle est donc stable en point-selle.

La démonstration analytique de la stabilité à la manière de Jones (1995 b) est jugée insatisfaisante pour le modèle de croissance avec environnement. Effectivement, la dynamique de l'intensité de la recherche (qui peut sauter initialement) ne consiste finalement pas à atteindre directement la valeur de long terme parce que l'évolution de du capital naturel ajoute "de la dynamique" à la demande des autres facteurs. Ainsi, la demande du facteur travail évolue au cours du temps en fonction, notamment, du niveau de l'intensité polluante.

Dynamique transitionnelle "complète"

Les dynamiques transitionnelles présentées dans la section 3.4 sont démontrées ici.

Les valeurs des variables de l'état stable sont :

$$\begin{cases} Z^d_{ss} = \frac{\left(\varepsilon\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}+\phi-1+\frac{1}{\kappa}\right)g_A - g^d_C - \frac{\varepsilon}{\gamma(1-\alpha)}gh + (\varepsilon+1+\lambda(1-\theta))l+\rho}{\delta\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}g_A} = \frac{1-n_{ss}}{n_{ss}} \\ \frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}M_{ss} = \varepsilon\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}gA - \frac{\varepsilon}{\gamma(1-\alpha)}gh + (\varepsilon+1)\,l + \rho \\ a_{ss} = \left(\frac{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}-\varepsilon}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}}\right)\left(\frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} - \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}g_A\right) + \left[\frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}-\varepsilon}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}}\right)\left(\frac{\varepsilon+1}{\varepsilon}\right)\right]l + \frac{\rho}{\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}} \\ T_{ss} = \frac{(1-\theta)\lambda l}{(1-\phi)}\frac{1}{\delta n^\lambda_{ss}} = \frac{(1-\theta)\lambda l}{\delta(1-\phi)}\left(Z^d+1\right)^\lambda \\ N_{ss} = -\left(\gamma+1+\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\frac{1}{\gamma}gh + \left(1+\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}gA + l + \Theta \end{cases}$$

Les équations dynamiques du modèle sont :

$$\begin{aligned} g_M &= \begin{bmatrix} (1-\lambda)(1-n)\,a - \left[(1-\lambda)(1-n) + \frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha n\right]M \\ + \begin{bmatrix} \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)}\left[(1-\lambda)(1-n)+n\right] \\ -\left(\phi-1+\frac{1}{\kappa}-\delta\frac{\alpha\frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)}\frac{1-n_t}{n_t}\right)n \end{bmatrix}\delta n^\lambda_t T_t \\ +\left[(1-\lambda)(1-n) - (\lambda(1-\theta)-1)\,n\right]l - \frac{(1-\lambda)(1-n)+n}{\gamma(1-\alpha)}g_h \end{bmatrix}\frac{(1-\alpha)}{(1-\lambda)(1-n)+\alpha n} \\ g_n &= \begin{bmatrix} \left(\phi-1+\frac{1}{\kappa}-\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}-\delta\frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)\frac{1-n_t}{n_t}}{(1-\sigma)(1-\tau)}\right)\delta n^\lambda T \\ +\left(\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}-1\right)\alpha M + \alpha a + \frac{1}{\gamma}g_h \\ +\left[\lambda(1-\theta)-(1-\alpha)\right]l \end{bmatrix}\frac{1-n}{(1-\lambda)(1-n)+\alpha n} \\ g_a &= \left(\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right)M + a - \frac{\rho+(1-\varepsilon)\,l}{\varepsilon} \\ g_T &= (1-\theta)\,\lambda l - (1-\phi)\,\delta n^\lambda T \end{aligned} \tag{3.21}$$

On remarque que N est extérieur au cœur du modèle (comme pour la dynamique de l'économie décentralisée du chapitre précédent) :

$$g_N = \alpha M - \alpha a - N + \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma}\delta n^\lambda_t T_t + (1-\alpha)\,g_{1-n} + \Theta - \frac{\gamma+1}{\gamma}g_h + (1-\alpha)\,l$$

La matrice jacobienne évaluée à l'état stationnaire vaut :

$$J^d_{ss} = \begin{pmatrix} a_{ss} & \left(\frac{\alpha^2}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{1}{\varepsilon}-1\right)a_{ss} & 0 & 0 \\ \frac{(1-\lambda)(1-\alpha)(1-n_{ss})M_{ss}}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_{ss}} & \frac{\left((1-\lambda)(1-n_{ss})+\frac{\alpha}{1-\tau}\frac{\gamma}{\gamma+1}\alpha n_{ss}\right)(1-\alpha)M_{ss}}{(1-\alpha-\lambda)n_{ss}-(1-\lambda)} & a_{13} & a_{14} \\ \frac{\alpha(1-n_{ss})n_{ss}}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_{ss}} & \frac{\alpha(1-n_{ss})\left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\frac{\alpha}{1-\tau}-1\right)n_{ss}}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_t} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & (\theta-1)\,\lambda^2 l\frac{T_{ss}}{n_{ss}} & (\theta-1)\,\lambda l \end{pmatrix}$$

avec :

$$a_{13} = \left[\begin{array}{c} \left[\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} \left((1-\lambda)(1-n_{ss}) + n_{ss} \right) - \left(\phi - 1 + \frac{1}{\kappa} - \frac{\delta\alpha \frac{1+\kappa}{\kappa} \frac{1-n_{ss}}{n_{ss}}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \right) n_{ss} \right] \frac{\lambda g_A}{n_{ss}} \\ - \left(\frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \alpha - (1-\lambda) \right) M_{ss} - (1-\lambda) a_{ss} - \frac{\lambda g_h}{\gamma(1-\alpha)} + \lambda\theta l \\ + \left(\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} \lambda - \left(\phi - 1 + \frac{1}{\kappa} + \delta \frac{\alpha \frac{1+\kappa}{\kappa}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \right) \right) g_A \end{array} \right] \frac{(1-n_{ss})M_{ss}}{(1-\lambda)(1-n_{ss})+\alpha n_{ss}}$$

$$a_{14} = \left(\frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma(1-\alpha)} \left((1-\lambda)(1-n_{ss}) + n_{ss} \right) - \left(\phi - 1 + \frac{1}{\kappa} - \delta \frac{\alpha \frac{1+\kappa}{\kappa} \frac{1-n_{ss}}{n_{ss}}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \right) n_{ss} \right) \frac{(1-\alpha)M_{ss} \frac{g_A}{T_{ss}}}{(1-\lambda)(1-n_{ss})+\alpha n_{ss}}$$

$$a_{33} = \left[(\phi - 1) + \frac{1}{\kappa} - \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma} - \delta \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)}{(1-\sigma)(1-\tau)} \frac{\frac{\lambda-1}{\lambda}}{n_{ss}} + \delta \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)}{(1-\sigma)(1-\tau)} \right] \frac{\lambda g_A (1-n_{ss})}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_{ss}}$$

$$a_{34} = \left[\left(\phi - 1 + \frac{1}{\kappa} - \frac{\gamma(1-\alpha)+\eta}{\gamma} - \delta \frac{\alpha\left(\frac{1+\kappa}{\kappa}\right)\frac{1-n_{ss}}{n_{ss}}}{(1-\sigma)(1-\tau)} \right) \right] \frac{(1-n_{ss}) n_{ss} \frac{g_{A_{ss}}}{T_{ss}}}{(1-\lambda)(1-n_{ss})+\alpha n_{ss}}$$

Pour démonter la stabilité de la solution stationnaire de l'économie décentralisée, nous utilisons le théorème de Tahvonen (1991). L'équilibre est un point-selle si, et seulement si, $det\,(J) > 0$ et $\Omega\,(J) = \left| \begin{array}{cc} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} a_{22} & a_{24} \\ a_{42} & a_{44} \end{array} \right| + 2 \left| \begin{array}{cc} a_{12} & a_{14} \\ a_{32} & a_{34} \end{array} \right| < 0$. De plus, si $\Omega\,(J)^2 - 4 \det J \geqslant 0$, alors les valeurs propres sont réelles.

Analytiquement, nous avons pu calculer les relations suivantes :

$$\det(J^d_{ss}) = \frac{(1-\theta)\lambda l a_{ss}}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_{ss}} \left[\begin{array}{l} -\frac{\lambda T_{ss}}{n_{ss}} \left[\begin{array}{c} \left(\frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \alpha n_{ss} + \frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\alpha}{\varepsilon} (1-\lambda)(1-n_{ss}) \right) (1-\alpha) M_{ss} a_{34} \\ + \left(\frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\alpha+\varepsilon}{\varepsilon} - 2 \right) \alpha (1-n_{ss}) n_{ss} a_{14} \end{array} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} \left(\frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \alpha n_{ss} + \frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\alpha}{\varepsilon} (1-\lambda)(1-n_{ss}) \right) (1-\alpha) M_{ss} a_{33} \\ + \left(\frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{\alpha+\varepsilon}{\varepsilon} - 2 \right) \alpha (1-n_{ss}) n_{ss} a_{13} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

et :

$$\Omega\left(J^d_{ss}\right) = a_{ss} \left[a_{33} + 2 \left(\frac{\alpha^2}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) a_{34} \right] + \frac{\left[(1-\lambda)(1-n_{ss}) + \frac{\alpha}{1-\tau} \frac{\gamma}{\gamma+1} \alpha n_{ss} \right] (1-\theta)(1-\alpha)\lambda l M_{ss}}{(1-\lambda)-(1-\alpha-\lambda)n_{ss}}$$

Mais nous ne sommes pas en mesure de déterminer analytiquement le signe du déterminant. Pour les valeurs des paramètres retenus dans la section 3.4, nous avons calculé un déterminant positif (valant 7.1022×10^{-6}). La somme des mineurs principaux d'ordre 2 et 3 de J^d_{ss} (*i.e.* Ω) est négative ($\Omega\left(J^d_{ss}\right) = -3.2349 \times 10^{-2}$). Enfin $\Omega\,(J)^2 - 4 \det J$ est positif (1.0394×10^{-3}) nous assurant que les valeurs propres sont biens réelles. Effectivement, nous avons calculé deux valeurs propres réelles négatives qu'on associe aux deux variables prédéterminées de l'économie décentralisée.

Références bibliograhiques

[1] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[2] **Aghion, P. & P. Howitt** (1998) *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press.

[3] **Aghion, P. & P. Howitt** (2004) "Growth with Quality-Improving Innovations: An Integrated Framework", document de travail Septembre.

[4] **Aghion, P. & P. Howitt** (2005) "Appropriate Growth Policy: A Unifying Framework", Août.

[5] **Christiaans, T.** (2004) "Types of balanced growth", *Economics Letter* **82**, 253-258.

[6] **CISAD** (2005) "Recherche & Développement en France Résultats 2002, estimations 2003, Objectifs socio-économiques du BCRD 2004", dossier (162) Mars.

[7] **Cohen, W. & D. Levinthal** (1989) "Innovation and Learning: the two faces of R&D", *Economic Journal* **99**, 569-596.

[8] **Comin, D.** (2004) "R&D: A Small Contribution to Productivity Growth", *Journal of Economic Growth* **9** (4) Décembre, 391-421.

[9] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1998) "Schumpeterian Growth without Scale Effects", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 313-335.

[10] **Eicher, T. S. & S. J. Turnovsky** (1999) "Non-scale model of economic growth", *Economic Journal* **109**, 394-415.

[11] **Evenson, R.** (1984) "International Invention: Implications for Technology Market Analysis", dans *R&D, Patents, and Productivity* Griliches Z. éds. University of Chicago Press, 89-123.

[12] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 a) "Quality Leaders in the Theory of Growth", *Review of Economic Studies* **58** (1), 43-61.

[13] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 b) *Innovation and Growth in the Global Economy*, The MIT Press Cambridge, MA.

[14] **Howitt, P.** (1997) "Capital Accumulation and Innovations in the Endogeneous Growth Confronting the Facts", document de travail *Ohio State Univerity*.

[15] **IFEN** (2003) "L'évolution des taxes et redevances liées à l'environnement depuis 1995", dans *Les données de l'environnement*.

[16] **Jones, C. I.** (1995 a) "Time Series Tests of Endogenous Growth Models", *Quarterly Journal of Economics* **110** (2) Mai, 495-525.

[17] **Jones, C. I.** (1995 b) "R&D-Based Models of Economic Growth", *Journal of Political Economy* **103** (4) Août, 759-784.

[18] **Jones, C. I.** (1999) "Growth: With or Without Scale Effects?", *American Economic Association* Papers and Proceedings Mai, 139-144.

[19] **Jones, C. I.** (2000) *Théorie de la croissance endogène*, de Boeck Université.

[20] **Jones, C. I.** (2002) "Sources of U.S. Economic Growth in a World of Ideas", *American Economic Review* **92** (1) Mars, 220-239.

[21] **van de Klundert, T. & S. Smulders** (1997) "Growth, Competition and Welfare", *Scandinavian Journal of Economics* **99**, 99-118.

[22] **Kortum, S.** (1993) "Equilibrium R&D and the Patent-R&D Ratio: U.S. Evidence", *American Economic Review* Papers and Proceedings **83** (2), 450-457.

[23] **Kortum, S.** (1997) "Research, Patenting and Technological Change", *Econometrica* **65** (6) Novembre, 1389-1419.

[24] **OCDE** (2001) "Comment encourager une croissance écologiquement durable en France", document de travail *Département des affaires économique 314* (ECO/ WKP40).

[25] **Peretto, P. M.** (1998) "Technological Change and Population Growth", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 283-311.

[26] **Peretto, P. M. & S. Smulders** (2002) "Technological Distance, Growth and Scale Effects", *Economic Journal* Juillet **112**, 603-624

[27] **Porter, M. E. & S. Stern** (2000) "Measuring the "Ideas", Production Functions: Evidence from International Patent Output", *NBER Working Papers* (7891).

[28] **Rivera-Batiz, A. L. & P. M. Romer** (1992) "International Trade with Endogenous Technological Change", *NBER Working Papers* (3594).

[29] **Romer, P. M.** (1990) "Endogenous Technical Change", *Journal of Political Economy* **98** (5) Octobre part II, 71-102.

[30] **Segerstrom, P.** (2000) "The Long-Run Growth Effects of R&D Subsidies", *Journal of Economic Growth* **5** Septembre, 277-305.

[31] **Segerstrom, P.** (1998) "Endogenous Growth Without Scale Effects", *American Economic Review* **88** (5) Décembre, 1290-1310.

[32] **Stockey, N.** (1998) "Are There Limits To Growth?", *International Economic Review* **39** (1), 1-31.

[33] **Tahvonen, O.** (1991) "On the dynamics of renewable resource harvesting and pollution control", *Environmental and Resource Economics* **1**, 91-117.

[34] **Tahvonen, O. & J. Kuuluvainen** (1993) "Economic Growth, Pollution, and Renewable Resources", *Journal of Environmental Economics and Management* **24** (2), 101-118.

[35] **Tirole, J.** (1988) *Theory of Industrial Organisation*, Cambridge MIT Press.

[36] **Young, A.** (1998) "Growth without Scale Effects", *Journal of Political Economy* **106** (1), 41-63.

Chapitre 4
Croissance durable et double échelle de différenciation verticale des biens intermédiaires

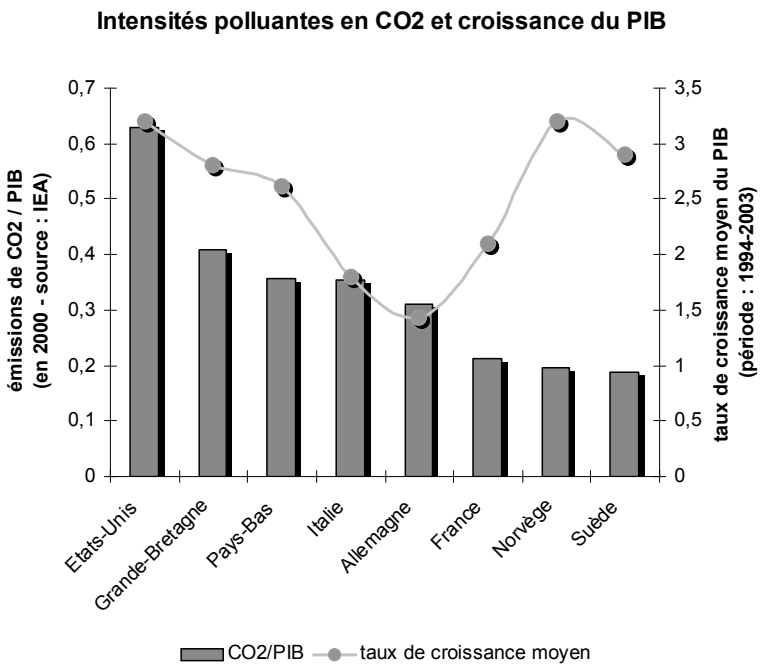
Introduction

Nous avons conclu l'étude de la littérature sur la croissance endogène appliquée à l'environnement (chapitre 1) par la proposition selon laquelle l'accumulation des connaissances permettait d'atteindre un sentier de croissance soutenable au sens fort (croissance du produit et décroissance du stock de pollution) grâce à la substitution, au cours du processus productif, du capital naturel par la qualité des biens (le facteur immatériel et accumulable). Cette description des liens entre les sphères environnementale et technologique est jugée quelque peu réductrice dans la mesure où elle ignore les effets directs de l'activité de R&D sur la réduction des émissions à la source : on pense aux technologies propres qui ont fait l'objet des chapitres 2 et 3.

L'objet du dernier chapitre est d'étudier le sentier de croissance durable d'une économie confrontée à l'arbitrage technologique entre deux types d'innovations : d'une part, les qualités des biens intermédiaires qui reflètent leurs niveaux de productivité et, d'autre part, les intensités polluantes des mêmes biens intermédiaires qui résument les avancées techniques dans le domaine de la protection de l'environnement. Le graphique 4.a (voir ci-dessous) est une illustration de ce phénomène. Pour un taux de croissance du revenu élevé, deux cas polaires au niveau de l'intensité polluante coexistent : États-Unis d'Amérique et Suède. Techniquement, cela illustre le fait qu'il existe des différences fortes dans l'impact des technologies sur la qualité de l'environnement, alors que les modes de vie, mesurés par la richesse, sont relativement proches. Ces faits peuvent justifier l'endogénéisation de l'intensité polluante sur la base d'une activité délibérée de recherche et développement.

Dans cette optique, les dépenses traditionnelles de dépollution n'ont plus lieu d'être. Toutes choses égales par ailleurs, la nouvelle dépense en R&D vient diminuer l'effort en recherche portant sur l'amélioration des qualités standards des mêmes biens intermédiaires (leurs productivités). Connaissant les liens forts qui unissent la productivité et le taux de croissance de long terme, on pourrait donc s'attendre à un coût en terme de croissance économique : or, les faits décrits à l'instant (*cf.* graphique 4.a) laissent penser le contraire.

Graphique 4.a.



Source : calculs personnels d'après les données de l'International Energy Agency disponibles sur http://www.iea.org/Textbase/stats/

Les travaux théoriques récents se concentrent sur les conséquences de l'orientation du progrès technique induit sur la croissance des économies polluantes en s'appuyant sur l'étude de secteurs de R&D distincts (Saint-Paul 2002 et Eriksson 2004) ou identiques (Ricci 2002 et Hart 2004). Dans le premier cas, le progrès technique s'appuie sur deux dimensions distinctes d'innovations : l'une relative à l'efficacité du travail par exemple et l'autre spécialisée dans l'efficacité de l'énergie. Les deux activités de recherche

concernent deux facteurs différents (travail et énergie) dont l'effort relatif de recherche dans les deux secteurs de R&D peut être modifié en faveur de l'énergie à l'aide d'une taxe croissante sur ce facteur. Nous précisons qu'Eriksson (2004) qui se base sur Acemoglu (2002) (2003) décrit un système économique dans lequel les activités de R&D ont une croissance semi-endogène à long terme[53]. Dans le deuxième cas, pour Ricci (2002) et Hart (2004), le progrès technique a pour effet de fournir des biens plus productifs mais, aussi, moins polluants. Cette dernière caractéristique est, d'après les auteurs, de nature technologique ce qui les conduit à décrire les mécanismes de recherche endogène permettant d'orienter les dépenses en faveur d'une réduction de l'intensité polluante des biens simultanée à l'accroissement de sa productivité. Cette deuxième approche revient en fait à endogénéiser les technologies propres étudiées dans le chapitre 2 de la thèse sur la base des nouvelles théories de la croissance. L'effet cumulatif des innovations (plus productives mais aussi moins polluantes) oriente les demandes inter-sectorielles en faveur des technologies les plus récentes dans le cas où un instrument incitatif (une taxe pigouvienne sur les émissions polluantes) rend profitable l'incorporation des intensités polluantes plus faibles : le remplacement des anciennes techniques trop polluantes est ainsi accéléré et peut entraîner à la hausse le taux de croissance économique conformément à l'analyse de Porter et van der Linde (1995). Notre contribution à la littérature consiste, au contraire, à endogénéiser la réduction des intensités polluantes à l'aide d'une activité délibérée de R&D, mais distincte de l'activité standard permettant d'améliorer la productivité des biens.

En effet, l'existence de deux types d'innovations distinctes pour un même bien entraîne des problématiques riches et nouvelles. D'abord, la question du partage de la valeur créée par l'incorporation des innovations dans le processus productif est centrale : quelle part du profit revient-il au monopole ayant innové dans l'intensité polluante ? Peut-on jouer sur le partage de la rente pour favoriser un développement durable ? Ensuite, le fait d'inciter au développement des innovations environnementales entraîne des demandes hétérogènes pour les biens, c'est-à-dire favorisant les biens les moins

[53] On trouve également l'idée de semi-endogénéité dans Smulders (2004) qui l'applique aussi à l'énergie, donc sous la forme d'une ressource non-renouvelable.

polluants. Comment étudier les impacts agrégés dans le cadre de demandes micro-économiques hétérogènes ? Nous proposons donc une résolution analytique au problème de croissance d'une économie décentralisée et polluante, dont l'amélioration continue du progrès technique global (estimé via l'indice de la qualité agrégée) est fondée sur deux secteurs endogènes de recherche et développement, pour deux échelles de différenciation verticale simultanées caractérisant un bien. Grossman et Helpman (1991) sont à l'origine des mécanismes de l'échelle de différenciation verticale sur lesquels nous nous basons. Nous aboutissons à deux résultats principaux.

Les conditions de non-arbitrage imposent que l'économie fasse plus de recherche dans la qualité standard que dans l'intensité polluante. Cela tient au fait que le mécanisme de destruction créatrice au niveau des firmes intermédiaires consiste au remplacement des firmes par un nouveau producteur qui incorpore les qualités standards de dernière génération, alors que les intensités polluantes plus faibles sont incorporées par les firmes déjà existantes. Autrement dit, si on raisonne en terme de secteur industriel (une industrie étant le producteur d'un bien intermédiaire différencié qui est en situation de monopole), alors les industries leaders investissent en R&D pour réduire l'intensité polluante de leurs propres produits alors que les petites entreprises investissent en R&D pour améliorer la qualité standard et devenir, en cas de succès, des industries leaders à leur tour. Dans notre modèle, il n'est pas rentable d'améliorer la qualité standard pour l'industrie leader, par contre, grâce à la taxe sur les émissions polluantes, la réduction de l'intensité polluante permet d'augmenter son profit relativement aux autres industries concurrentes qui sont, elles, caractérisées par des intensités polluantes plus élevées.

Enfin, L'agrégation des fonctions qui est rendue nécessaire pour mener à bien l'analyse macro-économique impose la détermination de variables de Poisson adéquates (*i.e.*, dans les chapitres précédents, les "paramètres" déterminant la fréquence des innovations), laissant ainsi apparaître l'existence d'externalités entre les deux secteurs de R&D. Autrement dit, l'existence d'un état stable de croissance régulière à long terme repose sur la restriction portant sur la présence d'effets de *fishing out* (Jones

1995) qui prennent la forme précise d'externalités négatives de connaissance entre les deux secteurs de recherche, avec un effet plus fort dans le secteur de la recherche sur l'intensité polluante. Ces externalités entre les deux familles d'innovations contraignent l'économie à croître de façon semi-endogène à long terme. La prise en compte de ces externalités négatives de connaissance entre les industries trouve une forme de justification dans les études de Griliches (1992) (1995) sur les *spillovers* inter-industriels, dans la mesure où il s'agit, dans ce chapitre, d'externalités qu'on peut qualifier (à la manière de Griliches) de non-pécuniaires, c'est-à-dire liées à des échanges immatériels et indépendants du système de prix du marché. En outre, nos résultats sont corroborés par les travaux théoriques de Li (2000) (2001) (2002) qui portent sur le lien entre l'existence des externalités de connaissance inter-sectorielles et la détermination d'une croissance de type semi-endogène.[54]

Le plan du chapitre suit, en premier lieu, la description des comportements des agents. C'est pourquoi il est formé des parties suivantes : les consommateurs subissant la pollution qui s'accumule dans l'écosystème (section 4.1) ; le secteur final qui produit un bien homogène grâce à une firme représentative (section 4.2) ; le secteur des biens intermédiaires composé d'une multitude de biens intermédiaires hétérogènes en qualités et en intensités polluantes (section 4.3) ; le secteur des innovations dont les firmes sont spécialisées dans l'amélioration d'un type précis de technologie (qualité ou intensité polluante) pour un bien intermédiaire donné (section 4.4) ; le gouvernement et la question de l'équilibre général de l'économie (section 4.5). Ensuite, la section 4.5 présente la dynamique de l'économie décentralisée que l'on pourra comparer à l'optimum déterminé à la section suivante (section 4.6). Enfin, et avant de conclure, une discussion est menée concernant la politique économique optimale permettant un développement durable (section 4.7).

---

[54] Pour Li (2001), les activités de R&D sont spécialisées dans la qualité et la variété des biens. Il ne s'agit pas d'un modèle de croissance avec environnement : les biens n'ont pas un caractère polluant. Li (2001) démontre que l'hypothèse de *spillovers* entre secteurs conduit toujours à l'apparition d'une croissance semi-endogène à long terme.

4.1 Les consommateurs face à la pollution

Pour avoir recours à la ressource naturelle renouvelable comme facteur de production, le secteur des biens intermédiaires est à l'origine des émissions polluantes. Avant d'étudier le programme de maximisation d'une entreprise j du secteur des biens intermédiaires, nous décrivons les interactions entre la qualité de l'environnement (ou le stock de pollution) et l'utilité des ménages. Les hypothèses de cette première section sont proches de celles déjà rencontrées dans les chapitres précédents. C'est pourquoi nous aborderons plus succinctement ces aspects.

4.1.1 Le comportement du ménage représentatif

La fonction séparable d'utilité du ménage représentatif dépend du niveau de consommation (c) et du niveau du stock de pollution (S) :

$$U_t(c_t, S_t) = \frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - B\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}$$

avec $B > 0$, $\varepsilon > 0$, $\varpi > 0$ et $\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial c_t} > 0$, $\frac{\partial U_t(c_t,S_t)}{\partial S_t} < 0$, $\frac{\partial U' c_t}{\partial S_t} = 0$. Le consommateur représentatif maximise sa fonction d'utilité sous la contrainte budgétaire, sans qu'il ne puisse influencer le montant des émissions qu'il subit. Cette externalité négative de pollution est à l'origine de la justification de la politique environnementale. Le programme du consommateur est dans ce cas donné par le problème dynamique suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l|l} \max\limits_{(c_t)_{t=0}^{+\infty}} \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t}\left(\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right) dt & \\ \text{s. c. } / & \dot{W}_t = w_t L_t + rW_t - L_t c_t + T_t \\ & \text{et } \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\int\limits_0^{\infty} r_s ds} W_t \geqslant 0 \end{array} \right.$$

avec la contrainte budgétaire du ménage représentatif :

$$\dot{W}_t = w_t L_t + rW_t - L_t c_t + T_t \tag{4.1}$$

où $r_t W_t$ est la richesse du ménage et T_t la taxe (ou la subvention) forfaitaire qui permet d'équilibrer le budget du gouvernement (*cf.* équation 4.21, section 4.5).

Le programme conduit à "la règle de Keynes-Ramsey" :

$$g_{c,t} = \frac{r_t - \rho - l}{\varepsilon} \tag{4.2}$$

De cette règle découlera le calcul du taux d'intérêt unique du marché (r_t).

4.1.2 Les émissions polluantes

Le capital naturel est une ressource renouvelable au taux d'assimilation naturelle $\Theta \in [0, 1]$ dont l'accumulation prend la forme suivante :

$$\dot{S}_t = P_t - \Theta S_t$$

avec P_t, le flux d'émission en t qui s'écrit :

$$P_t = \int_0^1 P_{jt} dj = \int_0^1 z_{jt} A_{jt} x_{jt} dj$$

avec $j \in (0, 1)$ $\forall t$ l'indice pour les biens intermédiaires (dont le nombre est donc constant et a été normalisé à un). Ainsi, l'intensité polluante du bien intermédiaire j (z_{jt}) représente le ratio émission / bien intermédiaire ($P_{jt}/A_{jt}x_{jt}$) à la date t. Nous supposons que l'intensité polluante (z_{jt}) constitue une variable d'état dans la dimension technologique. Dans ce cas, la réduction des émissions liées à la production du bien intermédiaire j nécessite l'introduction d'une nouvelle innovation en z_j, ou passe par une réduction de la production en bien intermédiaire (x_j).

Nous reviendrons par la suite sur les mécanismes permettant l'apparition d'une innovation en intensité polluante.

4.2 Le secteur final

Le secteur final est en concurrence pure et parfaite. Pour simplifier la présentation, nous retenons une entreprise représentative.

4.2.1 La technologie de production

La production du bien final nécessite l'emploi du facteur travail (L_Y) et du *continuum* de biens intermédiaires (x_j) différenciés par leurs niveaux de qualités (A_j) :

$$Y_t = \int_0^1 L_{Yt}^{1-\alpha} A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj \tag{4.3}$$

avec $\alpha \in (0,1)$; L_Y, la main-d'œuvre employée par le secteur final tel que la population active croît au taux constant l sachant que le marché du travail est à l'équilibre, soit $L_t = L_0 e^{lt} = L_{R1t} + L_{R2t} + L_{Yt}\ \forall t$, où L_{Rit} est le travail alloué au secteur i de R&D, $i = \{1,2\}$. Nous définirons les secteurs de R&D ultérieurement (section 4.4). Retenons, pour le moment, qu'il s'agit de deux secteurs dits d'échelle de "qualité" qui concernent les qualités standards ("standard" dans la mesure où l'indice de qualité A_j est commun à l'ensemble de la thèse) et les intensités polluantes des biens intermédiaires (z_j). L'endogénéisation de l'intensité polluante à travers une activité de R&D explicite permet d'identifier le coût de la réduction de l'intensité polluante à travers l'effort de R&D dans ce secteur (L_{R2t}). Pour cette raison, nous n'avons plus à faire la distinction entre la production potentielle et effective du bien final des chapitres précédents.

Le programme d'optimisation du producteur représentatif du bien final est le suivant :

$$\begin{cases} \max\limits_{(x_{jt},\, L_{Yt})} \Psi_t = Y_t - w_t L_{Yt} - \int\limits_0^1 p_{jt} x_{jt} dj \\ \text{s. c. } / \; Y_t = L_{Yt}^{1-\alpha} \int\limits_0^1 A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj \end{cases}$$

Le bien final est le numéraire de notre économie. Dans ce secteur compétitif, w est le taux de salaire et p_j, le prix du bien intermédiaire j. La firme maximise son profit en déterminant les quantités demandées des facteurs de production. La résolution du

programme conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} w_t = (1-\alpha)\frac{Y_t}{L_{Yt}} = (1-\alpha)\int_0^1 A_{jt}\left(\frac{x_{jt}}{L_{Yt}}\right)^{\alpha} dj \\ p_{jt} = \alpha A_{jt}\left(\frac{L_{Yt}}{x_{jt}}\right)^{1-\alpha} \end{cases}$$

4.2.2 Les demandes de facteurs de production

Supposons, pour le moment, que seule la qualité la plus élevée et l'intensité polluante la plus faible pour le bien intermédiaire j soient disponibles. Cette situation engendre alors une rente de monopole pour le producteur du bien intermédiaire j qui incorpore les technologies de dernière génération. Cette firme prend alors en compte la fonction de demande inverse p_j dans ses calculs d'optimisation.

4.3 Le secteur intermédiaire

Nous avons vu que le secteur intermédiaire est composé d'une multitude de biens différenciés verticalement.

4.3.1 Le programme d'optimisation d'une entreprise intermédiaire

Le programme du monopole j est le suivant :

$$\begin{cases} \max\limits_{(x_{jt})} \Pi_{jt} = p_{jt}x_{jt} - (1-\tau)\, h_t P_{jt} \\ \text{s. c. } / \left| \begin{array}{l} p_{jt} = \alpha A_{jt}\left(\frac{L_{Yt}}{x_{jt}}\right)^{1-\alpha} \\ P_{jt} = z_{jt}A_{jt}x_{jt} \end{array} \right. \end{cases} \tag{4.4}$$

avec $\tau < 1$, l'instrument dévoué à corriger la distorsion de marché liée au pouvoir de monopole du producteur du bien intermédiaire j. Il est ici équivalent de subventionner l'achat des biens intermédiaires ou la production des biens intermédiaires.[55]

[55] Avec $\boldsymbol{\tau} \neq 0$, nous avons donc $\frac{x_{jt}}{L_{Yt}} = \left(\frac{\alpha^2}{(1-\tau)h_t z_{jt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$ (système 4.5). Cette offre en bien intermédiaire est également obtenue avec une subvention à l'achat des biens intermédiaires, soit le programme suivant :

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, que la valeur optimale de l'instrument τ vaut $\tau^o = 1 - \alpha < 1$.

Par ailleurs, nous faisons l'hypothèse qu'en l'absence de toute politique internalisatrice (*i.e.* $\tau = h = 0$), un producteur du bien intermédiaire j se fournit en ressources naturelles (P_j) avec un coût marginal constant $e > 0$. Howarth et Norgaard (1992) et Michel (1993) font cette hypothèse également. Il existe donc un "marché minimum" en l'absence de la taxe qui permet d'éviter une production infinie en biens intermédiaires. Dans ce cas, le secteur intermédiaire j produit les quantités (x_{jt}) à l'aide de la ressource naturelle sans que la dégradation de l'environnement ainsi occasionnée ne soit correctement internalisée. Le gouvernement peut faire supporter le coût réel du dommage environnemental en mettant en œuvre une taxe pigouvienne (h_t) sur les émissions polluantes (P_j). Dans ce cas, le coût marginal de production est constitué de la taxe uniquement, ce qui revient en fait à faire l'hypothèse d'une discontinuité entre l'économie de laisser-faire et l'économie décentralisée.

Nous remarquons que la décentralisation de l'optimum, relative au pouvoir de marché et à l'externalité de pollution, pourrait se réaliser à l'aide d'un instrument unique dont le taux optimal serait égal à $(1 - \tau^o)\, h^o = \alpha h^o$.

4.3.2 Les effets distorsifs de la taxe sur les émissions polluantes

Le système suivant découle de la résolution du programme (4.4) :

$$\begin{cases} \frac{x_{jt}}{L_{Yt}} = \left(\frac{\alpha^2}{(1-\tau)h_t z_{jt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \\ p_{jt} = \frac{h_t z_{jt} A_{jt}}{\alpha} \end{cases} \tag{4.5}$$

et :

$$\Pi_{jt} = (1-\alpha)\, p_{jt} x_{jt} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) \alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} L_{Yt} A_{jt} \left(h_t z_{jt}\right)^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} \tag{4.6}$$

Ces équations font apparaître deux éléments nouveaux : à la fois, un effet distorsif de la taxe au niveau des profits et des demandes, en faveur des biens intermédiaires qui

---

$\max_{(x_{jt},\, L_{Yt})} \Psi_t = Y_t - w_t L_{Yt} - (1 - \boldsymbol{\tau}) \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj$. Il est équivalent de subventionner l'achat des biens intermédiaires ou de subventionner la production des biens intermédiaires.

incorporent les intensités polluantes les plus faibles : $\frac{\partial \Pi_{jt}}{\partial z_{jt}} < 0$ et $\frac{\partial x_{jt}}{\partial z_{jt}} < 0, \forall h_t > 0$. Les profits et la demande du producteur d'un bien intermédiaire "propre", relativement à ses concurrents, sont plus élevés.

4.4 La recherche et développement

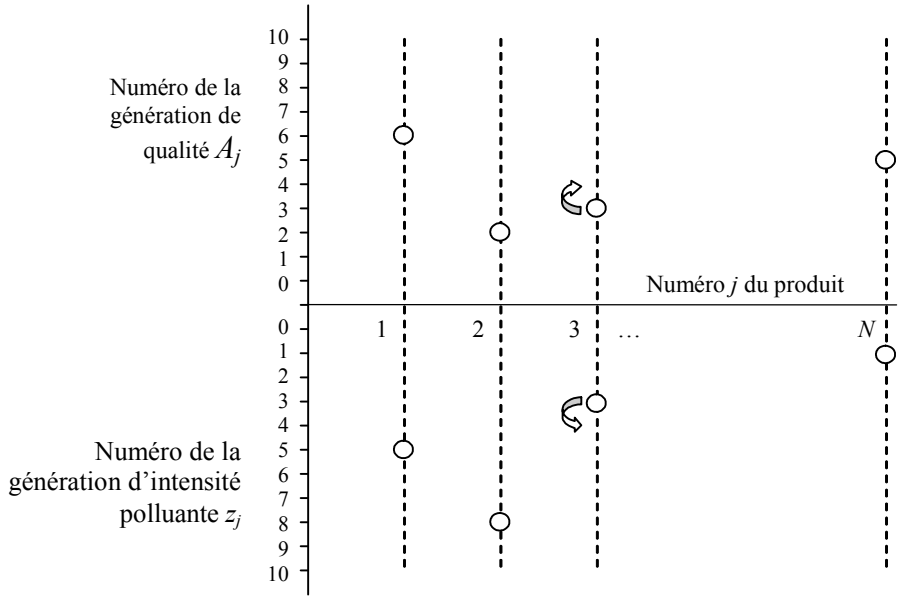
L'activité de recherche, dans ce chapitre, a la particularité d'être séparée en deux sous-secteurs distincts dévoués à l'amélioration de deux caractéristiques technologiques pour le bien intermédiaire j.

4.4.1 La double échelle de différenciation

Nous retenons un processus d'amélioration des technologies, dit à échelle de qualité (*quality ladder*), à la Grossman & Helpman (1991) ou Barro & Sala-i-Martin (1995). Mais ici, chaque bien intermédiaire est caractérisé par deux dimensions technologiques, comme l'illustre le graphique 4.b ci-dessous.

Sur ce graphique, les N variétés des biens intermédiaires (que l'on a déjà normalisés à 1) sont alignées sur l'axe des abscisses. La qualité maximale et l'intensité polluante de chaque type de bien intermédiaire, pour un instant t donné, se situent sur l'axe des ordonnées.

Le processus d'innovation se produisant à des taux différents et aléatoirement, les niveaux atteints varient de façon irrégulière entre les biens intermédiaires.



Graphique 4.b. Échelles de qualité, de variété et d'intensité polluante des biens.

L'axe des abscisses indique le nombre de types de biens intermédiaires, l'axe des ordonnées orienté vers le haut indique les échelons de qualité correspondant à chaque biens, l'axe des ordonnées bas indique les niveaux de l'intensité polluante pour chaque bien. Un bien intermédiaire j appartient donc à l'ensemble $(1, ..., N)$ avec N constant dans le temps que l'on normalise à un.

Formellement, l'accroissement de la qualité d'un montant donné $q > 1$ (l'incrément légal de qualité ou "saut inventif") s'écrit en fonction de la génération de l'innovation qui a été atteint en t (notée $k_{ij,t}$ avec l'indice ij pour le secteur de recherche i spécialisé sur le bien intermédiaire j), soit :

$$A_{jt} = q^{k_{1j,t}} A_0$$

Par la suite, nous posons $A_0 = 1$.

Et, de façon similaire, nous supposons, pour $z_{jt} \in (0, 1)$, la relation suivante :

$$z_{jt} = \left(\frac{1}{q}\right)^{k_{2j,t}} z_0$$

avec $k_{2j,t}$ la génération de l'innovation dans l'intensité polluante du bien intermédiaire j. Par la suite, nous posons $z_0 = 1$.

Nous avons donc, lors du passage d'une génération à la suivante, une augmentation de la qualité standard (A) d'un pourcentage égale à $(q - 1) * 100$. Pour l'intensité

polluante, la réduction est d'un pourcentage égale à $\left|\frac{1-q}{q}\right| * 100$. Prenons un exemple numérique : si $q = 1.1$, alors l'amélioration de la qualité standard liée au passage à la génération suivante est de 10 %, alors que la réduction de l'intensité est de l'ordre de 9.09 %.

Remarque sur l'autre manière de modéliser l'apparition des innovations :

Avec les hypothèses des modèles de *quality leader* avec rattrapage de la qualité de pointe (Aghion et Howitt 1992), auxquelles nous avons eues recours aux chapitres précédents, des innovateurs en A (*i.e.* ceux qui atteignent la qualité de pointe notée $\bar{A}$) et ceux en z (*i.e.* $\bar{z}$ l'intensité polluante de pointe, donc la plus faible) coexistent à chaque instant t. Par contre, pour un bien intermédiaire donné, il n'y a pas d'innovations simultanées en A et z. Seules les innovations dans deux secteurs de R&D pour deux biens intermédiaires distincts peuvent avoir lieu simultanément. Dans ce cas, les profits des producteurs des deux biens intermédiaires indicés par j et w s'écrivent : $\Pi_{jt}\left(\bar{A}_t\right) = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}}\frac{L_{Yt}\bar{A}_t}{(h_t z_{jt})^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}}$ et $\Pi_{wt}\left(\bar{z}_t\right) = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}}\frac{L_{Yt}A_{wt}}{\left(h_t \bar{z}_t\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}}$. Ainsi, $\Pi_{jt}\left(\bar{A}_t, z_{jt}\right) \neq \Pi_{wt}\left(A_{wt}, \bar{z}_t\right)$ puisque les qualités et les intensités diffèrent entre les secteurs. Il est pourtant nécessaire de pouvoir égaliser les profits des innovateurs dans le cadre d'un bien intermédiaire aux dimensions multiples.

Une condition unique de non-arbitrage doit exister au niveau macro-économique malgré l'existence des deux types d'innovations. Or, cela s'avère impossible dans le cadre des modèles avec rattrapage de la qualité de pointe à la Aghion et Howitt (1992) ; sauf à formuler l'hypothèse que les innovations en A_j et z_j sont toujours simultanées, comme le fait Ricci (2002). Dans cette dernière configuration, on parle d'un secteur unique de R&D spécialisé dans l'amélioration simultanée de A_j et z_j pour le bien intermédiaire j. Si l'innovation a lieu, le bien intermédiaire peut alors être produit avec $\left(\bar{A}_t, \bar{z}_t\right)$, ce qui est vrai pour tous les biens intermédiaires qui ont bénéficié d'une innovation au même instant.

Analysons maintenant le processus d'innovation. Pour cela, nous discuterons des conséquences liées à la destruction créatrice ainsi que des enjeux relatifs au partage du surplus entre les deux types de technologies. Ces éléments représentent des conditions d'existence de l'équilibre.

4.4.2 Destruction créatrice et concurrence

Dans le secteur du bien intermédiaire j, nous rappelons que nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas de découvertes simultanées en qualité et en intensité polluante. Jusqu'à maintenant, nous avons simplifié les mécanismes en plaçant directement notre commentaire dans le cadre du monopole. Or, initialement les différents producteurs d'un même bien intermédiaire se livrent une concurrence sur les quantités à la Bertrand. Conformément à la littérature dans ce domaine (*cf.* Barro et Sala-i-Martin 1995), nous posons la condition suivante qui concerne la taille minimale du saut inventif (q) :

$$q \geqslant \frac{1}{(1-\tau)\,\alpha} \tag{4.7}$$

Afin de simplifier le commentaire, nous nous donnons provisoirement deux générations successives pour chaque type d'innovations. Ainsi, à la date t, dans chaque secteur j, on trouve trois catégories différentes de firmes classées selon les générations de la qualité et de l'intensité polluante avec lesquelles elles produisent le bien j :

- La firme qu'on pourrait qualifier de leader "global" est caractérisée par les dernières générations dans les deux types d'innovations, soit (k_{1j}, k_{2j}) ;
- La firme leader en intensité polluante mais pas en qualité est définie par ($k_{1j}-1$, k_{2j}) ;
- La firme leader en qualité mais pas en intensité polluante est donc caractérisée par (k_{1j}, $k_{2j}-1$).

Du producteur du bien intermédiaire j, dont la qualité est notée A_j et l'intensité polluante z_j, nous connaissons le prix de vente $p_{jt}(k_{1j},\ k_{2j})$, sa production x_{jt} (*cf.* système 4.5) et son coût marginal de production $Cm_{jt} = \frac{dCT}{dx_j}$, avec le coût total de production qui se réécrit $CT(x_j) = (1-\tau)\,h_t P_{jt} = (1-\tau)\,.\alpha.p_{jt}(k_{1j},k_{2j}).x_{jt}$ (équation

4.6). Le profit de cette firme est positif si $(1-\tau)\,\alpha \geqslant 0$, ce qui est toujours vérifié. La firme leader sur les deux caractéristiques de la technologie sera donc toujours présente sur le marché.

Maintenant, pour la firme caractérisée par le couple $(k_{1j}-1,\ k_{2j})$, le prix de vente est égal à $\frac{p_{jt}}{q}$. En effet, $p_{jt}(k_{1j}-1, k_{2j}) = \frac{h_t z_{jt} q^{k_{1j}-1}}{\alpha} = \frac{p_{jt}(k_{1j},k_{2j})}{q}$.[56] Les producteurs qui vendent le bien intermédiaire j à des niveaux inférieurs de qualité standard pratiquent des prix plus faibles. Par contre, les coûts marginaux de production sont identiques entre les différents producteurs du bien intermédiaire j et, cela, quelques soient les niveaux des qualités ou des intensités polluantes qui sont vendues puisque le coût de production est directement proportionnel aux émissions du secteur dont le niveau dépend de la technologie de dernière génération $(k_{1j},\ k_{2j})$, c'est-à-dire celle qui est toujours présente sur le marché. L'existence de la deuxième catégorie de firme $(k_{1j}-1,$ $k_{2j})$ est possible si, et seulement si, $p_{jt}(k_{1j}-1, k_{2j}) \geqslant Cm_{jt}(k_{1j}, k_{2j})$, soit $(1-\tau)\,\alpha q \leqslant 1$. Cela est contraire à la condition (4.7) qui stipule que le saut inventif a une taille suffisamment élevée. Avec cette condition relative à l'hypothèse de concurrence à la Bertrand, il ne peut y avoir de coexistence, dans un secteur j, de générations différentes de qualités standards. Dans ce cas, le producteur de la qualité de seconde génération (ainsi que tous les producteurs des qualités inférieures) ne peut pas concurrencer le prix de l'entreprise leader en qualité.

Enfin, la troisième firme, caractérisée par le couple $(k_{1j},\ k_{2j}-1)$ (elle offre le bien intermédiaire j avec une intensité polluante de la génération précédente $k_{2j}-1$, donc plus élevée), pratique le prix suivant : $p_{jt}(k_{1j}, k_{2j}-1) = \frac{h_t\left(\frac{1}{q}\right)^{k_{2j}-1} A_{jt}}{\alpha} = q.p_{jt}(k_{1j},\ k_{2j})$.[57] Avec un raisonnement similaire au paragraphe précédent, cette firme peut être présente sur le marché si, et seulement si, $p_j(k_{1j}, k_{2j}-1) \geqslant Cm_j(k_{1j},\ k_{2j})$, ce qui équivaut à l'inégalité suivante $(1-\tau)\,\alpha \leqslant 1$. Cette dernière est toujours vérifiée puisque, par hypothèse, $1 > \alpha > 0$ et $1 > \tau > 0$. La firme offrant une intensité polluante de génération précédente peut rester en place parce qu'elle bénéficie de la réduction des

---

[56] Et le prix de la firme qui produirait j avec la génération $k_{1j}-2$ serait $\frac{p_{jt}}{q^2}$; le prix de la firme qui produirait j avec la génération $k_{1j}-3$ serait $\frac{p_{jt}}{q^3}$; ainsi de suite...

[57] Et le prix de la firme produisant le bien intermédiaire j avec la génération $k_{2j}-2$ serait $q^2.p_{jt}$...

coûts de production résultant d'une diminution de l'intensité polluante, $Cm_j(k_{1j},\, k_{2j})$ étant identique pour les trois catégories de firmes. Elle peut donc pratiquer un prix plus élevé qui lui permet tout de même de se maintenir sur le marché.
Finalement, deux catégories de firmes sont présentes sur le marché : la firme leader dans tous les domaines, c'est-à-dire caractérisée par les générations de pointe $(k_{1j},\, k_{2j})$, et la firme leader en qualité mais pas en intensité polluante, donc indicée par le couple $(k_{1j},\, k_{2j}-1)$. Et si l'on étend le même raisonnement à toutes les générations d'intensités polluantes, on voit bien que les firmes caractérisées par $(k_{1j},\, k_{2j}-2)$, $(k_{1j},\, k_{2j}-3)$... sont encore rentables. Du point de vue des technologies, nous pouvons conclure sur les mécanismes suivants. D'abord, il n'existe pas de bien intermédiaire j avec une qualité standard de la génération précédente sur le marché, puisque sa production n'est pas rentable. La qualité de pointe remplace toutes les générations précédentes de qualité. Ensuite, il coexiste différentes générations d'intensités polluantes sur le marché du bien intermédiaire j.

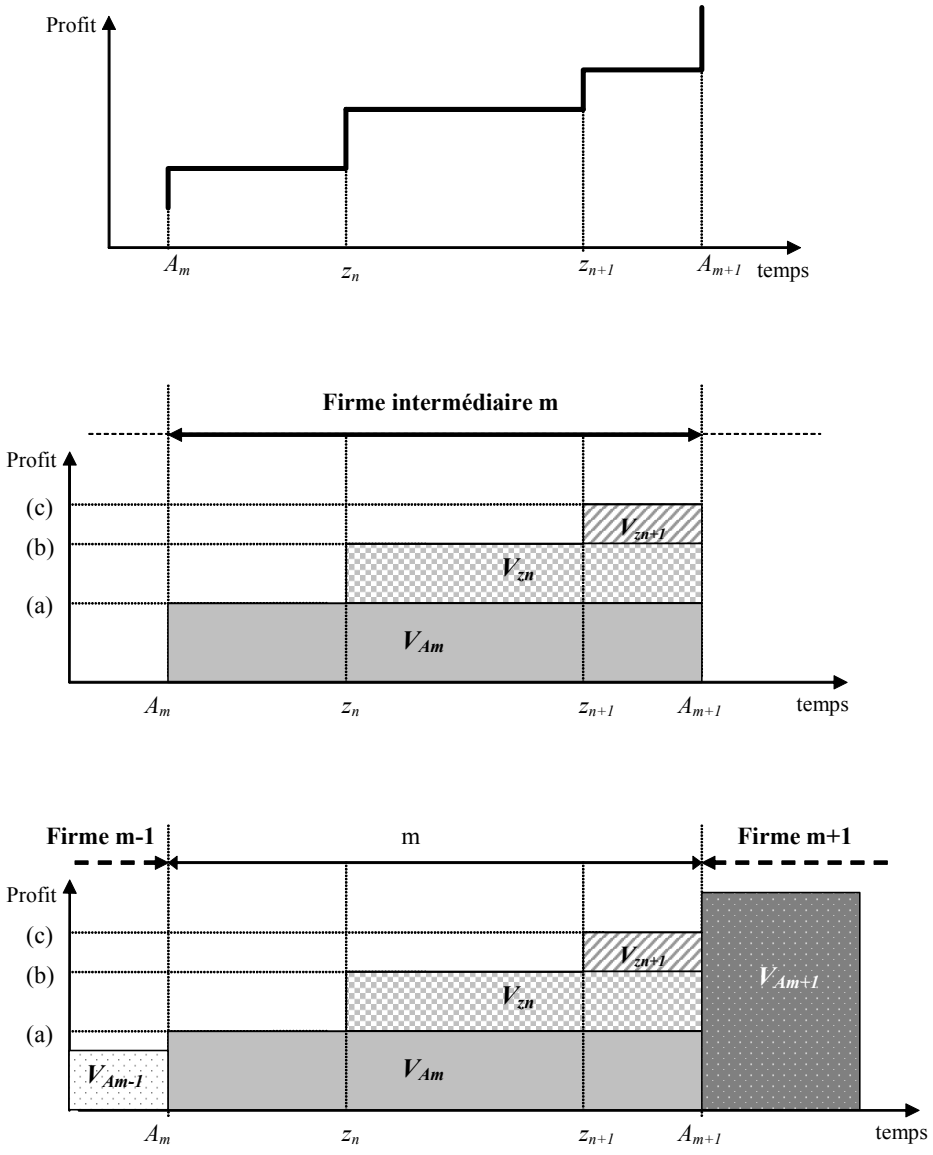
Discutons à présent du cas où une innovation supplémentaire en qualité est réalisée, dont nous notons la génération $k_{1j}+1$. Les qualités standards de générations précédentes $(k_{1j},\, k_{1j}-1...)$ sont remplacées. Le producteur qui fournit la qualité $k_{1j}+1$ au marché est donc un monopole sur ce type d'innovations : il détient le droit exclusif d'exploiter l'innovation de la dernière génération en qualité standard.
Mais qu'advient-il des intensités polluantes existantes $(k_{2j},\, k_{2j}-1,\, k_{2j}-2...)$? Nous avons vu que les technologies en intensités polluantes déjà existantes sont associées à la qualité standard de la génération précédente k_{1j}. Logiquement, elles devraient disparaître, d'après les résultats précédents qui stipulent que les firmes, produisant la seconde génération de qualité standard, quittent le marché. Au final, il n'y a donc qu'une seule firme sur le marché, c'est-à-dire celle qui offre la nouvelle qualité standard de pointe (ici $k_{1j}+1$). Cette nouvelle firme est alors caractérisée par le couple $(k_{1j}+1,\, k_{2j})$: elle bénéficie de la dernière génération de l'intensité polluante du moment (ici k_{2j}) lorsqu'elle remplace la firme indicée par $(k_{1j},\, k_{2j})$. Une innovation en qualité met donc fin, à la fois, aux générations précédentes dans la qualité standard et à toutes les

générations dans les intensités polluantes.
Enfin, qu'advient-il des intensités polluantes de la prochaine génération (*i.e.* $k_{2j}+1$, $k_{2j}+2$...) ? Dans notre exemple, la firme en place ($k_{1j}+1$, k_{2j}) est la seule à avoir intérêt à financer la réduction de l'intensité polluante (passage de la génération k_{2j} à $k_{2j}+1$). Il n'est jamais rentable pour une entreprise caractérisée par une innovation en qualité standard de la génération précédente (ici k_{1j}) d'incorporer l'innovation de pointe en intensité polluante ($k_{2j}+1$). La condition pour que cette firme soit présente sur le marché s'écrit $p_{jt}(k_{1j}, k_{2j}+1) \geqslant Cm_{jt}(k_{1j}+1,\ k_{2j}+1)$ soit $\frac{1}{(1-\tau)\alpha} \geqslant q$, ce qui est contraire à la condition (4.7). Entre deux innovations en qualité, les innovations successives dans les intensités polluantes qui peuvent avoir lieu sont donc incorporées au processus productif existant de la firme déjà en place. Cette dernière a intérêt à financer la réduction de l'intensité polluante puisqu'en présence de la taxe sur les émissions cela augmente ses profits.[58]

Pour résumer ces mécanismes, nous pouvons écrire que les innovations en qualité sont les seules à induire de la destruction créatrice. Le monopole intermédiaire intègre les innovations en intensité polluante jusqu'à être remplacé par une nouvelle firme caractérisée par une génération plus récente dans la qualité standard. Autrement dit, un producteur de bien intermédiaire est remplacé lorsqu'une innovation standard voit le jour, alors qu'une innovation d'intensité polluante est incorporée au processus de production existant. Dans ce cas, la valeur de l'innovation en intensité polluante est égale aux suppléments de profits actualisés qu'elle engendre. Si nous faisons une analogie avec le secteur industriel, en supposant que le producteur du bien intermédiaire j, qui est en situation de monopole, est l'industrie leader sur le secteur j, nous pouvons dire que **les industries leaders investissent en R&D pour réduire l'intensité polluante de leur propre produit alors que les petites entreprises investissent en R&D pour améliorer la qualité et devenir les industries leaders. Dans notre modèle, il n'est pas rentable d'améliorer la qualité standard pour une industrie**

[58] Remarque : dans l'économie de laisser-faire, on considère que le coût marginal de production des biens intermédiaires $e > 0$ est faible. Ce faisant, son effet incitatif à faire de la R&D environnementale peut être considéré comme étant négligeable.

leader. Par contre, grâce à la taxe sur les émissions polluantes, la réduction de son intensité polluante permet d'augmenter son profit relativement aux industries concurrentes qui produisent des biens différents dans d'autres secteurs. Pour une séquence donnée de découvertes technologiques dans un secteur i quelconque, le graphiques 4.c suivant résume le partage de la rente du monopole produisant le bien intermédiaire i entre les différents innovateurs :



Graphique 4.c. Un exemple de séquence d'innovations pour le bien intermédiaire i représenté dans le plan (temps, profit).

L'illustration ci-dessus de la règle de partage du profit intertemporel des firmes intermédiaires mérite d'être commentée en détail.
Nous prenons une séquence d'innovations quelconque, $(A_m,\ z_n,\ z_{n+1},\ A_{m+1})$, qui a pour effet d'augmenter le profit du secteur intermédiaire comme attendu (*cf.* premier graphique 4.c). L'innovation en qualité A_m est produite par une nouvelle firme intermédiaire m. La valeur de cette innovation représente donc tout le profit engendré jusqu'au remplacement de celle-ci par une nouvelle innovation en qualité standard A_{m+1} (*cf.* le second graphique 4.c). La somme des profits engendrés pendant cette durée d'existence est égale à l'aire V_{A_m} (rectangle de grand côté égale au segment $[A_m, A_{m+1}]$ et de petit côté [origine, (a)]) qui est une estimation de la valeur de l'innovation A_m. Ensuite, l'innovation en intensité z_n est produite par la firme déjà en place et sa valeur peut être estimée au moyen du profit supplémentaire engendré par l'incorporation de la nouvelle intensité, jusqu'au remplacement de celle-ci par l'innovation en qualité standard A_{m+1} (et sa valeur est l'aire V_{z_n}). Seules les innovations standards remplacent les innovations existantes, qu'elles soient de qualité ou d'intensité polluante. Dans notre exemple, la dernière innovation en intensité polluante qui a lieu est notée z_{n+1}. Sa valeur $(V_{z_{n+1}})$ est déterminée avec le même mécanisme que pour l'innovation précédent (z_n). Enfin, la pollution effective (ou le prélèvement sur la ressource naturelle) liée à la production de la firme m dépend au final du couple d'innovation : $(A_m,\ z_{n+1})$.

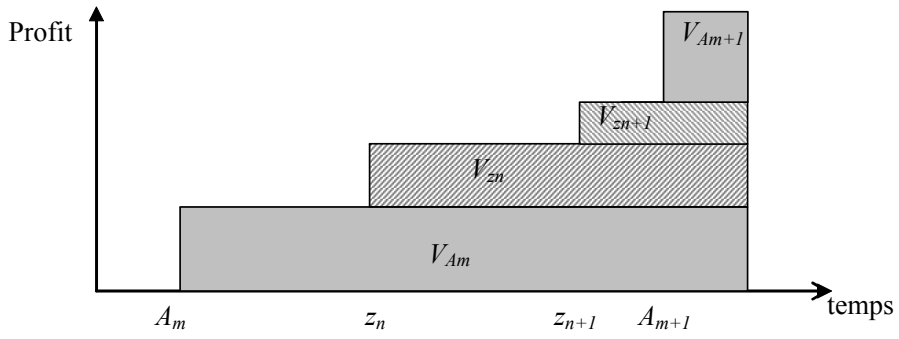
Nous pouvons formuler ce mécanisme de destruction créatrice avec le système de non-arbitrage (4.8) ci-dessous formé par deux équations. En effet, deux types d'innovations peuvent avoir lieu, soit l'amélioration de la qualité standard (première ligne du système) soit la réduction de l'intensité polluante (deuxième ligne). Ainsi :

$$\begin{cases} r_t + p_{k_{1j}+1,\ k_{2j}} = \frac{\Pi_{jt}(k_{1j}+1,\ k_{2j},\ ...)}{E\left(V_{k_{1j}+1,\ k_{2j}}\right)} + E\left(\frac{\dot{V}_{k_{1j}+1,\ k_{2j}}}{V_{k_{1j}+1,\ k_{2j}}}\right) \\ r_t + p_{k_{1j}+1,\ k_{2j}} = \frac{\Pi_{jt}(k_{1jt},\ k_{2jt}+1,\ ...) - \Pi_{jt}(k_{1jt},\ k_{2jt},\ ...)}{E\left(V_{k_{1j},\ k_{2j}+1}\right)} + E\left(\frac{\dot{V}_{k_{1j},\ k_{2j}+1}}{V_{k_{1j},\ k_{2j}+1}}\right) \end{cases} \tag{4.8}$$

avec $\dot{V}$ le gain en capital provenant d'une possible augmentation de la valeur de l'innovation ; $\frac{\Pi}{V}$ représente le taux de dividende rémunérant le détenteur d'une action de l'entreprise produisant le bien intermédiaire. La somme de ces éléments égalise

le taux d'intérêt sans risque (r) auquel vient s'ajouter une prime de risque constituée du taux de destruction créatrice (*i.e.* $p_{1j} = p_{k_{1j}+1,\, k_{2j}}$, la probabilité qu'une innovation de qualité survienne dans le secteur j) qui est une estimation de la probabilité de remplacement du monopole.
Nous tenterons, dans la suite du chapitre, de simplifier le système (4.8) pour qu'il s'écrive finalement sous la forme d'une équation unique caractérisant un seul bien intermédiaire.

Remarque sur les autres mécanismes de partage de la rente entre les innovateurs :
Soit (k_{1j}, k_{2j}), la génération la plus récente d'innovations. Si le coût de production du bien intermédiaire de génération (k_{1j-1}, k_{2j}) dépendait maintenant des émissions polluantes caractérisées par sa génération (et non plus par (k_{1j}, k_{2j}) comme précédemment), sa production serait alors rentable. En effet, $p_{jt}(k_{1j-1}, k_{2j}) \geqslant Cm_{jt}(k_{1j} - 1, k_{2j})$ si, et seulement si, $(1 - \tau)\,\alpha \leqslant 1$ ce qui est toujours vérifié. Nous aurions alors coexistence de tous les types d'innovations, sans qu'il n'y ait de processus d'extinction de la rente ; c'est-à-dire sans destruction créatrice. Dans ce cas, conformément à notre démarche, nous pouvons conclure que la durée de vie d'un producteur du bien intermédiaire est infinie. Elle peut être décrite à l'aide du graphique 4.d ci-dessous :



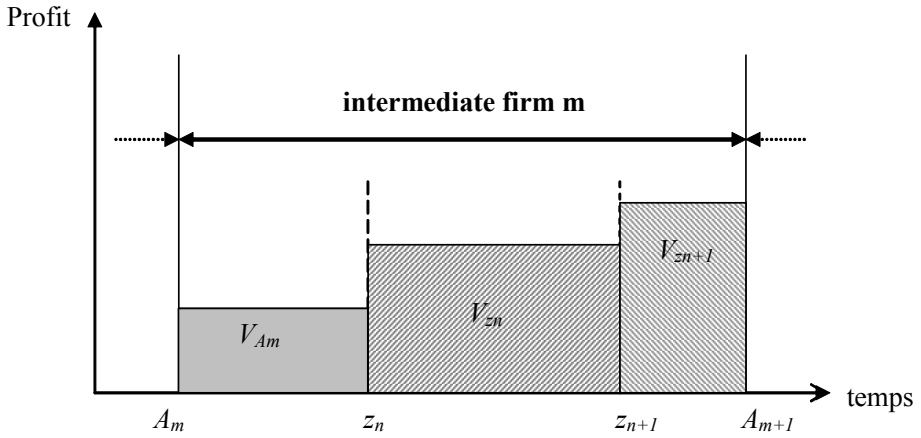
Graphique 4.d. Un exemple de séquence d'innovations pour le bien intermédiaire i représenté dans le plan (temps, profit).

La détermination des efforts de recherche doit être tirée du système des équations de non-arbitrage suivant :

$$\begin{cases} r_t = \frac{\Pi(A_{m+1},z_n)-\Pi(A_m,z_n)}{E(V_{1t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{1t}}{V_{1t}}\right) \\ r_t = \frac{\Pi(A_m,z_{n+1})-\Pi(A_m,z_n)}{E(V_{2t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{2t}}{V_{2t}}\right) \end{cases}$$

Cependant, la coexistence de toutes les générations d'innovations pour un bien intermédiaire j pose le problème de la détermination de la valeur finale des émissions polluantes pour le secteur intermédiaire j. Les émissions sont, dans cette configuration, liée à une multitude de sources de production différenciées. Or, on ne connaît pas les séquences des innovations *a priori*, ni au niveau d'un secteur, ni au niveau macro-économique. Cette forme particulière n'a pas de solution mathématique appropriée.

Ensuite, on peut imaginer *ex nihilo* d'autres systèmes de partages de la rente. Le graphique suivante est un premier exemple :



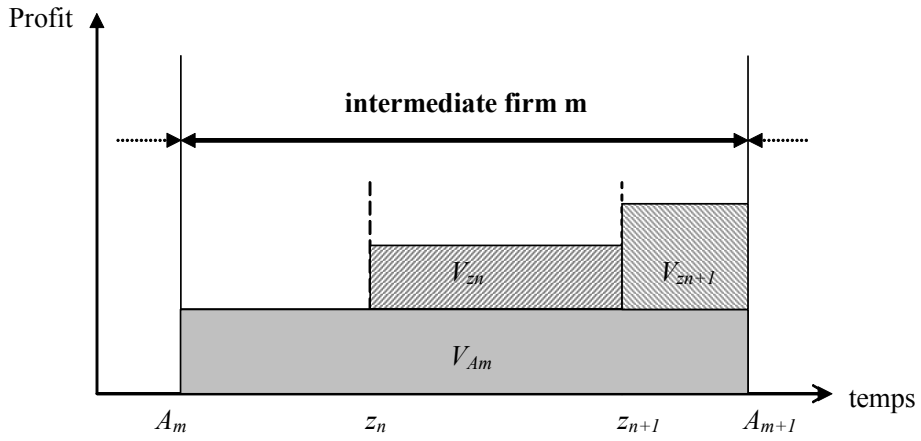
Graphique 4.e. Un exemple de séquence d'innovations pour le bien intermédiaire i représenté dans le plan (temps, profit).

Dans le cas du graphique 4.e, les deux types d'innovations entraînent de la destruction créatrice (*i.e.* dans les deux direction), et le système de non-arbitrage pourrait s'écrire :

$$\begin{cases} r_t + p_{1j} + p_{2j} = \frac{\Pi(A_{m+1},z_n)}{E(V_{1t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{1t}}{V_{1t}}\right) \\ r_t + p_{1j} + p_{2j} = \frac{\Pi(A_m,z_{n+1})}{E(V_{2t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{2t}}{V_{2t}}\right) \end{cases}$$

Ce cas n'est cependant pas justifié au regard des mécanismes de la concurrence. Nous avions effectivement vu que les innovations en intensité polluante n'étaient pas source de destruction créatrice.

Le graphique 4.f suivant, tout comme le précédent, ne correspond pas à une situation envisageable du point de vue des mécanismes de la concurrence :



Graphique 4.f. Un dernier exemple de séquence d'innovations pour le bien intermédiaire i représenté dans le plan (temps, profit).

Ici, l'innovation en intensité polluante (z_{n+1}) a une valeur égale au supplément de profit que son incorporation entraîne, auxquel s'ajoute le profit lié aux intensités précédentes (z_n sur le graphique, mais il aurait pu y avoir d'avantage d'innovations en intensités polluantes entre A_m et z_{n+1}). Les intensités nouvelles remplacent donc les plus anciennes. La condition de non-arbitrage issue du graphique 4.f s'écrit :

$$\begin{cases} r_t + p_{1j} + p_{2j} = \frac{\Pi(A_{m+1}, z_n)}{E(V_{1t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{1t}}{V_{1t}}\right) \\ r_t + p_{1j} + p_{2j} = \frac{\Pi(A_m, z_{n+1}) - \Pi(A_m, z_{n-1})}{E(V_{2t})} + E\left(\frac{\dot{V}_{2t}}{V_{2t}}\right) \end{cases}$$

La résolution mathématique de ce système d'équations de non-arbitrage s'avère impossible, puisqu'en réalité le terme $\Pi(A_m, z_{n+1}) - \Pi(A_m, z_{n-1})$ peut dépendre de l'intensité polluante de la cinquième génération précédente, dans le cas où il y aurait eu cinq innovations en intensité depuis l'innovation standard. Avec cet exemple, on aurait

$\Pi(A_m, z_{n+4}) - \Pi(A_m, z_{n-1})$. Or, le nombre d'innovations en intensité polluante entre deux innovations en qualité standard diffère d'un bien intermédiaire à l'autre et ne peut pas être connu *a priori*.

En conclusion de cette remarque : parmi les mécanismes alternatifs de destruction créatrice, seul le partage des profits représenté par le graphique 4.e est techniquement possible. Il n'est cependant pas envisageable au regard des mécanismes de la concurrence.

Le mécanisme de la destruction créatrice à partir duquel nous allons décrire le sentier de croissance de notre économie prend donc la forme du système (4.8).

4.4.3 La qualité standard

L'amélioration de la qualité du bien intermédiaire j est un processus stochastique déterminé par une loi de Poisson, soit :

$$\dot{A}_{jt} = \ln q . p_{R1jt} . A_{jt}$$

avec la probabilité d'innover p_{R1jt} qui s'écrit :

$$p_{R1jt} = \beta_1 L_{R1jt}$$

La probabilité d'accroître la qualité d'un montant q croît avec l'effort de recherche (L_{R1jt}). Ainsi :

$$\dot{A}_{jt} = \delta_1 L_{R1jt} A_{jt} \tag{4.9}$$

avec δ_1, la productivité des chercheurs spécialisés dans l'amélioration des qualités des biens intermédiaires, telle que $\delta_1 \equiv \beta_1 \ln q$, avec $\ln q > 0$ et β_1, la variable de Poisson.

4.4.4 L'intensité polluante

De façon similaire, on a pour l'intensité de pollution du bien intermédiaire j la relation suivante :

$$\overset{\bullet}{z}_{jt} = \delta_2 L_{R2jt} z_t$$

avec δ_2 le paramètre de productivité des chercheurs spécialisés dans la réduction des intensités polluantes des biens intermédiaires, tel que $\delta_2 \equiv \beta_2 \ln\left(\frac{1}{q}\right)$. La variable de Poisson pour le secteur de R&D spécialisé dans la réduction de l'intensité polluante est $\beta_2 > 0$.

Dans les chapitres précédents, les variables de Poisson β_1 et β_2 étaient des paramètres exogènes . Nous verrons par la suite qu'elles devront prendre une forme particulière pour assurer l'existence d'un sentier de croissance équilibrée.

4.4.5 L'indice de qualité agrégée

En remplaçant la fonction de demande des biens intermédiaires (x_{jt}, équation 4.5) dans la fonction de production du bien final (Y_t, équation 4.3), nous obtenons le volume de production, le salaire nominal et les profits du producteur du bien intermédiaire j qui sont tous fonctions de l'indice de qualité agrégée (notée Q_t) :

$$\begin{cases} Y_t = \left(\frac{\alpha^2}{h_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} L_{Yt} Q_t \\ w_t = (1-\alpha)\left(\frac{\alpha^2}{h_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} Q_t \qquad \text{avec } Q_t = \int_0^1 Q_{jt} dj \\ \Pi_{jt} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\left(\frac{\alpha^2}{h_t^{\alpha}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_{Yt} Q_{jt} \end{cases} \tag{4.10}$$

L'indice de qualité agrégée Q est une combinaison des différentes générations d'innovations en qualité standard A_j et en intensité polluante z_j :

$$Q_t = Q_{k_{1jt},\, k_{2jt}} = \int_0^1 \left(\frac{A_{jt}}{z_{jt}^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}}\right) dj = \int_0^1 Q_j dj = \int_0^1 q^{k_{1jt} + \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) k_{2jt}} dj$$

avec, pour rappel, $A_{k_{1j}} = (q)^{k_{1j}}$ et $z_{k_{2j}} = (1/q)^{k_{2j}}$. Les innovations en A_j et z_j augmentent l'indice de qualité agrégée Q.

Nous pouvons maintenant déterminer les comportements d'optimisation des entreprises de R&D.

4.4.6 Le comportement d'une firme de R&D spécialisée en qualité standard

Sur un marché en concurrence parfaite, la firme du secteur de R&D spécialisée dans l'amélioration de la qualité standard du bien intermédiaire j maximise le profit espéré résultant de l'accroissement du montant q de la qualité déjà existante. Soit :

$$\begin{cases} \underset{(L_{R_{1j},k_{1j}})}{\max} E\left(V_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right).p_{1j,k_{1j}} - (1-\sigma_{R1t})\, w_t L_{R_{1j},k_{1j}} \\ \text{s. c. } /\ \ p_{1j,k_{1j},k_{2j}} = \beta_1 L_{R_{1j}} \end{cases}$$

ce qui nous donne :

$$E\left(V_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right) = \frac{1-\sigma_{R1t}}{\beta_1} w_t \tag{4.11}$$

D'après la seconde équation du système (4.10), le salaire dépend lui-même de l'indice de qualité agrégée, et l'équation (4.11) va évoluer en fonction de l'indice de qualité agrégée (Q).

Par contre, l'indice de qualité agrégée pour le bien intermédiaire j (*i.e.* Q_j) évolue différemment d'un secteur de R&D à l'autre. En effet, pendant le temps de recherche de l'innovateur en qualité, on considère A_j constant ; par contre, pendant cette même durée, z_j peut diminuer grâce à l'activité d'un innovateur spécialisé dans l'intensité polluante du bien intermédiaire j. On parle d'effets inter-sectoriels entre les deux dimensions innovantes d'un même bien intermédiaire. Au niveau macro-économique, on pourrait écrire que :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_j &= \frac{d\left(q^{k1j}\right)}{dt} q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} + q^{k1j} \frac{d\left(q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j}\right)}{dt} \\ \dot{Q}_j &= \underbrace{\left[p_{1jt}\,(q-1)\,Qj\right]}_{\text{cas } \mathbf{(A)}} + \underbrace{\left[p_{2jt}\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1\right)Qj\right]}_{\text{cas } \mathbf{(B)}} \end{aligned}$$

Deux cas de figures qui se présentent :

- le cas **(A)**, si on innove en qualité (donc k_{1j} évolue) ;

- le cas **(B)**, si on innove en intensité polluante (donc k_{2j} évolue).

Dans le cas **(B)**, durant la course aux brevets sur la qualité standard, la génération de la qualité est fixe mais la génération de l'intensité polluante peut évoluer, ce que nous notons par :

$$\left.\frac{\dot{Q}_j}{Q_j}\right|_{k_{1j}} = p_{2jt}\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1\right)$$

Dans le premier cas **(A)**, avec un raisonnement similaire, on a :

$$\left.\frac{\dot{Q}_j}{Q_j}\right|_{k_{2j}} = p_{1jt}\left(q - 1\right)$$

Ainsi, nous pouvons réécrire la valeur espérée de l'innovation à l'aide des équations du système (4.8) (première ligne du système) :

$$r_t + p_{k_{1jt}+1,\, k_{2jt}} = \begin{array}{c} \left[\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} L_{Yt} h_t^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} Q_j q\right]^{\frac{\beta_1(k_{1jt},\, k_{2jt})}{(1-\sigma_{R1t})w_t}} \\ + \left[\frac{\dot{Q}}{Q} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} + p_{2jt}\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1\right)\right] \end{array} \tag{4.12}$$

avec $p_{k_{1j}+1,\, k_{2j}}$ la probabilité d'être remplacé, autrement dit le taux d'actualisation des profits futurs espérés lié au phénomène de destruction créatrice.

L'existence d'un état stable à long terme repose sur un principe de symétrie entre les secteurs de R&D, à savoir que la valeur espérée doit être identique entre tous les secteurs de R&D sur la qualité. Formellement, le terme $\left[\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} L_{Yt} h_t^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} Q_j q\right]$ de l'équation (4.12) concentre, à travers l'indice sectoriel Q_j, ce phénomène d'hétérogénéité entre les secteurs. La symétrie entre les secteurs ne peut être atteinte que grâce à la détermination d'une variable de Poisson adéquate, c'est-à-dire fonction des générations des technologies, soit $\beta_1\left(k_{1jt},\, k_{2jt}\right)$.

4.4.7 Le comportement d'une firme de R&D spécialisée en intensité polluante

Le programme d'optimisation est équivalent pour la firme de recherche en intensité polluante du bien intermédiaire j. Ainsi :

$$\begin{cases} \max\limits_{(L_{R_{2j},k_{1j}})} E\left(V_{2,k_{1j},k_{2j}+1}\right).p_{2j,k_{ij}} - (1-\sigma_{R2t})\, w_t L_{R_{2j},k_{1j}} \\ \text{s. c. } / \quad p_{2j,k_{1j},k_{2j}} = \beta_2 . L_{R_{2j}} \end{cases}$$

Nous déterminons la condition de libre-entrée dans le secteur de la recherche spécialisé dans la réduction de l'intensité polluante du bien intermédiaire j :

$$E\left(V_{2,k_{1j},k_{2j}+1}\right) = \frac{1-\sigma_{R2t}}{\beta_{2j}} w_t$$

Connaissant la valeur du profit du producteur intermédiaire (*cf.* équation 4.6), nous pouvons calculer l'équation de non-arbitrage dans le secteur de la R&D environnementale pour le bien intermédiaire j (deuxième ligne du système 4.8) :

$$\Pi_{jt}\left(k_{1jt},\, k_{2jt+1}\right) - \Pi_{jt}\left(k_{1jt},\, k_{2jt}\right) = \frac{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1}{q} \Pi_{jt}\left(k_{1jt+1},\, k_{2jt}\right)$$

Et, pour tout $\alpha < 0.5$:

$$\left[\Pi_{jt}\left(k_{1jt},\, k_{2jt}+1\right) - \Pi_{jt}\left(k_{1jt},\, k_{2jt}\right)\right] < \Pi_{jt}\left(k_{1jt}+1,\, k_{2jt}\right)$$

Ainsi, les gains instantanés générés par l'incorporation d'une innovation en qualité sont supérieurs aux gains réalisés grâce à l'incorporation d'une intensité polluante plus faible. De plus, cet écart est constant dans le temps.

Enfin, l'équation de non-arbitrage pour le secteur de la R&D environnementale pour le bien intermédiaire j se réécrit :

$$\begin{aligned} r_t + p_{k_{1j}+1,\, k_{2j}} = & \left[\frac{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1}{q}\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} L_{Yt} h_t^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}} Q_j q\right]^{\frac{\beta_2(k_{1j},\, k_{2j})}{(1-\sigma_{R2t})w_t}} \\ & + \left[\frac{\dot{Q}}{Q} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} + p_{1jt}\,(q-1)\right] \end{aligned} \tag{4.13}$$

avec $p_{k_{1j}+1,\, k_{2j}}$ la probabilité d'être remplacé, c'est-à-dire la probabilité de découverte dans le secteur de la R&D spécialisé dans la qualité du bien intermédiaire j.

Comme nous l'avons déjà dit, la contrainte de symétrie entre les deux secteurs

impose une valeur aux variables de Poisson que nous allons déterminer dans la section suivante.

4.4.8 La détermination des variables de Poisson et des efforts de recherche

L'endogénéisation des variables de Poisson

Le système d'équations de non-arbitrage dans la R&D est maintenant formé des équations (4.12) et (4.13) :

$$\begin{cases} p_{1j} = \frac{\beta_1(k_{1jt},k_{2jt})}{(1-\sigma_{R1})w_t}\left[\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}}L_{Yt}h_t{}^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}}q\right]Q_j + \left[\frac{\dot{Q}}{Q} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} + p_{2jt}.\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1\right)\right] - r_t \\ p_{1j} = \frac{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1}{q}\frac{\beta_2(k_{1j},k_{2j})}{(1-\sigma_{R2})w_t}\left[\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\alpha^{\frac{2}{1-\alpha}}L_{Yt}h_t{}^{\frac{-\alpha}{1-\alpha}}q\right]Q_j + \left[\frac{\dot{Q}}{Q} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} + p_{1jt}.(q-1)\right] - r_t \end{cases} \tag{4.14}$$

Les équations du système (4.14) ci-dessus impliquent que la probabilité d'innover p_{1j} varie avec les générations des innovations (notées k_{ij}, avec la firme de R&D $i = \{1, 2\}$ et le bien intermédiaire $j = \{1, 2\}$).

Deux effets de sens opposés peuvent expliquer cela :

- Premièrement, l'indice $Q_j = q^{k_{1jt}+\frac{\alpha}{1-\alpha}k_{2jt}}$ a une effet positif sur la probabilité d'innover. Q_j apparaît parce que le rendement attendu d'une innovation est croissant avec sa génération. En effet, la quantité de bien intermédiaire vendue augmente avec la génération ;

- Deuxièmement, le terme $\beta_i(k_{ij})$ indique, au contraire, que le fait d'innover devient plus difficile à mesure que s'améliorent les innovations de qualité standard et d'intensité polluante. Nous supposons donc que $\beta_i'(k_{ij}) < 0$.

Si ces deux effets sont tels qu'ils s'éliminent l'un et l'autre, alors les effets distorsifs au niveau des taux de dividendes disparaissent. La valeur des variables de Poisson doit donc permettre d'éviter qu'un effet ne domine l'autre. Sinon des profils divergents des taux de croissance apparaissent. Par exemple, lorsque le second effet domine le premier, les secteurs les plus avancés croissent lentement et le taux de croissance de l'économie diminue avec le temps. Cela est possible si, et seulement si, les variables de

Poisson ont la forme suivante (pour simplifier les calculs : on pose $\sigma_{R2} = \sigma_{R1} = \sigma_R$) :

$$\begin{cases} \beta_1(k_{1j}, k_{2j}) = \frac{1}{q.Q_j} \\ \beta_2(k_{1j}, k_{2j}) = \frac{q}{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1}.\beta_1(k_{1j}, k_{2j}) \end{cases} \tag{4.15}$$

On tire du système précédent que $\beta_{1j} < \beta_{2j}$.

Ensuite, avec les systèmes (4.15) et (4.14), nous pouvons écrire que $p_{1jt}(q-1) = p_{2jt}\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1\right)$, ce qui équivaut à :

$$L_{R_{2j_t}} = L_{R_{1j_t}}\left(\frac{q-1}{q}\right) \tag{4.16}$$

Et $L_{R_{2jt}} < L_{R_{1jt}}$ pour tout j et pour tout t : l'effort de recherche en qualité standard est supérieur à l'effort de recherche en intensité polluante. De plus, le rapport des efforts $\frac{L_{R_{2j}}}{L_{R_{1j}}}$ est croissant avec la taille du saut inventif q. Si l'incrément légal augmente, alors on favorise les innovations de type environnementale (z) en augmentant l'effort final de R&D dans ce secteur relativement à l'autre. La raison est que l'écart entre les améliorations dans les deux types d'innovations croît avec la taille du saut inventif. Lors du passage d'une génération à la suivante, l'amélioration de la qualité standard se fait d'un pourcentage égale à $(q-1)*100$, contre $\left(\frac{q-1}{q}\right)*100$ pour cent de réduction dans l'intensité polluante et nous avons effectivement $\frac{d(q-1)+\left(\frac{q-1}{q}\right)}{dq} > 0$.
L'équation (4.16) signifie également que la direction du changement technique est fortement encadrée ce qui résulte de la nécessité d'avoir une croissance régulière à long terme.

Maintenant, sachant que $p_{1jt}(q-1) = p_{2jt}\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1\right)$, l'évolution de l'indice de qualité agrégée s'écrit :

$$\overset{\bullet}{Q}_t = 2\left(\frac{q-1}{q}\right)L_{R1t}$$

soit, avec $\varphi_t \equiv \frac{L_t}{Q_t}$ et $n_{R1t} \equiv \frac{L_{R1t}}{L_t}$:

$$\frac{\overset{\bullet}{Q}_t}{Q_t} = 2\left(\frac{q-1}{q}\right)n_{R1t}\varphi_t \tag{4.17}$$

Dès lors que la taille de l'économie croît au taux constant $\frac{\dot{L}}{L} = l$, on tire de l'équation (4.17) que le taux de croissance de la qualité agrégée est constant à long terme si, et seulement si, la qualité agrégée croît avec la population. Il s'agit donc d'une crois-

sance de type semi-endogène avec une absence d'externalité de connaissance, ce qui reviendrait à avoir dans un cadre de travail à la Jones (1995 b) (*cf.* chapitre 1, section 1.3) : $\overset{\bullet}{Q}_t = 2\left(\frac{q-1}{q}\right) n_{R1t} L_t Q_t^{\phi}$ avec $\phi = 0$. Nous reviendrons sur les conséquences de ce résultat dans la section suivante.

Du système (4.14) de non-arbitrage pour un bien intermédiaire, on tire finalement une équation unique qui se réécrit :

$$p_{1jt} = \frac{1}{2-q}\left[\frac{\alpha}{(1-\sigma_{Rt})}\frac{L_{Yt}}{Q_t} + 2\left(\frac{q-1}{q}\right)\frac{L_{R1t}}{Q_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\overset{\bullet}{h}}{h} - r_t\right]$$

Enfin, d'après l'équation (4.11) :

$$E\left(V_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right) = (1-\alpha)(1-\sigma)\left(\frac{\alpha^2}{h_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} qQ_jQ$$

Et :

$$\frac{E\left(\overset{\bullet}{V}_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right)}{E\left(V_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right)} = \frac{\overset{\bullet}{Q}}{Q} + \frac{\overset{\bullet}{Q}_j}{Q_j} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\overset{\bullet}{h}}{h}$$

L'évolution de la valeur de l'innovation en qualité standard est donc :

- une fonction croissante de l'évolution de l'indice de qualité agrégée (Q) et de l'indice de qualité agrégée de son propre secteur (Q_j) ;
- une fonction décroissante de la taxe sur les émissions polluantes (h). C'est-à-dire que, toutes choses égales par ailleurs, plus le taux de taxe est élevé, plus la croissance de la valeur des innovations standard est réduite ce qui valorise, en terme relatif, la valeur des innovations environnementales (en intensité polluante).

Nous déterminons maintenant les niveaux des efforts de recherche dans les deux secteurs de R&D.

Les efforts de recherche

Pour la qualité standard A_{jt} :

En remplaçant la probabilité d'innover (*cf.* système 4.15) dans la fonction de production des innovations (équation 4.9), on obtient :

$$\frac{\overset{\bullet}{A}_{jt}}{A_{jt}} = \frac{\ln(q)}{q}\left(\frac{L_{R1jt}}{Q_{jt}}\right) \tag{4.18}$$

Pour l'intensité polluante z_{jt} :

De façon similaire, on a pour l'intensité de pollution :

$$\frac{\overset{\bullet}{z}_{jt}}{z_{jt}} = \frac{\ln\left(\frac{1}{q}\right)}{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1}\left(\frac{L_{R2jt}}{Q_{jt}}\right) \tag{4.19}$$

L'existence des externalités de connaissance inter-sectorielles (*cf.* système 4.15) a un effet externe négatif dans la production des innovations (*cf.* la présence de Q_j aux dénominateurs des fonctions de productions des deux types d'innovations - équations 4.18 et 4.19 -). Cela permet d'obtenir un taux de croissance équivalent pour tous les secteurs. Les secteurs les plus avancés attirent une plus grande part des dépenses en recherche puisqu'un effort plus important est requis pour générer la même probabilité de découverte que dans les autres secteurs.

Maintenant, si nous remplaçons la qualité agrégée du secteur j (Qj) dans les équations (4.18) et (4.19), nous pouvons caractériser précisément la nature des externalités inter-sectorielles. Si nous notons ϕ_{1A} et ϕ_{1z} les paramètres d'externalités de connaissance en A et en z respectivement, dans le secteur de R&D dans la qualité standard, et ϕ_{2A} et ϕ_{2z} pareillement pour le secteur de R&D dans l'intensité polluante, nous avons :

$$\begin{aligned} \phi_{1A} &= 0 \quad \text{et} \quad \phi_{1z} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \\ \phi_{2A} &= -1 \text{ et } \phi_{2z} = \frac{1}{1-\alpha} \end{aligned}$$

Des valeurs de ces paramètres, nous concluons, tout d'abord, que le secteur de R&D en qualité standard j voit sa recherche compliquée par l'activité du secteur de R&D en intensité polluante, alors que la connaissance dans son domaine (A_j) ne représente ni une complication (*fishing out*) ni une aide. Pour ce dernier phénomène, on parle d'une absence d'externalité de connaissance. Ensuite, pour le secteur de R&D en intensité polluante j, son activité de recherche est globalement rendue plus difficile (*fishing out*) par la connaissance accumulée dans son propre secteur et dans le secteur de R&D dans la qualité standard.

Enfin, à l'état stable, la constance des taux de croissance des innovations dans les

deux secteurs de R&D implique une croissance de type semi-endogène, soit :

$$\begin{aligned} g_{Q_j} &= l \ , \ \forall j \\ \text{et} \ \ g_Q &= l \end{aligned}$$

Le long terme est techniquement donné alors que la dynamique transitionnelle peut être influencée par l'effort de recherche qui reste endogène. À long terme, le nombre d'années qui sont nécessaires pour améliorer la qualité agrégée est donc égale à $\frac{1}{l}$: pour un taux de croissance de la population de 2 %, 50 années séparent deux innovations de qualité agrégée (Q).

De plus, sachant (4.16), si $\alpha < 0.5$ alors $\frac{1}{g_A} > \frac{1}{|g_z|}$ pour le bien j, ce qui signifie que le nombre d'année entre deux innovations standards est plus élevé que le nombre d'années entre deux innovations environnementales. Ce phénomène compense le fait que la réduction de l'intensité polluante soit plus faible que l'amélioration de la qualité standard.

Détermination des efforts de recherche dans les deux secteurs de R&D :

Nous savons que :

$$\begin{aligned} L_{R1k1jt} &= \frac{p_{1jt}}{\beta_1(k_{1j}, k_{2j})} \\ \text{„} &= \frac{qQ_{jt}}{2-q}\left[\frac{\alpha}{(1-\sigma_{Rt})}\frac{L_{Yt}}{Q_t} + 2\left(\frac{q-1}{q}\right)\frac{L_{R1t}}{Q_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} - r_t\right] \end{aligned}$$

Ainsi :

$$L_{R1t} = \int L_{R1jt}dj = \frac{qQ\left(\frac{\alpha}{1-\sigma}\frac{L}{Q} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} - r\right)}{4 - 3q + \frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)}$$

Le taux de croissance instantané des innovations s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{A}_{jt}}{A_{jt}} &= \frac{\ln(q)}{q}\left(\frac{L_{R1jt}}{Q_{jt}}\right) \\ \text{„} &= \frac{\ln q}{2-q}\left(\frac{\alpha}{(1-\sigma_{Rt})}\frac{L_{Yt}}{Q_t} + 2\frac{q-1}{q}\frac{L_{R1t}}{Q_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} - r_t\right) = \frac{\dot{A}_t}{A_t} \ , \quad \forall j \end{aligned}$$

Finalement, les facteurs travail alloués aux différents secteurs de l'économie sont les

suivants :

$$\begin{cases} L_{R1t} = \frac{qQ_t\left(\frac{\alpha}{1-\sigma}\frac{L_t}{Q_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} - r_t\right)}{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)} \\ L_{R2t} = \frac{(q-1)Q_t\left(\frac{\alpha}{1-\sigma}\frac{L_t}{Q_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} - r_t\right)}{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)} \\ L_{Yt} = \frac{(4-3q)L_t+(2q-1)Q_t\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{\dot{h}}{h} + r_t\right)}{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)} \end{cases} \tag{4.20}$$

4.5 Le gouvernement

Le rôle du gouvernement consiste à instaurer les trois instruments économiques correctifs que nous avons déjà rencontrés dans ce chapitre, afin d'internaliser les externalités de R&D et de pollution et de corriger les défaillances de marché.

4.5.1 L'équilibre du budget de l'État

L'équilibre fiscal du gouvernement s'écrit :

$$T_t + \sigma w_t \left(L_{R1t} + L_{R2t}\right) = (1-\tau)\, h_t P_{jt} \tag{4.21}$$

avec τ, la subvention à la production des biens intermédiaires ; h, la taxe sur les émissions polluantes ; σ, la subvention (ou taxation...) à la R&D.

Nous avons désormais l'ensemble des contraintes budgétaires et avons également décrit l'ensemble des équilibres sur les marchés composants notre économie. Il nous reste à déterminer l'équilibre macro-économique.

4.5.2 L'équilibre Emplois-Ressources

L'équilibre emplois-ressources de ce modèle sans capital physique est le suivant :

$$Y_t = C_t \tag{4.22}$$

La concordance entre la contrainte budgétaire des ménages (équation 4.1), l'équilibre fiscal du gouvernement (équation 4.21) et l'équilibre emploi-ressource précédent (équation 4.22) est assurée si $V_t = W_t$.

Démonstration :

Les équations (4.1), (4.21) et (4.22) nous donnent :
$\dot{W}_t = w_t L_t + rW_t - Y_t + (1-\tau)\, h_t P_{jt} - \sigma w_t \,(L_{R1t} + L_{R2t})$.
Ensuite, sachant que $Y_t = w_t L_{Yt} + \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj$ (le secteur final est en concurrence parfaite) et $\int_0^1 \Pi_{jt} dj = \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj - (1-\tau)\, h_t P_t = (1-\alpha) \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj$ (à partir de l'équation 4.6), on obtient :
$\dot{W}_t = (1-\sigma)\, w_t \,(L_{R1t} + L_{R2t}) + rW_t - (1-\alpha) \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj$.
Le marché de la recherche étant en concurrence, les profits des innovateurs s'annulent (ou conditions de libre-entrée) et on peut écrire :
$\dot{W}_t = \left[E\left(V_{k_{1j}+1,k_{2j}}\right).p_{1j,k_{1j}} + E\left(V_{2,k_{1j},k_{2j}+1}\right).p_{2j,k_{ij}}\right] + rW_t - (1-\alpha) \int_0^1 p_{jt} x_{jt} dj$.
La prise en compte de la condition de non-arbitrage (*cf.* système 4.14), nous permet finalement de conclure que : $V = W$.

Nous considérons donc que les brevets sont les actifs détenus par les ménages.

4.6 La dynamique de l'économie décentralisée

Nous pouvons maintenant calculer les taux de croissance des variables agrégées des sphères économique et environnementale et, ainsi, identifier le niveau de la taxe sur les émissions nécessaires pour atteindre un sentier de croissance durable au sens fort.

4.6.1 Les conditions de long terme du développement durable

D'après les résultats précédents, les taux de croissance à long terme sont donnés par :

$$\begin{aligned} g_y^d &= g_c^d = l - \frac{\alpha}{1-\alpha} g_h \\ g_P^d &= 2l - \frac{1}{1-\alpha} g_h \\ r_{ss}^d &= (\varepsilon + 1)\, l + \rho - \varepsilon \frac{\alpha}{1-\alpha} g_h \end{aligned} \tag{4.23}$$

À l'état stable de l'économie de laisser-faire, on aurait au contraire $g_c = g_y = g_p = l$. L'effet de la politique environnementale (*i.e.* $g_h > 0$) est de découpler les évolutions de la production et de la pollution, ce qui au final réduit le taux de croissance du produit à long terme. Il existe donc une politique environnementale telle que la croissance durable au sens fort (*i.e.* $g_y^d > 0$ et $g_P^d < 0$) est assurée :

$$\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) l > g_h > (1-\alpha)\, 2l$$

L'existence de l'inégalité précédente repose sur la condition $\alpha < 1/2$ qui est conforme aux estimations réalisées pour la part du "capital". Enfin, nous définissons les variables suivantes : soient $\bar{g}_h = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) l$ et $\underline{g}_h = (1-\alpha)\, 2l$, les taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes encadrant la politique environnementale.

Déterminons maintenant l'allure du sentier de croissance semi-endogène durable.

4.6.2 La dynamique transitionnelle

Une dynamique stable en point-selle

Le système dynamique de l'économie décentralisée en $(n_{Yt},\, \varphi_t)$ s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\overset{\bullet}{n_{Y_t}}}{n_{Y_t}} = -\frac{4-3q+2(q-1)\varepsilon}{(2q-1)\varepsilon}\varphi_t + \frac{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)+2(q-1)\varepsilon}{(2q-1)\varepsilon} n_{Yt}\varphi_t - \frac{1}{\varepsilon}(\rho+l) + \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}\right)\frac{\alpha}{1-\alpha} g_h \\ \\ \frac{\overset{\bullet}{\varphi_t}}{\varphi_t} = l - \frac{2(q-1)}{2q-1}\left(1-n_{Yt}\right)\varphi_t \end{array} \right. \tag{4.24}$$

Ce système dynamique possède une solution unique stationnaire $\left(n^d_{Yss},\, \varphi^d_{ss}\right)$ telle que $\overset{\bullet}{n_{Y_t}} = \overset{\bullet}{\varphi}_t = 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} n^d_{Yss} = \dfrac{\frac{4-3q+2(q-1)\varepsilon}{2(q-1)\varepsilon} l + \frac{1}{\varepsilon}(\rho+l) + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)\frac{\alpha}{1-\alpha} g_h}{\frac{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)+2(q-1)\varepsilon}{2(q-1)\varepsilon} l + \frac{1}{\varepsilon}(\rho+l) + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)\frac{\alpha}{1-\alpha} g_h} \\ \\ \varphi^d_{ss} = \dfrac{\frac{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)+2(q-1)\varepsilon}{2(q-1)} l + (\rho+l) - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha} g_h}{\frac{\alpha}{1-\sigma}} \end{array} \right. \tag{4.25}$$

La matrice jacobienne de ce système, évaluée à l'équilibre stationnaire, s'écrit :

$$J^d_{ss} = \begin{pmatrix} \frac{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)+2(q-1)\varepsilon}{(2q-1)\varepsilon} n^d_{Yss}\varphi_{ss} & \left[\frac{4-3q+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)+2(q-1)\varepsilon}{(2q-1)\varepsilon} n_{Yss} - \frac{4-3q+2(q-1)\varepsilon}{(2q-1)\varepsilon}\right] n_{Yss} \\ \frac{2(q-1)}{2q-1}\varphi^2_{ss} & -\frac{2(q-1)}{2q-1}\left(1-n_{Yss}\right)\varphi_{ss} \end{pmatrix}$$

Nous obtenons alors le déterminant de cette matrice :

$$\det\left(J_{ss}\right) = -\frac{2\left(q-1\right)}{2q-1}\left(\frac{\frac{\alpha}{\varepsilon}}{1-\sigma}\right)\varphi^2_{ss} n_{Yss} < 0$$

Le déterminant de la matrice précédente est négatif ce qui signifie que le système en n_Y et φ possède deux valeurs propres réelles et de signe opposé. Le système dynamique est composé d'une variable *forward* (ou "de saut") (n_Y) et d'une variable prédéterminée (φ). D'après les conditions de Blanchard et Khan, **l'équilibre stationnaire (4.25) du système formé par les équations dynamiques (4.24) des variables n_Y et φ est donc un point-selle**.

Le diagramme de phase

Le diagramme est réalisé en tenant compte de l'ensemble des conditions mis en évidence dans les sections précédentes, dont celle portant sur la taxe sur les émissions polluantes qui permet un développement durable (*i.e.* $g_h \in \left[\bar{g}_h, \underline{g}_h\right]$).

Le lieu de constance de la variable φ, c'est-à-dire le lieu des couples $(\varphi,\, n_Y)$ tels que $\dot{\varphi} = 0$, est donné par l'équation : $n_Y = 1 - \frac{2q-1}{2(q-1)}\frac{l}{\varphi}$. Il s'agit d'une courbe qui est croissante en φ.

Le lieu de constance de la variable n_Y, c'est-à-dire le lieu des couples $(\varphi,\, n_Y)$ tels que $\dot{n}_Y = 0$, est donné par la relation suivante : $n_Y = \frac{4-3q+2(q-1)\varepsilon+\left[\frac{(2q-1)\varepsilon}{\varepsilon}(\rho+l)-(2q-1)(\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h\right]\frac{1}{\varphi}}{4-3q+2(q-1)\varepsilon+\frac{\alpha}{1-\sigma}(2q-1)}$.
Cette relation est décroissante en φ.

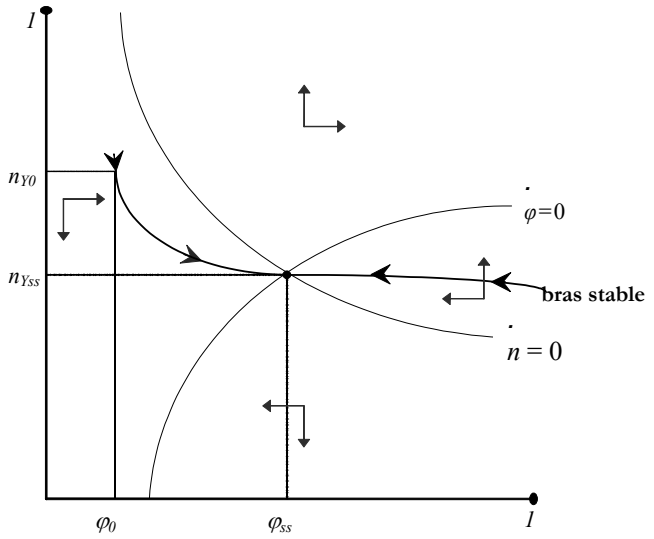


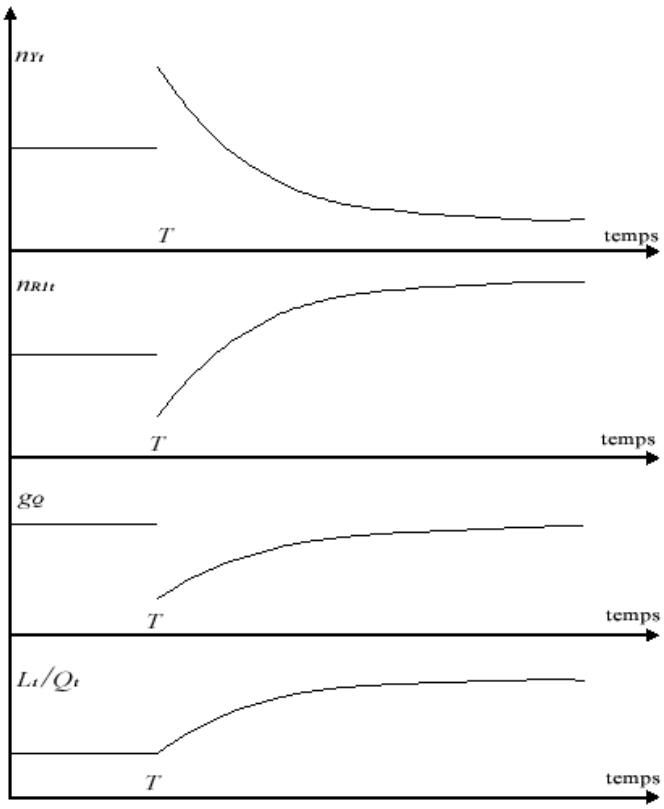
Diagramme de phase 4.a. Dynamique de l'économie décentralisée avec politique environnementale pour un développement durable de second rang, dans le plan (φ, n_Y).

Diagramme de phase pour le modèle non-linéaire formé par le système des équations dynamiques (4.24) avec $\varphi < 1$ et $n_Y < 1$. Ce système est stable le long du sentier-selle.

Pour la condition initiale sur la variable prédéterminée qui est présentée sur le graphique précédent (c'est-à-dire une valeur de $\varphi_0 \equiv (L/Q)_0$ plus faible que celle de l'équilibre de long terme), la dynamique transitionnelle consiste à réduire la part du travail allouée au secteur final (n_Y). Dans ce cas, comment expliquer que la variable φ ne diminue pas alors que, dans le même temps, l'intensité de la recherche croît ? En effet, on s'attend à avoir une augmentation de la production d'innovation telle que $\frac{\dot{Q}}{Q} > l$.

Pour comprendre la dynamique dans son ensemble, il faut la voir comme étant une transition de l'équilibre de l'économie de laisser-faire à l'équilibre de l'économie de

second-rang (c'est-à-dire caractérisée par un taux de croissance de la taxe permettant de découpler la production des émissions polluantes). Dans ce cas, l'augmentation de la part du travail allouée à la recherche est précédée d'un chute de cette variable qui est non-prédéterminée. Cette baisse initiale fait instantanément chuter le taux de croissance de l'indice de la qualité agrégée.[59] La dynamique transitionnelle correspond à un ajustement du taux de croissance de la qualité agrégée qui retrouve finalement sa valeur de long terme : l. Le graphique 4.g ci-dessous reprend la dynamique que nous venons de commenter :



Graphique 4.g. Dynamique transitionnelle des variables n_Y, n_{R1}, $\frac{\dot{Q}}{Q}$ et φ du modèle, à partir de l'équilibre de laisser-faire jusqu'à l'équilibre de second rang (le temps en abscisses).

Sur le graphique 4.g, la politique économique de second rang est mise en œuvre à la

[59] En effet, on a $\frac{\dot{Q}_t}{Q_t} = 2\left(\frac{q-1}{q}\right) n_{R1t}\varphi$, avec la variable prédéterminée φ qui peut être considérée comme une constante juste après le passage à l'économie de second-rang (soit T, la date non anticipée de ce passage) ; et si n_{R1t} chute juste après T, alors Q également.

date T : les variables non-prédéterminées "sautent", alors que la variable prédéterminée $\varphi_t = \frac{L_t}{Q_t}$ augmente, comme décrit sur le diagramme de phase 4.a.

Sur le diagramme de phase suivant (diagramme 4.b), nous décrivons l'impact d'une modification des instruments économiques sur l'équilibre de long terme. Ces résultats sont dérivés du système (4.25). Comme attendu, une baisse du taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes entraîne un effort de recherche plus faible. Au contraire, une hausse des subventions à la recherche a pour conséquence d'augmenter de façon définitive l'effort de recherche alors que le taux de croissance de long terme de l'indice de la qualité agrégée n'est pas modifié.

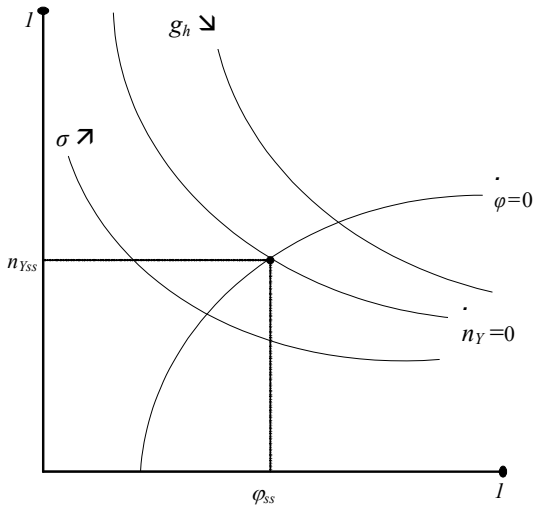


Diagramme de phase 4.b. Effet sur l'équilibre de long terme d'une modification des politiques environnementale et d'innovation, dans le plan (φ, n_Y), avec g_h le taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes et σ le taux de subvention à la R&D.

Enfin, à long terme, les valeurs des taux de croissance moyens de l'amélioration de la qualité standard et de réduction de l'intensité polluante sont constants et égaux à :

$$g_z = \int_0^1 g_{zj}dj = \ln\left(\frac{1}{q}\right)\frac{l}{2}\frac{2q-1}{2q\left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}-1\right)}$$

$$g_A = \int_0^1 g_{Aj}dj = \ln q\frac{l}{2}\frac{2q-1}{2\,(q-1)}$$

Pour une valeur du saut inventif de 4 et une croissance de la population de 1.5 % par an, nous avons à long terme :

- une innovation en intensité polluante toutes les 65 années (en moyenne) qui correspond à une réduction de 75 % de l'intensité polluante, soit une réduction de 1.15 % par an en moyenne ;
- une augmentation de la qualité standard toutes les 83 années (en moyenne), pour une amélioration de 300 %, soit une amélioration moyenne et par an de 3.61 %.

Déterminons maintenant l'équilibre et la dynamique de l'économie centralisée.

4.7 La dynamique de l'optimum social

La détermination du niveau optimal des instruments économiques nécessite de définir au préalable les objectifs collectifs à atteindre.

4.7.1 Les données macro-économiques pour le planificateur

Conformément aux résultats mis en évidence dans les chapitres précédents, on sait que la valeur optimale de la subvention à la production des biens intermédiaires vaut exactement $1-\alpha$, puisque le paramètre α est le taux de marge appliqué par la firme intermédiaire. Soit :

$$\left(\frac{x_{jt}}{L_{Yt}}\right)^{o} = \left[\frac{\alpha^2}{(1-\tau^o)\, h_t z_{jt}}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}} = \left(\frac{\alpha}{h_t z_{jt}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

où $\left(\frac{x_{jt}}{L_{Yt}}\right)^{o}$ est la quantité optimale demandée qui diffère des résultats de l'économie décentralisée (*cf.* système 4.5).

Afin d'exprimer le problème du planificateur en fonction de l'indice de qualité agrégée (Q), nous déterminons les agrégats économiques suivants :

- Pour le produit final et la consommation totale :

$$\begin{aligned} C_t &= Y_t = \int_0^1 L_{Yt}^{1-\alpha} A_{jt} x_{jt}^{\alpha} dj = L_{Yt} \left(\frac{\alpha}{h_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \int_0^1 Q_{jt} dj \\ &" = L_{Yt} \left(\frac{\alpha}{h_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} Q_t \end{aligned}$$

- Pour le flux d'émission polluante :

$$P_t = \int_0^1 z_{jt} A_{jt} x_{jt} d_j = L_{Yt} \left(\frac{\alpha}{h_t}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} Q_t$$

Soit :

$$\frac{h_t P_t}{Y_t} = \alpha$$

D'après l'équation précédente, les recettes fiscales liées à l'environnement sont une partie (constante pour tout t) du produit final qui est exactement égale à la part du facteur de production qui pollue (x).

Nous restreignons notre analyse au cas où $L_{R2} = \left(\frac{q-1}{q}\right) L_{R1}$ (*cf.* économie décentralisée, équation 4.16) qui correspond à l'existence de l'équilibre de l'économie décentralisée. Dans ce cas, la variation de Q_t s'écrit (*cf.* annexe E pour la démonstration) :

$$\dot{Q}_t = 2 \left(\frac{q-1}{q}\right) L_{R1t}$$

Ces calculs préalables achevés, nous pouvons résoudre le programme du planificateur social.

4.7.2 Le critère de la maximisation du bien-être

Le planificateur social maximise l'utilité intertemporelle de l'agent représentatif dans le but de déterminer les valeurs optimales de l'effort de recherche (L_{R1t}) et de la taxe sur les émissions polluantes (h_t). Les variables d'état sont l'indice de qualité agrégée (Q_t) et le stock de pollution (S_t). Le programme s'écrit :

$$\left\{\begin{array}{ll} \max\limits_{\{(L_{Rt},\, h_t)\}_{t=0}^{+\infty}} & \int\limits_0^{\infty} e^{-\rho t} U_t(c_t, S_t)dt \\ \text{s. c. } / & \left|\begin{array}{c} \dot{Q}_t = 2\left(\frac{q-1}{q}\right) L_{R1t} \\ \dot{S}_t = P_t - \Theta S_t \\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{\rho t}\vartheta_t Q_t \geqslant 0 \\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{\rho t}\zeta_t S_t \geqslant 0 \\ Y_t = C_t \geqslant 0,\, Q_t \geqslant 0,\, S_t \geqslant 0 \\ Q_0 \text{ et } S_0 \text{ connues} \end{array}\right. \end{array}\right. \tag{4.26}$$

avec ρ est le taux de préférence pour le présent. L'annexe E présente les étapes de calculs.

4.7.3 La dynamique transitionnelle

Tout d'abord, le système dynamique de l'économie centralisée est donné par :

$$\left\{\begin{array}{rc} & g_\varphi = l - \frac{2(q-1)}{2q-1}\left(1 - n_Y\right)\varphi \\ g_{n_Y} = & \left[\frac{2(q-1)}{2q-1}\left[1 - \left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right] - \left[\varepsilon - \left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right]\right]\frac{\varphi}{\varepsilon} \\ & +\frac{1}{\varepsilon}\left[\varepsilon - \left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right] n_Y\varphi + \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}\right)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h - \frac{\rho+l}{\varepsilon} \end{array}\right.$$

À l'état stable, nous avons $g_\varphi = g_{n_Y} = 0$, soit :

$$\left\{\begin{array}{l} n_{Yss}^o = \frac{\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho}{\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho + l} \\ \varphi_{ss}^o = \frac{\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho + l}{\frac{2(q-1)}{2q-1}} \end{array}\right. \tag{4.27}$$

Nous remarquons que l'effort de recherche augmente avec le taux de croissance de la taxe sur émissions polluantes[60], ce qui valide l'hypothèse Porter et van der Linde (1995) à savoir que la réduction de la pollution tend à stimuler l'innovation.

[60] En effet, $\frac{\partial n_{Yss}^o}{\partial g_h} = \frac{-(\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}l}{\left[\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho + l\right]^2} < 0.$

Enfin, la matrice jacobienne du système dynamique de (φ, n_Y), évaluée à l'état stationnaire, s'écrit :

$$J^o_{ss} = \begin{pmatrix} -\frac{2(q-1)}{2q-1}\left(1-n_{Yss}\right)\varphi_{ss} & \frac{2(q-1)}{2q-1}\varphi^2_{ss} \\ \left[\begin{array}{c}\frac{2(q-1)}{2q-1} \\ -\varepsilon\left(1-n_{Yss}\right)\end{array}\right]\frac{n_{Yss}}{\varepsilon} & \varepsilon\frac{n_{Yss}\varphi_{ss}}{\varepsilon} \end{pmatrix}$$

Nous avons un déterminant de la jacobienne qui vaut exactement :

$$\det\left(J^o_{ss}\right) = -\left[\frac{2\left(q-1\right)}{2q-1}\right]^2\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)\varphi^2_{ss} < 0$$

Le déterminant est négatif. D'après les conditions de Blanchard et Kahn, l'équilibre stationnaire de ce système est un point-selle.

Le diagramme de l'économie centralisée est dans ce cas équivalent à celui de l'économie centralisée avec l'introduction des instruments (diagramme de phase 4.a). Seule les valeurs des conditions finales diffèrent lorsque les niveaux optimaux des instruments économiques sont mis en œuvre.

4.8 La politique économique optimale

La comparaison des économies centralisée et décentralisée nous permet maintenant de déterminer la politique optimale.

4.8.1 La taxe sur les émissions polluantes

Le long du sentier de transition, l'évolution optimale de la taxe sur les émissions polluantes est donnée par la relation $g^o_{h_t} = \varepsilon g_{c_t} - b_t + l + \rho + \Theta$ avec $b_t \equiv \frac{S^{\varpi}_t}{\zeta_t}$ et g_{c_t} qui sont des constantes à l'équilibre de long terme (*cf.* annexe E). Le taux de croissance de la taxe optimale prend donc une valeur constante à long terme qui est la suivante :

$$g^o_{hss} = \frac{\left(1-\alpha\right)\left(1+\varepsilon+2\varpi\right)}{\left(1-\alpha\right)+\varpi+\left(\varepsilon-1\right)\alpha}l \tag{4.28}$$

Nous vérifions que la valeur optimale du taux de croissance de la taxe permet effectivement d'atteindre un développement durable, soit $g^o_{hss} \in \left[\bar{g}_h, \underline{g}_h\right]$.[61] Cela est vérifié

[61] Pour rappel : $\bar{g}_h = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right) l$ et $\underline{g}_h = \left(1-\alpha\right) 2l$.

si, et seulement si :

$$\varepsilon > 1 \text{ et } \alpha < 1/2$$

Cette première condition est relative à l'élasticité de substitution intertemporelle ($\frac{1}{\varepsilon}$). Elle est conforme aux résultats mis en évidence par Stockey (1998) (*cf.* chapitre 1) et reflète la volonté des consommateurs à substituer fortement de la consommation présente en faveur de la consommation future, afin de réaliser les efforts de court terme qui sont nécessaires à l'amélioration des technologies permettant un développement durable.

Quelles sont les effets d'une modification des principaux paramètres α et l ? À partir de l'équation (4.28), nous calculons que $\frac{dg^o_{hss}}{d\alpha} = -\frac{[\varpi+(\varepsilon-1)](1+\varepsilon+2\varpi)}{[(1-\alpha)+\varpi+(\varepsilon-1)\alpha]^2} < 0$ et $\frac{dg^o_{hss}}{dl} = \frac{(1-\alpha)(1+\varepsilon+2\varpi)}{(1-\alpha)+\varpi+(\varepsilon-1)\alpha} > 0$. Les effets sont équivalents pour $\left[\bar{g}_h, \underline{g}_h\right]$.
Quand α augmente, la plage des taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes permettant un développement durable diminue ($\frac{\partial \bar{g}_h}{\partial \alpha} < 0$ et $\frac{\partial \underline{g}_h}{\partial \alpha} < 0$) et son intervalle se réduit (puisque $\frac{\partial\left(\bar{g}_h - \underline{g}_h\right)}{\partial \alpha} < 0$). Cela tient au fait qu'avec un pouvoir de monopole (α) plus élevé, les firmes intermédiaires financent davantage la recherche grâce à des profits supérieurs.
Par contre, quand l augmente, le phénomène inverse se dessine : les valeurs augmentent et l'écart entre elles également. Un taux de croissance plus élevé de la population équivaut à long terme à une augmentation du taux de croissance de l'indice de qualité agrégée et, par la même, de la croissance économique et des émissions polluantes.

Nous illustrons, maintenant, l'effet de la politique environnementale à l'aide d'un exemple numérique. L'annexe F présente les hypothèses (valeurs des paramètres) et les calculs. Pour les valeurs données aux paramètres, conformément à la littérature et aux données française pour la politique économique ($g_h = 2$ %), nous calculons un taux de croissance des émissions à long terme qui est positif. En effet, cette politique environnementale est inférieure à la plage des taxes sur les émissions polluantes qui permet d'atteindre une croissance durable au sens fort. Pour les valeurs données aux paramètres, le taux de croissance de la production par tête vaut 0.83 % à long terme, le taux de croissance des émissions polluantes est de 0.33 %. Enfin, la part du travail

allouée au secteur final est bien entendu plus importante que par rapport à l'optimum : 91.61 % contre 80.12 %, preuve que l'on ne fait pas assez de R&D par rapport à l'optimum collectif.

4.8.2 L'aide à la recherche et développement

Une fois le taux de croissance de la taxe sur les émissions polluantes déterminé (équation 4.28), l'instrument économique d'aide à la recherche et développement, qui permet l'égalisation des intensités de la recherche des équilibres centralisé et décentralisé, peut être calculé :

$$\sigma^o = 1 - \frac{\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon - 1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho}{\left[\frac{4-3q}{2(q-1)}l + (\varepsilon+1)\,l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho\right]\frac{2(q-1)}{2q-1}\frac{1}{\alpha}}$$

Il peut s'agir d'une subvention ou d'une taxe à la R&D suivant la valeur des paramètres, et principalement du paramètre relatif au saut inventif (q). Pour les valeurs qui ont été retenues dans la section précédente (*cf.* annexe F), l'instrument optimal est une subvention (66.12 %). L'impact de l'instrument sur le long terme a déjà été étudié lors du commentaire qui accompagnait le diagramme de phase 4.b.

Enfin, si le paramètre α augmente alors σ^o diminue. Le mécanisme économique à l'origine de ce résultat est maintenant connu : l'augmentation de la part du bien intermédiaire dans la production finale vient élever le pouvoir de monopole du secteur des biens intermédiaires et, du même coup, les investissements en R&D. En effet, l'impact de α sur la part du travail allouée au secteur final est conforme à cette analyse : la part diminue avec ce paramètre (première ligne du système 4.27)[62].

[62] Soit $\frac{\partial n^o_{Y_{ss}}}{\partial \alpha} = \frac{-(\varepsilon-1).l.g_h}{\left[\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho + l\right](1-\alpha)^2} < 0$ avec $\frac{2q-1}{2(q-1)}\varepsilon l - (\varepsilon-1)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h + \rho + l > 0$ par hypothèse.

Conclusion

Notre démarche a été différente de celle adoptée dans les chapitres précédents, dans la mesure où nous n'avons pas spécifié au départ les hypothèses sur lesquelles nous nous basions ; mais avons, au contraire, cherché à déterminer les conditions permettant d'atteindre nos objectifs de modélisation. Cette démarche est, à nos yeux, celle qui rend le mieux compte des apports de notre modèle et de ses différences avec la littérature existante. De plus, nous avons estimé que la rédaction d'une thèse donnait l'occasion (ou permettait) de procéder ainsi. Nos objectifs de modélisation se résument à l'obtention d'un sentier de croissance équilibrée durable qui est fondé sur des activités distinctes de R&D qui soit améliorent la qualité standard des biens intermédiaires, soit réduisent leur intensité polluante.

Nous avons démontré l'importance (voire la nécessité) de la prise en compte du caractère semi-endogène de la croissance dans la cadre de l'analyse des liens entre la technologie et l'environnement. Ce résultat nous semble d'autant plus général que nous ne reprenions pas *a priori* les hypothèses de Jones relatives aux externalités dans la R&D (ces paramètres exogènes conduisant automatiquement à la semi-endogénéité de la croissance). Au contraire, la prise en compte des externalités de connaissance inter-industrielles entre les deux dimensions verticales des biens intermédiaires est rendue nécessaire pour la résolution de notre modèle. Ces externalités de connaissance sont ensuite à l'origine de la semi-endogénéité de la croissance à long terme.

Par ailleurs, concernant la question des caractéristiques techniques multiples d'un bien (autrement dit des différentes dimensions qualitatives), Li (2003) tente une généralisation des résultats pour $k > 1$ dimensions qualitatives mais sans fournir un cadre micro-économique à sa démonstration. Le modèle présenté dans ce chapitre fournit donc un cadre d'analyse micro-économiquement fondée à cette problématique. De plus, il trouve une application forte et directe dans le domaine de l'économie de l'environnement et du progrès technique, si on considère que les biens sont caractérisés par des intensités polluantes dont l'évolution serait de nature technologique.

Enfin, les externalités entre les secteurs de R&D, qui améliorent deux dimensions

de différenciation verticale pour un même bien, rendent les efforts de recherche des deux secteurs dépendants l'un de l'autre. Bien qu'il s'agisse de secteurs distincts, l'intensité de la recherche d'un secteur relativement à l'autre est constante dans le temps. Les intensités de la recherche des deux secteurs varient donc dans la même direction, c'est-à-dire à la hausse si une politique de soutien de l'innovation est mise en œuvre. Mais la politique environnementale qui consiste à augmenter le prix de la ressource naturelle reste une condition préalable pour la diffusion des innovations sur les intensités polluantes.

Le fait que les efforts de recherche des deux secteurs de R&D soient "liés" peut être ressenti comme une limite de notre analyse. On peut en effet être amené à penser que le fait de promouvoir le développement durable passe par un investissement massif dans les innovations environnementales uniquement, conduisant ainsi à un effet d'éviction en défaveur de la recherche dans les innovations standards. L'accumulation des connaissances dans les deux domaines est en fait nécessaire dans la mesure où cette accumulation rend plus difficile (phénomène dit de *fishing out*) l'apparition d'idées nouvelles dans une direction de la R&D, comme dans l'autre. L'existence d'externalités de connaissance inter-sectorielles explique ce phénomène.

Annexe E. L'optimum

Détermination de $\dot{Q}$

La variation de l'indice de qualité agrégée est donnée par :

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_t &= \int_0^1 \left[\frac{d\left(q^{k1j}\right)}{dt} q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} + q^{k1j} \frac{d\left(q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j}\right)}{dt} \right] dj \\
" &= \int_0^1 \left[p_{1jt} \left(q^{k1j+1} - q^{k1j}\right) q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} + q^{k1j} p_{2jt} \left(q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)(k2j+1)} - q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} \right) \right] dj \\
" &= \int_0^1 \left[\frac{L_{R1jt}}{q.Q_j} (q-1) q^{k1j} q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} + \left(\frac{q}{q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1} \right) \frac{L_{R2jt}}{q.Q_j} \left(q^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - 1 \right) q^{k1j} q^{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)k2j} \right] dj \\
" &= \int_0^1 \left[\left(\frac{q-1}{q} \right) L_{R1jt} + L_{R2jt} \right] dj
\end{aligned}$$

Grâce à la propriété de linéarité des intégrales, on peut écrire :

$$\dot{Q}_t = \left(\frac{q-1}{q} \right) \int_0^1 L_{R1jt} dj + \int_0^1 L_{R2jt} dj$$

Si on pose $L_{R2} = \left(\frac{q-1}{q}\right) L_{R1}$ (*cf.* économie décentralisée : équation 4.16), alors :

$$\dot{Q}_t = 2 \left(\frac{q-1}{q} \right) L_{R1t}$$

Problème du Planificateur

L'hamiltonien courant lié au problème (4.26) est le suivant :

$$\begin{aligned}
H &= U(c,S) + \vartheta \dot{Q} - \zeta \dot{S} \\
" &= \frac{\left[\left(\frac{\alpha}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{L - \left(\frac{2q-1}{q}\right) L_{R1}}{L} Q \right]^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - \frac{B S^{1+\varpi}}{1+\varpi} + \vartheta \frac{2(q-1)}{q} L_{R1} \\
&\quad -\zeta \left[\left(\frac{\alpha}{h}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(L - \left(\frac{2q-1}{q} \right) L_{R1} \right) Q - \Theta S \right]
\end{aligned}$$

Les conditions d'optimalité du premier ordre d'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_c}{\partial L_{R1}} = 0 \\ \frac{\partial H_c}{\partial h} = 0 \\ \frac{\overset{\bullet}{\vartheta}}{\vartheta} = \rho - \frac{1}{\vartheta}\frac{\partial H_c}{\partial Q} \\ \frac{\overset{\bullet}{\zeta}}{\zeta} = \rho + \frac{1}{\zeta}\frac{\partial H_c}{\partial S} \end{cases}$$

ce qui donne finalement :

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{\alpha}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{L-\left(\frac{2q-1}{q}\right)L_{R1}}{L} Q\right]^{-\varepsilon} = 2\left(\frac{q-1}{2q-1}\right)\vartheta\frac{L}{Q}\left(\frac{\alpha}{h}\right)^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ 2\left(\frac{q-1}{2q-1}\right)\frac{\vartheta}{Q} = \alpha^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\frac{\zeta}{h} \\ \frac{\overset{\bullet}{\vartheta}}{\vartheta} = \rho - 2\left(\frac{q-1}{2q-1}\right)\left(L - \left(\frac{2q-1}{q}\right)L_{R1}\right)\left[1 - \left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right]\frac{1}{Q} \\ \frac{\overset{\bullet}{\zeta}}{\zeta} = \rho + \Theta - B\frac{S^{\varpi}}{\zeta} \end{cases} \tag{4.29}$$

Le taux de croissance optimale de la taxe sur les émissions polluantes

Le long du sentier de transition, l'évolution optimale de la taxe sur les émissions est $g_h^o = \frac{\dot{Q}}{Q} - \frac{\overset{\bullet}{\vartheta}}{\vartheta} + \frac{\overset{\bullet}{\zeta}}{\zeta}$ (seconde ligne du système 4.29). À l'aide des équations des systèmes (4.29) et (4.27), nous trouvons finalement que :

$$g_{hss}^o = \frac{(1-\alpha)(1+\varepsilon+2\varpi)}{(1-\alpha)+\varpi+(\varepsilon-1)\alpha} l$$

À long terme, un taux de croissance positif de la taxe a pour condition suffisante $\varepsilon \geqslant 0$ et $\alpha < 1/2$.

Dynamique transitionnelle

Un état stationnaire (n^o_{Yss}, n^o_{R1ss}, φ^o_{ss}, N^o_{ss}) optimal de l'économie, avec $n_{_Y} \equiv \frac{L_Y}{L}$, $n_{R1} \equiv \frac{L_{R_1}}{L}$, $\varphi \equiv \frac{L}{Q}$, $N \equiv \frac{P}{S}$, est une solution stationnaire du système dynamique (4.29) formé par les conditions nécessaires d'optimalité.

Le système dynamique se réduit à deux dimensions :

$$\left\{ \begin{array}{c} g_\varphi = l - \frac{2(q-1)}{2q-1}\left(1-n_Y\right)\varphi \\ g_{n_Y} = \begin{array}{c} \frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{2(q-1)}{2q-1}\left[1-\left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right]-\left[\varepsilon-\left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right]\right]\varphi \\ +\frac{1}{\varepsilon}\left[\varepsilon-\left(\frac{1}{h}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\alpha\right]n_Y\varphi+\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}\right)\frac{\alpha}{1-\alpha}g_h-\frac{\rho+l}{\varepsilon} \end{array} \end{array} \right. \tag{4.30}$$

La variable N a une évolution extérieure au cœur du modèle.

Conditions d'existence du sentier optimal de croissance durable

Nous devons vérifier les 3 ensembles de conditions suivants pour démontrer l'existence de la trajectoire de croissance :

- Le taux de croissance d'équilibre doit être positif et, de façon plus générale, toutes les contraintes de signes ou d'encadrement des variables doivent être respectées.
- L'utilité intertemporelle des consommateurs doit être bornée $\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t,S_t) = 0$.

Démonstration :

$$\begin{aligned} \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}U_t(c_t,S_t) &= 0 \Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\left[\frac{c_t^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon}-\frac{S_t^{1+\varpi}}{1+\varpi}\right]=0 \\ &\text{"} \Longleftrightarrow \lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g^o_c\cdot t}c_0\right)^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon}-\lim_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\frac{\left(e^{g^o_S\cdot t}S_0\right)^{1+\varpi}}{1+\varpi}=0 \\ &\text{"} \Longleftrightarrow (1-\varepsilon)\,g^o_c-(1+\varpi)\,g^o_S<0 \\ &\text{"} \Longleftrightarrow (1-\varepsilon)\left(l-\frac{\alpha}{1-\alpha}g^o_h\right)-(1+\varpi)\left(2l-\frac{1}{1-\alpha}g^o_h\right)>0 \\ &\text{"} \Longleftrightarrow g^o_h > \frac{(\varepsilon-1)+2\,(1+\varpi)}{(\varepsilon-1)\,\alpha+(1+\varpi)}\,(1-\alpha)\,l \end{aligned}$$

Cette inégalité est toujours vérifiée pour g^o_h déterminé par l'équation (4.28).

- Les conditions de transversalité liées au problème (4.26) doivent être vérifiées
$$\begin{cases} \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\vartheta_t Q_t = 0 \ (i) \\ \lim\limits_{t\to+\infty} e^{-\rho t}\zeta_t S_t = 0 \ (ii) \end{cases}.$$

Démonstration :

(i) équivaut à ce que $e^{-\rho t}\vartheta_t Q_t$ ait un taux de croissance négatif à l'état stable, soit $l < \frac{2(q-1)}{4q-3}$ ce qui est vérifié, dans le cas le plus restrictif, pour $l < 0.6$ avec $\alpha < 1/2$, c'est-à-dire en saturant la condition (4.7). $l < 0.6$ et $\alpha < 1/2$ sont conformes aux estimations et aux valeurs utilisées dans la littérature.

(ii) est vérifiée si à l'état stable $\zeta_t S_t$ croît à un taux négatif. Ce taux est égale à $(\varpi+1)\, g_S^o = (\varpi+1)\left(2l - \frac{1}{1-\alpha} g_{hss}^o\right)$. Or d'après la valeur de g_h^o qui a été déterminé par l'équation (4.28), on a effectivement un taux de croissance de $\zeta_t S_t$ qui est négatif à l'état stable.

Annexe F. La politique de second rang

L'application numérique est réalisée à l'aide des données utilisées dans le chapitre précédent. Il s'agit de valeurs qui sont tirées de la littérature :

$\mathbf{q}$	$\boldsymbol{\rho}$	$\mathbf{l}$	$\boldsymbol{\varepsilon}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\varpi}$
4	0.04	0.015	1.5	0.25	0.5

Pour le niveau des instruments de la politiques économique, les estimations ont été réalisées à partir de données françaises (*cf.* chapitre 3 pour les détails et les commentaires[63]) :

$\boldsymbol{\tau}$	$\mathbf{g}_h$	$\boldsymbol{\sigma}$
0	0.02	0.1174

Pour les valeurs données aux paramètres, le taux de croissance de la production par tête vaut 0.83 % à long terme (première ligne du système 4.23), le taux de croissance des émissions polluantes est positif, soit exactement 0.33 % (seconde ligne du système 4.23). Enfin, la part du travail alloué au secteur final est bien entendu plus importante que par rapport à l'optimum : 91.61 % (première ligne du système 4.25) contre 80.12 % (première ligne du système 4.27), signe qu'on ne fait pas assez de R&D.

Enfin, pour les innovations, nous pouvons calculer les taux de croissance des deux secteurs de R&D qui sont équivalents à long terme dans les économies centralisée et décentralisée, puisque nous sommes sur un sentier de croissance semi-endogène : une innovation en intensité polluante arrive en moyenne tous les 65 ans soit une diminution de l'intensité moyenne et par an de 1.15 % ; l'amélioration de la qualité standard intervient tous les 83 ans en moyenne, soit une amélioration de la qualité de l'ordre de 3.6 % environ.

[63] Nous ajoutons que seule la valeur de la subvention à la production des biens intermédiaires est modifiée par rapport au chapitre 3 : ici son niveau est nul dans la mesure où notre analyse n'a pas beaucoup porté sur cet instument dont les effets ont été étudiés dans les chapitres précédents. De plus, pour des raisons techniques, il était plus simple de ne pas prendre en compte l'instrument dans l'exemple numérique, afin d'éviter de devoir augmenter la valeur du paramètre q pour satisfaire la condition (4.7) sur la taille minimale du saut inventif.

Références bibliograhiques

[1] **Acemoglu, D.** (2002) "Directed Technical Change", *Review of Economic Studies* **69**, 781-809.

[2] **Acemoglu, D.** (2003) "Labor and capital-augmenting technical change", *Journal of the European Economic Association* **1** (1), 1-37.

[3] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[4] **Barro, R. & X. Sala-I-Martin** (1995) *Economic Growth*, Mac Graw-Hill New-York.

[5] **Eriksson, C.** (2004) "Directed Techninal Change with Endogenous Supplies of Energy and Labor", document de travail *University of Uppsala*, Mars.

[6] **Griliches, Z.** (1992) "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics* supplement **92** (94), 29-47.

[7] **Griliches, Z.** (1995) "R&D and Productivity: Econometric Results and Measurement Issues", Chapitre 3 dans *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change* P. Stoneman éds. Oxford: Blackwell, 52-89.

[8] **Grossman, G. & E. Helpman** (1991) "Quality Leaders in the Theory of Growth", *Review of Economic Studies* **58** (1), 43-61.

[9] **Hart, R.** (2004) "Growth, Environment and Innovation: A Model with Production Vintage and Environmentally Oriented Research", *Journal of Environmental Economics and Management* **48** (3) Novembre, 1078-1098.

[10] **Howarth, R. B. & R. B. Norgaard** (1992) "Environmental Valuation under Sustainable Development", *American Economic Review* **80**, 473-477.

[11] **Jones, C. I.** (1995 a) "Time Series Tests of Endogenous Growth Models", *Quarterly Journal of Economics* **110** (2) Mai, 495-525.

[12] **Jones, C. I.** (1995 b) "R&D-Based Models of Economic Growth", *Journal of Political Economy* **103** (4) Août, 759-784.

[13] **Li, C. W.** (2000) "Endogenous vs. semi-endogenous growth in a two R&D-sector model", *Economic Journal* **110** (C), 109-122.

[14] **Li, C. W.** (2001) "On the Policy Implications of Endogenous Technological Progress", *Economic Journal* **111** (C) Mai, 164-179.

[15] **Li, C. W.** (2002) "Growth and scale effects: the role of knowledge spillovers", *Economics Letters* **74**, 177-185.

[16] **Li, C. W.** (2003) "Endogenous without Scale: A Comment", *American Economic Review* **93**, 1009-1018.

[17] **Michel, P.** (1993) "Pollution and Growth Toward the Ecological Paradise", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (80.93).

[18] **de Nooij, M. & S. Smulders** (2003) "The impact of energy conservation on technology and economic growth", *Resource and Energy Economics* **25** (3), 59-79.

[19] **Porter, M. E. & C. van der Linde** (1995) "Toward a new concept of environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives*, **9** (4), 97-118.

[20] **Ricci, F.** (2002) "Environmental Policy and Growth when Inputs are Differentiated in Pollution and Intensity", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (16).

[21] **Saint-Paul, G.** (2002) "Environmental Policy and Directed Innovation in a Schumpeterian Growth Model", document de travail *IDEI* (153).

[22] **Segerstrom, P.** (2005) "Intel Economics", *International Economic Review* à paraître.

[23] **Smulders, S.** (2004) "Non-renewable Resources and Economic Growth: Comparing the classics to new models of endogenous technology and growth", Colloque *EAERE-FEEM-VIU Summer School in Resource and Environmental Economics* Juin.

Conclusion générale

Les principaux messages de la thèse

Les théories économiques sur les liens entre la croissance et l'environnement qui ont été développées dans cette thèse démontrent que les sentiers de croissance qui sont basés sur la dématérialisation des activités permettent de dépasser les enjeux environnementaux. Notre travail de recherche a également permis de préciser que les solutions techniques permettant de découpler la production économique des atteintes à l'écosystème reposaient sur un ensemble de conditions fortes portant sur les caractéristiques, à la fois, du critère de choix social, des technologies et de l'écosystème lui-même. C'est pourquoi, nous avons insisté sur ces trois principales conditions. Nous les reprenons ici et tentons d'en élargir la portée.

Premièrement, la caractéristique du choix social consiste en la volonté des agents à substituer fortement de la consommation présente en faveur de la consommation future, afin de réaliser les efforts de court et moyen terme nécessaires à la découverte des technologies permettant un développement durable. Cette première condition est transversale à l'ensemble de la thèse.
L'efficacité des politiques repose donc, *in fine*, sur le comportement des ménages, lequel peut sans doute se modifier en faveur d'une plus grande protection de l'environnement au moyen d'une sensibilisation aux enjeux environnementaux et de ses conséquences intergénérationnelles. L'acceptabilité des politiques peut s'appuyer sur cette sensibilisation mais elle butte souvent sur les inégalités de types intragénérationnelles. Nous reviendrons sur ce point en fin de conclusion.

Deuxièmement, l'efficacité de la recherche a été évaluée dans notre travail au moyen des technologies propres ou d'un biais du progrès technique en faveur de la qualité de l'environnement. Nous avons démontré que la politique environnementale constitue un facteur d'émergence d'un changement technique propre, puis un facteur d'incitation

à sa diffusion. Mais la politique environnementale doit également être accompagnée d'une politique technologique volontariste. En effet, seul un soutien direct, à travers la mise en œuvre de politiques publiques fortes, permet au système économique d'allouer suffisamment de ressources à la recherche et au développement des technologies qui permettront de garantir un développement respectueux du bien-être des générations présentes et futures et, par la même, améliorant la qualité de l'environnement.

Troisièmement, les mécanismes naturels de régénération de l'écosystème doivent permettre d'assimiler les émissions polluantes à un rythme adéquat au développement durable. Faute d'un paramètre de régénération naturelle assez fort, le développement durable n'est techniquement pas possible. De plus, même si le paramètre s'avère suffisamment élevé, il peut tout de même contraindre le système environnemental à une amélioration très lente (*i.e.* une réduction du stock de pollution) dont les effets bénéfiques pour la société sont donc très éloignés alors que, de son côté, le système économique fournit des efforts coûteux et immédiats. Ces efforts sont justifiés par le critère de maximisation du bien-être intergénérationnel ; mais, d'un point de vue positif, on peut craindre que cet argument ne convainque pas les générations présentes.
En outre, les connaissances des Sciences Naturelles dans le domaine du comportement de l'écosystème face aux pollutions sont encore limitées. Pour preuve, la fourchette des estimations de la durée de résidence des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est très large. Dans le même ordre d'idées, nous manquons d'informations précises sur l'irréversibilité des phénomènes physiques. Ces indéterminations scientifiques (connaissances incomplètes ou insuffisantes) conduisent à la question de la prise de décision économique en incertitude.

Les extensions possibles

Ces conditions nécessaires pour un développement durable seront donc particulièrement difficiles à réunir, mais il ne faut cependant pas en tirer des conclusions trop pessimistes. En effet, les théories de la croissance endogène et semi-endogène durables fournissent un cadre de référence à la politique économique et justifient le fait d'intégrer la politique environnementale dans une perspective de développement économique. Cet objectif d'intégration emporte l'adhésion de responsables privés et publics plus nombreux.

Dans leur majorité, les institutions internationales sont favorables au développement durable. Tel est le cas du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) qui associe développement durable et lutte contre la pauvreté, en mettant en œuvre les principes et les outils qui permettent de "*combattre la pauvreté tout en améliorant l'environnement*". Ces institutions sont d'autant plus favorables au concept du développement durable que les pays du Sud craignaient que la protection de l'environnement désirée par les pays du Nord ne remette en cause leurs possibilités de développement économique.

La question des inégalités intragénérationnelles entre les pays du Nord et du Sud et de l'impact sur ces inégalités du commerce international et des politiques du développement durable n'ont pas fait l'objet de recherche dans cette thèse. Nous avons considéré que, du point de vue normatif, le critère de choix social était communément accepté, les comportements des ménages pouvant, par hypothèse, être réduits à celui d'un consommateur représentatif. D'un point de vue positif maintenant, notre approche exclut les problèmes de faisabilité de la politique du développement durable à l'échelle mondiale qui peuvent découler d'une mésentente sur le critère de choix social. Mésentente qui peut être provoquée par les inégalités intragénérationnelles.

Une extension possible de notre travail de recherche concerne donc les relations économiques, technologiques et environnementales entre pays. Plus précisément, elle peut consister à étudier les interactions entre les économies des pays du Nord et du Sud en considérant que les premiers détiennent les technologies qui permettent le développement économique tout en préservant la qualité de l'environnement que les seconds

possèdent. La préservation de la biodiversité et la stabilité du climat peuvent être considérées comme autant de biens publics globaux (ou planétaires) qui dépendront largement du comportement des pays du Sud qui en sont les propriétaires. L'exploitation de leurs forêts est un bon exemple. En effet, la non-déforestation revient à abandonner des bénéfices immédiats, à titre gratuit, alors qu'elle pourrait être très fortement valorisée si on se réfère au prix du carbone pratiqué sur le marché européen d'émissions négociables mis en place dans le cadre du Protocole de Kyoto. Cette valorisation représenterait une incitation fantastique à la protection de l'environnement, pouvant offrir, en outre, aux pays du Sud les moyens de se développer durablement. Pour Stiglitz (2005) :

> "*At current carbon prices, the value of carbon sequestration by tropical rainforests likely equals or exceeds the current level of international aid being provided to developing countries. In effect, the poor are aiding the rich*".

Une révision utile du protocole en 2012 pourrait donc consister à incorporer l'existence des biens publics globaux. Les conséquences en terme de compétitivité pour le commerce international, de transfert technologique et de rattrapage économique mériteraient donc d'être étudiées dans le cadre d'analyse offert par les nouvelles théories de la croissance.

Références bibliograhiques

[1] **Bureau, D., M. C. Daveau & S. Gastaldo** (2002) "Gouvernance Mondiale et Environnement", dans *Gouvernance Mondiale* Rapport du CAE, la documentation française éds.

[2] **PNUD & Commission européenne** (2000) *Combattre la pauvreté tout en améliorant l'environnement : vers des options optimales*, New-York et Bruxelles.

[3] **Stiglitz, J. E.** (2005) "Global Green Trade", *Global Policy Forum* 8 Juin, disponible sur http://www.globalpolicy.org/socecon/environmt/2005/0608greentrade.htm.

Bibliographie générale

[1] **Abramovitz, M.** (1986) "Catching Up, Forging Ahead and Falling Behind", *Journal of Economic History* **46** Juin, 385-406.

[2] **Acemoglu, D.** (2001) "Directed Technical Change", *NBER Working Papers* (8287).

[3] **Acemoglu, D.** (2002) "Directed Technical Change", *Review of Economic Studies* **69**, 781-809.

[4] **Acemoglu, D.** (2003) "Labor and capital-augmenting technical change", *Journal of the European Economic Association* **1** (1), 1-37.

[5] **Aghion, P., E. Caroli & C. Garcia-Penalosa** (1999) "Inequality and Economic Growth: the perspective of the new growth theory", *Journal of Economic Literature* **37**, 1615-1660.

[6] **Aghion, P. & P. Howitt** (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica* **60** (2), 323-351.

[7] **Aghion, P. & P. Howitt** (1998) *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press.

[8] **Aghion, P. & P. Howitt** (2004) "Growth with Quality-Improving Innovations: An Integrated Framework", document de travail Septembre.

[9] **Aghion, P. & P. Howitt** (2005) "Appropriate Growth Policy: A Unifying Framework", Août.

[10] **Amable, B. & D. Guellec** (1992) "Les théories de la croissance endogène", *Revue d'économie politique* **102** (3), 313-374.

[11] **Amigues, J. P., V. L. Ngo & M. Moreaux** (2004) "Overcoming the natural resource constraint through dedicated R&D efforts: contrasting the non-renewable and the renewable resource economies", *International Journal of Global Environmental* (4), 11-37.

[12] **Andreoni, J. & A. Levinson** (2001) "The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve", *Journal of Public Economics* **80** (2), 269-286.

[13] **Arora, S.** (2001) "Health, Human Productivity, and Long-Term Economic Growth", *Journal of Economic History* **61** Septembre, 699-749.

[14] **Arrow, K. J.** (1962) "The Economic Implications of Learning by Doing", *Review of Economic Studies* **29** Juin, 153-173.

[15] **Ayres, R.** (2003) "Dematerialized Growth: is it an oxymoron?", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[16] **Backus, D. K., P. J. Kehoe & T. J. Kehoe** (1992) "In Search of Sclae Effects in Trade and Growth", *Journal of Economic Theory* **58**, 377-409.

[17] **Barro, R. J.** (1990) "Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth", *Journal of Political Economy* **98** (5), 103-125.

[18] **Barro, R. J.** (1991) "Economic Growth in a Cross Section of Countries", *Quarterly Journal of Economics* **106** Mai, 407-443.

[19] **Barro, R. J. & X. Sala-i-Martin** (1995) *Economic Growth*, McGraw-Hill Inc., New-York.

[20] **Benassy, J. P.** (1998) "Is There Always too Little Research in Endogenous Growth with Expanding Product Variety?", *European Economic Review* **42**, 61-69.

[21] **Bontems, P. & G. Rotillon** (1998) *L'économie de l'environnement*, La Découverte, Repères, Paris.

[22] **Bovenberg, A. L. & R. A. de Mooij** (1994) "Environmental tax reform and endogenous growth", *CentER Discussion Paper* (9498) Tilburg University.

[23] **Bovenberg, A. L. & S. Smulders** (1995) "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model", *Journal of Public Economics* **57**, 369-391.

[24] **Bringezu, S.** (2003) "Resource use and efficiency in industrial and developing countries: the available evidence of dematerialization", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[25] **Bureau, D., M. C. Daveau & S. Gastaldo** (2002) "Gouvernance Mondiale et Environnement", dans *Gouvernance Mondiale* Rapport du CAE, la documentation française éds.

[26] **Byrne, M.** (1997) "Is Growth a Dirty Word? Pollution, Abatement and Endogenous Growth", *Journal of Development Economics* **54**, 261-284.

[27] **Cass, D.** (1965) "Optimum Gorwth in an Aggregative Model of Capital Accumulation", *Review of Economic Studies*.

[28] **Cerisier, F. & K. Schubert** (2000) "L'analyse de l'innovation dans les modèles de croissance endogène", *Revue française d'économie* **15** (1), 123-171.

[29] **Cesar, H.** (1994) "Control and Game Models of the Greenhouse Effect: Economics Essays on the Comedy and Tragedy of the Commons", *Lectures notes in economics and mathematical systems* (416), Spring-Verlag, Berlin.

[30] **Cesar, H. & A. de Zeeuw** (1994) "Sustainability and the greenhouse effet: Robustness analysis of the assimilation function", dans *Control and Game Theoritical Models of the Environment* J. Filar et C. Carraro éds., Birkhaüser, Boston.

[31] **Chay, K. Y. & M. Greenstone** (2003) "Air Quality, Infant Mortality, and the Clean Air Act of 1970", *NBER Working Papers* (10053).

[32] **Chevé, M.** (2000) *L'adéquation des choix économiques aux contraintes écologiques : Optimalité et durabilité de la croissance d'une économie polluante*, Thèse de Doctorat de Sciences Économiques, Université de Paris I - Panthéon-Sorbonne.

[33] **Chevé, M. & K. Schubert** (2002) "La croissance optimale d'une économie polluante : durabilité économique versus durabilité écologique", *Annales d'économie et de statistiques* (65), 117-136.

[34] **Christiaans, T.** (2004) "Types of balanced growth", *Economics Letter* **82**, 253-258.

[35] **CISAD** (2005) "Recherche & Développement en France Résultats 2002, estimations 2003, Objectifs socio-économiques du BCRD 2004", *dossier* (162) Mars.

[36] **Cohen, W. & D. Levinthal** (1989) "Innovation and Learning: the two faces of R&D", *Economic Journal* **99**, 569-596.

[37] **Comin, D.** (2004) "R&D: A Small Contribution to Productivity Growth", *Journal of Economic Growth* **9** (4) Décembre, 391-421.

[38] **Commission européenne** (2004) *Commission decision of 20 Octobre 2004 concerning the national allocation plan for the allocation of greenhouse gas emission allowances notified by France in accordance with Directive 2003/87/EC of the European Parliament and the Council*, Brussels C(2004) 3982/7 Final 20.10.

[39] **da Costa, P.** (2000) "L'obtention d'une croissance durable en présence d'innovations plus respectueuses de l'environnement ", document de travail *EUREQua*, Université Paris I - Panthéon Sorbonne.

[40] **da Costa, P.** (2003) "Semi-Endogenous Growth and Environmental Friendly Innovations", document de travail *ERASME*, École Centrale Paris.

[41] **da Costa, P.** (2004) "Durabilité et Dynamique d'une économie fondée sur deux secteurs schumpéteriens de R&D", document de travail *EUREQua*, Université Paris I - Panthéon Sorbonne.

[42] **da Costa, P.** (2005) "Sustainable Endogenous Growth and Environmental Friendly Innovations", document de travail *ERASME*, École Centrale Paris.

[43] **Crifo-Tillet, P.** (1999) "L'analyse de l'innovation dans les modèles de croissance endogène", *Revue française d'économie* **14** (3) 189-221.

[44] **Daly, H. E.** (1991) *Steady State Economics,* Island Press Washington D.C. 1977.

[45] **Daly, H. E. & K. N. Townsend** (1993) *Valuing the Earth: Economics, Ecology, Ethics,* MIT Press, Cambridge MA.

[46] **Dasgupta, P. & G. Heal** (1974) "The Optimal Depletion of Natural Ressources", *Review of Economic Studies* Symposium Issue, 3-28.

[47] **Dasgupta, P. & J. Stiglitz** (1980) "Resource Depletion Under Technological Uncertainty", *Econometrica* **49**, 85-104.

[48] **Dasgupta, S., B. Laplante, H. Wang & D. Wheeler** (2002) "Confronting the Environmental Kuznets Curve", *Journal of Economic Perspectives* **16**, 147–168.

[49] **Devall, B. & G. Sessions** (1985) *Deep Ecology: Living as if Natural Mattered,* Peregrine Smith Books Layton UT.

[50] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1998) "Schumpeterian Growth without Scale Effects", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 313-335.

[51] **Dinopoulos, E. & P. Thompson** (1999) "Scale effect in Schumpeterian Model of Economic Growth", *Journal of Evolutionary Economics* **9** (2), 157-185.

[52] **Dixit, A. K. & J. E. Stiglitz** (1977) "Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity", *Americain Economic Review* **67** (3) Juin, 297-308.

[53] **Eicher, T. S. & S. J. Turnovsky** (1999 a) "Non-scale model of economic growth", *Economic Journal* **109**, 394-415.

[54] **Eicher, T. S. & S. J. Turnovsky** (1999 b) "Convergence in a Two-Sector Non-scale Gorwth Model", *Journal of Economic Growth* **4** Décembre, 413-428.

[55] **Egli, H. & T. M. Steger** (2004) "A Dynamic Model of the Environmental Kuznets Curve: Turning Point and Public Policy", document de travail *ETH Zurich* (04/33), Juillet.

[56] **Eriksson, C.** (2004) "Directed Techninal Change with Endogenous Supplies of Energy and Labor", document de travail *University of Uppsala*, Mars.

[57] **Evenson, R.** (1984) "International Invention: Implications for Technology Market Analysis", dans *R&D, Patents, and Productivity* Griliches Z. éds. University of Chicago Press, 89-123.

[58] **Fougeyrollas, A., P. Le Mouël & P. Zagamé** (2001) "Semi-dendogenous growth in a computable equilibrium approach", Colloque *The Society of Computational Economics* Yale University 28-30 Juin.

[59] **Fougeyrollas, A., P. Le Mouël & P. Zagamé** (2005) "Les nouvelles théories de la croissance en application : l'évaluation des politiques structurelles, le cas du protocole de Kyoto", *Revue économique* **56** (5) Septembre, 1089-1105.

[60] **Gastaldo, S. & L. Ragot** (2000) "Croissance endogène et pollution : une approche fondée sur le comportement du consommateur", *Annales d'économie et de statistiques* **57**.

[61] **Georgescu-Roegen, N.** (1971) *The Entropy Law and the Economic Process,* Harvard University Press, Cambridge MA.

[62] **Georgescu-Roegen, N.** (1979) *Demain la décroissance : entropie - écologie - économie*, P. M. Favre.éds. Lausanne.

[63] **Glachant, J.** (2001) "The Level of R&D Spending in the Variety-Based Endogenous Growth Model", *Research in Economics* (55), 291-303.

[64] **Godard, O.** (2000) "L'expérience américaine des permis négociables", *Economie internationale* (82), 13-43.

[65] **Godard, O.** (2005) "Les politiques de l'effet de serre. Une évaluation du plan français de quotas de CO_2", *Revue française d'économie* **19** (4), 39-44.

[66] **Godard, O. & C. Henry** (1998) "Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables", dans *Fiscalité de l'environnement* rapports du CAE, Paris la Documentation française Juillet, 83-174.

[67] **Gradus, R. & S. Smulders** (1993) "The Trade-off between environmental care and long-term growth: Pollution in three prototype growth models", *Journal of Economics* **58**, 25-51.

[68] **Griliches, Z.** (1992) "The Search for R&D Spillovers", *Scandinavian Journal of Economics* supplement **92** (94), 29-47.

[69] **Griliches, Z.** (1995) "R&D and Productivity: Econometric Results and Measurement Issues", Chapitre 3 dans *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change* Paul Stoneman éds. Oxford: Blackwell, 52-89.

[70] **Grimaud, A.** (1999) "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management* **38**, 249-266.

[71] **Grimaud, A. & F. Ricci** (2004) "The Growth-Environment Trade-off : Horizontal versus Vertical Innovations", *The ICFAI Journal of Environmental Economics* **2** (1) Février, 7-40.

[72] **Grimaud, A. & L. Rougé** (2003) "Non-renewable resources and growth in vertical innovations: optimum, equilibrium and economic policies", *Journal of Environmental Economics and Management* **45**, 433-453.

[73] **Grossman, G. M. & A. B. Krueger** (1993) ", Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement ", dans *The Mexico-U.S. Free Trade Agreement* P. M. Garber éds., Cambridge (Mas.), The MIT Press, 13-56.

[74] **Grossman, G. M. & A. B. Krueger** (1995) ", Economic Growth and the Environment ", *Quartely Journal of Economics* **2**, 353-377.

[75] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 a) "Quality Leaders in the Theory of Growth", *Review of Economic Studies* **58** (1), 43-61.

[76] **Grossman, G. M. & E. Helpman** (1991 b) *Innovation and Growth in the Global Economy*, The MIT Press Cambridge, MA.

[77] **Hart, R.** (2004) "Growth, Environment and Innovation: A Model with Production Vintage and Environmentally Oriented Research", *Journal of Environmental Economics and Management* **48** (3) Novembre, 1078-1098.

[78] **Hart, R.** (2005) "Schumpeterian Growth and Sustainability: Creative Destruction of the Environment?", *Journal of Environmental Economics and Management* à paraître.

[79] **Heisenberg, W.** (1971) *Physics and Beyong; Encounters and Conservations*, A. J. Pomerans éds. New York: Harper & Row.

[80] **Hennin, P. & P. Ralle** (1994) "Les nouvelles Théories de la Croissance, quelques apports pour la politique économique", *Revue économique* hors-série, 75-100.

[81] **Hettich, F.** (1998) "Growth Effects of a Revenu-Neutral Environmental Tax Reform", *Journal of Economics* **67** (3), 287-316.

[82] **Holmberg, J.**, **C. Azar & S. Karlsson** (2003) "Decoupling — past trends and prospects for the future", Colloque *La croissance économique devient-elle immatérielle ? Réflexion sur une voie possible du développement durable* 4-5 Septembre Paris.

[83] **Howarth, R. B. & R. B. Norgaard** (1992) "Environmental Valuation under Sustainable Development", *American Economic Review* **80**, 473-477.

[84] **Howitt, P.** (1997) "Capital Accumulation and Innovations in the Endogeneous Growth Confronting the Facts", document de travail *Ohio State Univerity.*

[85] **Howitt, P.** (1999) "Steady Endogenous Growth with Populations and R&D inputs growing", *Journal of Political Economy* **107**, 715-730.

[86] **Howitt, P.** (2004) "Croissance endogène, productivité et politique économique : rapport de situation", *Observateur international de la productivité* (8).

[87] **Hung, V., P. Chang & K. Blackburn** (1993) "Endogenous Growth, Environment and R&D", dans *Trade, Innovation and Environment* Carraro éds. Kluwer Academic Publishers.

[88] **IFEN** (2003) "L'évolution des taxes et redevances liées à l'environnement depuis 1995", *Les données de l'environnement.*

[89] **IPCC** (2001) "The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide", Chapitre 3 dans *Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis.*

[90] **Jaffe, A., R. Newell & R. Stavins** (2002) "Environmental Policy and Technological Change", *Environmental and Resource Economics* **22** (1-2), 41-69.

[91] **Jones, C. I.** (1995 a) "Time Series Tests of Endogenous Growth Models", *Quarterly Journal of Economics* **110** (2) Mai, 495-525.

[92] **Jones, C. I.** (1995 b) "R&D-Based Models of Economic Growth", *Journal of Political Economy* **103** (4)Août, 759-784.

[93] **Jones, C. I.** (1999) "Growth : With or Without Scale Effects?", *American Economic Association* Papers and Proceedings Mai, 139-144.

[94] **Jones, C. I.** (2000) *Théories de la croissance endogène*, de Boeck Université.

[95] **Jones, C. I.** (2002) "Sources of U.S. Economic Growth in a World of Ideas", *American Economic Review* **92** (1) Mars, 220-239.

[96] **Jones, C. I. & J. C. Williams** (2000) "Measuring the Sociale Return to R&D", *Quarterly Journal of Economics* **113** Novembre, 1119–1135.

[97] **Jones, C. I. & J. C. Williams** (2000) "Too Much of a Good Thing? The Economics of Investment in R&D", *Journal of Economic Growth* **5** Mars, 65-85.

[98] **van de Klundert, T. & S. Smulders** (1997) "Growth, Competition and Welfare", *Scandinavian Journal of Economics* **99**, 99-118.

[99] **Kocherlakota, N. R. & K. M. Yi** (1997) "Is there Endogenous Long-Run Growth? Evidence from the United Stade and United Kingdom", *Journal of Money, Credit and Banking* **29** Mai, 235-262.

[100] **Koléda, G.** (2001) *Le brevet pour l'innovation au service de la croissance*, Thèse de doctorat de Sciences Économiques, Université Paris I - Panthéon Sorbonne.

[101] **Koléda, G.** (2004) "Innovations horizontales et verticales, croissance et régimes technologiques", *Revue Economique* **55** (6), Novembre.

[102] **Kortum, S.** (1993) "Equilibrium R&D and the Patent-R&D Ratio: U.S. Evidence", *American Economic Review* Papers and Proceedings **83** (2), 450-457.

[103] **Kortum, S.** (1997) "Research, Patenting and Technologial Change", *Econometrica* **65** (6) Novembre, 1389-1420.

[104] **Kuznets, S.** (1955) "Economic growth and income inequality", *American Economic Review* **49**, 1-28

[105] **Kuznets, S.** (1973) "Modern Economic Growth: Findings and Reflection", *American Economic Review* **63** (3) Juin, 247-258.

[106] **Kremer, M.** (1993) "Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990", *Quarterly Journal of Economics* **108** (3) Août, 681-716.

[107] **Lanjouw, J. O. & A. Mody** (1996) "Innovation and the International Diffusion of Environmental Responsive Technology", *Research Policy* **25**, 549-571.

[108] **Latouche, S.** (2003) "À bas le développement durable ! Vive la décroissance conviviale !" dans *Objectif décroissance*, M. Bernard et al. éds., Paris Parangon, 19-26.

[109] **Leontieff, W.** (1977) *The Future of the World Economy*, Oxford University Press, New-York.

[110] **Li, C. W.** (2000) "Endogenous vs. Semi-endogenous Growth in a two R&D Sector Model", *Economic Journal* **110**, 109-122

[111] **Li, C. W.** (2001) "On the Policy Implications of Endogenous Technological Progress", *Economic Journal* **111** (C) Mai, 164-179.

[112] **Li, C. W.** (2002) "Growth and scale effects: the role of knowledge spillovers", *Economics Letters* **74**, 177-185.

[113] **Li, C. W.** (2003) "Endognous without Scale: A Comment", *American Economic Review* **93**, 1009-1018.

[114] **Lieb, C. M.** (2001) "The Environmental Kuznets Curve; a survey of possible causes", document de travail *University of Heidelberg.*

[115] **Lovelock, J.** (1988) *Ages of Gaia*, Oxford University Press.

[116] **Lucas, R. E.** (1988) "On the Mechanics of Development Planning", *Journal of Monetary Economics* **22** (1) Juillet, 3-42.

[117] **Malinvaud, E.** (1993) "Regard d'un ancien sur les nouvelles théories de la croissance", *Revue Economique* **91**, 907-918.

[118] **Malthus, T.** (1798) *An essay on the principles of population as it affects the Future Improvement of Society*, London Ward Lock.

[119] **van Marrewijk, C. & J. Verbeek** (1993) *Disequilibrium Growth Theory: An Application of the Filippov Solution to Economics*, Avebury U.K.

[120] **Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers & W. Behrens** (1972) *Halte à la croissance ; Rapport sur les limites de la Croissance*, Fayard Paris.

[121] **Meadows, D. H., D. L. Meadows & J. Randers** (1992) *Beyong the Limits: Global Collapse or a Sustainable Future,* London Earthcan Publications.

[122] **Michel, P.** (1982) "On the Tranversality Condition in Infinite Horizon Optimal Control Problems", *Econometrica* **50**, 975-985.

[123] **Michel, P.** (1990) "Some Clarifications on the Tranversality Condition", *Econometrica* **58**, 705-723.

[124] **Michel, P.** (1993) "Pollution and Growth Toward the Ecological Paradise", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (80.93).

[125] **Michel, P. & G. Rotillon** (1996) "Desutility of Pollution and Endogenous Growth", *Environmental and Resource Economics* **6**, 279-300.

[126] **Mills, J. S.** (1862) *Principles of Political Economy*, New-York Appleton.

[127] **Ministère de l'écologie et du développement durable** MEDD (2004 a) *Projet de plan national d'affectation des quotas. Période de référence 2005-2007* Paris 8 Juin.

[128] **MEDD** (2004 b) *Plan national d'affectation des quotas de CO_2. Période de référence 2005-2007*, Paris 6 Juillet.

[129] **MEDD** (2004 c) *Plan climat 2004*, Paris 22 Juillet.

[130] **MEDD** (2004 d) *Plan national d'affectation des quotas. Période de référence 2005-2007*, Paris 21 Octobre.

[131] **MEDD** (2005) *Projet de décret établissant un plan national d'affectation des quotas d'émissions de gaz à effet de serre*, Paris 14 Janvier.

[132] **Moreaux, M. & F. Ricci** (2005) "The Simple Analytics of Developing Resources From Resources", *Resource and Energy Economics* **27** (1), 41-63.

[133] **Moreaux, M.** (2002) "Increvables prophètes du malheur", *L'Expansion* (667) Septembre.

[134] **Mulligan, C. B. & X. Sala-i-Martin** (1993) "Transitional Dynamics in Two-Sector Models of Endogenous Growth", *Quarterly Journals of Economics* **108** (3), 739-773.

[135] **Musu, I.** (1994) "On Sustainability Endogenous Growth", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (11.94).

[136] **Musu, I. & M. Lines** (1995) "Endogenous Growth and Environment Preservation", dans *Environmental Economics*, G. Boero et A. Silberston éds. McMillan Londres.

[137] **Naess, A.** (1973) "The shallow and the deep, long-range ecology movements: A summary", *Inquiry* **16**, 95-100.

[138] **Nelson, R. R. & E. S. Phelps** (1966) "Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth", *American Economic Association* Papers and Proceedings **56** Mai, 69-75.

[139] **de Nooij, M. & S. Smulders** (2003) "The impact of energy conservation on technology and economic growth", *Resource and Energy Economics* **25** (3), 59-79.

[140] **Nordhaus, W. D.** (1969) "An Economic Theory of Technological Change", *American Economic Association* Papers and Proceedings **59** Mai, 18-28.

[141] **Nordhaus, W. D.** (1992) "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases", *Science* **258** (20) Novembre, 1315-1319.

[142] **Nordhaus, W. D.** (1994) "Do Real Outpu and Real Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not", document de travail *Cowles Foundation* (1078) New Haven Yale University.

[143] **Norgaard, R. B.** (1984) "Coevolutionary development potential", *Land Economics* **60**, 160-173.

[144] **Norgaard, R. B.** (1988) "Sustainable development: a co-evolutionary view", *Futures* **20**, 160-173.

[145] **Norgaard, R. B.** (1994) *Develoment Betrayed: The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future*, Routledge London.

[146] **North, D.** (1981) *Structure and Change in Economic History*, New-York Norton.

[147] **OCDE** (2000) *Innovation and the Environment. Sustainable Development*, OECD Publications, France.

[148] **OCDE** (2001 a) "Comment encourager une croissance écologiquement durable en France", document de travail *Département des affaires économique 314* (ECO/ WKP40).

[149] **OCDE** (2001 b) *Développement durable. Les grandes questions*, OECD Publications, France.

[150] **Ostro, B., G. Eskeland, T. Feyzioglu & J. Sanchez** (1998) "Air Pollution and Health Effects: A Study of Respiratory Illness Among Children in Santiago, Chile. World Bank, Country", *Economics Department of the World Bank* series papers (1932) Washington.

[151] **Oueslati, W.** (2002) "Environmental Policy in a Endogenous Growth Model with Human Capital and Endogenous Labor Supply", *Economic Modelling* **19**, 487-507.

[152] **Pasinetti, L. & R. M. Solow** (1994) "Reflections on the sustainable economic growth", dans *Economic Growth and the Structure of Long-Term Development* Nordhaus éds. Oxford University Press, 309-325.

[153] **Passet, R.** (1979) *L'économique et le vivant*, Payot Paris.

[154] **Patris, C., F. Warrant & G. Valenduc** (2001) "L'innovation technologique au service du développement durable", dans *Leviers du développement durable* Centre de Recherche Travail & Technologies Février, Namur.

[155] **Pearce, D. & G. Atkinson** (1995) "Measuring Sustainable Development", dans D. W. Bromley éds., 166-181.

[156] **Peretto, P. M.** (1998) "Technological Change and Population Growth", *Journal of Economic Growth* **3** (4) Décembre, 283-311.

[157] **Peretto, P. M. & S. Smulders** (2002) "Technological Distance, Growth and Scale Effects", *Economic Journal* **112** Juillet, 603-624.

[158] **Phelps, E. S.** (1962) "The New View of Investment: A Neoclassical Analysis", *Quarterly Journal of Economics* **76** (4) Novembre, 548-567

[159] **Phelps, E. S.** (1966) *Golden Rule of Economic Growth*, Norton New-Yorkovember.

[160] **PNUD & Commission européenne** (2000) *Combattre la pauvreté tout en améliorant l'environnement : vers des options optimales*, New-York et Bruxelles.

[161] **Pontryagin, L. S., V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze & E. F. Mishchenko** (1962) *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, Inter-science Publishers New-York.

[162] **Popp, D.** (2002) "Induced Innovation and Energy Prices", *American Economic Review* **92** (1) Mars, 160-180.

[163] **Porter, M. E.** (1991) "America's Green Strategy", *Scientific American* **264** (168).

[164] **Porter, M. E. & C. van der Linde** (1995) "Toward a new concept of environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives*, **9** (4), 97-118.

[165] **Porter, M. E. & S. Stern** (2000) "Measuring the "Ideas", Production Functions: Evidence from International Patent Output", *NBER Working Papers* (7891).

[166] **Ragot, L.** (1997) *Croissance économique durable et pollution : un essai d'interprétation formalisée*, Thèse de Doctorat de Sciences Economiques, Université de Paris I - Panthéon Sorbonne.

[167] **Ramsey, F. P.** (1928) "A Mathematical Theory of Saving", *The Economic Journal* **38** (152), 543-559.

[168] **Rebelo, S.** (1991) "Long-run policy analysis and long-run growth", *Journal of Political Analysis* **99** (3), 500-521.

[169] **Ricci, F.** (2000) *Essais théoriques sur le développement durable*, Thèse de Doctotat de Sciences Économiques, Université Toulouse I.

[170] **Ricci, F.** (2002) "Environmental Policy and Growth when Inputs are Differentiated in Pollution and Intensity", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (16).

[171] **Ricci, F.** (2004) "Channels of Transmission of Environmental Policy to Economic Growth: A Survey of the Theory", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (52.2004).

[172] **Rivera-Batiz, A. L. & P. M. Romer** (1992) "International Trade with Endogenous Technological Change,", *NBER Working Papers* (3594).

[173] **Romer, P. M.** (1986) "Increasing Return and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy* **94** (5) Octobre, 1002-1037.

[174] **Romer, P. M.** (1987) "Growth Based on Increasing Return Due to Specialization", *American Economic Review* **77** (2) Mai, 56-62.

[175] **Romer, P. M.** (1990) "Endogenous Technical Change", *Journal of Political Economy* **98** (5) Octobre part II, 71-102.

[176] **Romer, P. M.** (2001) "Post-Scarcity Prophet", Interview pour *Reasononline* disponible sur http://www.reason.com/0112/fe.rb.post.shtml.

[177] **Rosendahl, K. E.** (1996) "Does Improved Environmental Policy Enhance Economic Growth?", *Environmental and Resource Economics* **9**, 341-364.

[178] **Rubio, S. J. & J. Aznar** (2000) "Sustainable Growth and Environmental Policies", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (00.25).

[179] **Saint-Paul, G.** (2002) "Environmental Policy and Directed Innovation in a Schumpeterian Growth Model", *IDEI* document de travail (153).

[180] **Saint-Paul, G.** (2003) "Quels instruments pour une politique environnementale", *IDEI* document de travail (171).

[181] **Salo, S. & O. Tahvonen** (2001) "Economic Growth and Transitions between Renewable and Nonrenewable Energy Resources", *European Economic Review* **45**, 1379-1398.

[182] **Schubert, K.** (1996) *Macroéconomie Comportements et Croissance*, Vuibert Economie.

[183] **Schubert, K. & P. Zagamé** (1998) *L'environnement, une nouvelle dimension de l'analyse économique*, Vuibert Economie.

[184] **Schumpeter, J. A.** (1934) *The Theory of Economic Development*, Cambridge MA, Harvard University Press.

[185] **Schumpeter, J. A.** (1942) *Capitalisme, Socialisme et démocratie*, Bibliothèque historique Payot 1990.

[186] **Schumpeter, J. A.** (1954) *The History of Economic Analysis*, New-York, Oxford University Press.

[187] **Segerstrom, P.** (1998) "Endogenous Growth Without Scale Effects", *American Economic Review* **88** (5) Décembre, 1290-1310.

[188] **Segerstrom, P.** (2000) "The Long-Run Growth Effects of R&D Subsidies", *Journal of Economic Growth* **5** Septembre, 277-305.

[189] **Segerstrom, P.** (2005) "Intel Economics", *International Economic Review* à paraître.

[190] **Shell, K.** (1967) "A Model of Inventive Activity and Capital Accumulation", dans *Essay on the Theory of Economic Growth*, Shell éds., Cambridge, MA: MIT Press.

[191] **Smulders, S.** (1995 a) "Environmental Policy and Sustainable Economic Growth", *De Economist* **143** (2), 163-195.

[192] **Smulders, S.** (1995 b) "Entropy, Environment and Endogenous Growth", *International Tax and Public Finance* **2**, 319-340.

[193] **Smulders, S.** (2004) "Non-renewable Resources and Economic Growth: Comparing the classics to new models of endogenous technology and growth", Colloque *EAERE-FEEM-VIU Summer School in Resource and Environmental Economics* Juin.

[194] **Smulders, S.** (2005) "Endogenous Technological Change, Natural Resources, and Growth", Chapitre 8 à paraître dans *Scarcity and Growth Revisited; Natural Resources and the Environment in the New Millennium* R.D. Simpson, M. A. Toman and R. U. Ayres éds. The Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.

[195] **Solow, R. M.** (1956 a) "A Contribution to the Theory of Economic Growth", *Quartely Journal of Economics* **70** (1) Février, 65-94.

[196] **Solow, R. M.** (1956 b) "Technical Change and the Aggregate Production Function", *Review of Economics and Statistics* **39** Août, 312-320.

[197] **Solow, R. M.** (1997) "REPLY - Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz", *Ecological Economics* **22**, 267-268.

[198] **Solow, R. M.** (2001) *Addendum to the Nobel Lectures "Growth Theory and After", Décember 8, 1987*, Août disponible sur https://ca.geocities.com/econ0909meet/solow-lecture.html.

[199] **Spence, M.** (1976) "Product Selection, Fixed Costs, and Monopolistic Competition", *Review of Economic Studies* **42** (2) Juin, 217-235.

[200] **Spence, M.** (1977) "Nonprice Competition", *American Economic Review* **67** (1), 255-259.

[201] **Stockey, N.** (1998) "Are There Limits To Growth?", *International Economic Review* **39** (1), 1-31.

[202] **Stiglitz, J. E.** (2005) "Global Green Trade", *Global Policy Forum* 8 Juin, disponible sur http://www.globalpolicy.org/socecon/environmt/2005/0608greentrade.htm.

[203] **Tahvonen, O.** (1991) "On the dynamics of renewable resource harvesting and pollution control", *Environmental and Resource Economics* **1**, 91-117.

[204] **Tahvonen, O. & J. Kuuluvainen** (1993) "Economic Growth, Pollution, and Renewable Resources", *Journal of Environmental Economics and Management* **24** (2), 101-118.

[205] **Tahvonen, O.** (2000) "Economic Sustainability and Scarcity of Natural Resources : A Brief Historical Review", *Resources for the Future* Juin.

[206] **Thompson, M. V. & J. T. Randerson** (1999) "Impulse response functions of terrestrial carbon cycle models: method and application", *Global Change Biology* **5** (4) Avril, 371-394.

[207] **Tirole, J.** (1988) *Theory of Industrial Organisation*, Cambridge MIT Press.

[208] **Uzawa, H.** (1965) "Optimum Technical Change in a Aggregative Model of Economic Growth", *International Economic Review* **6** Janvier, 18-31.

[209] **Vellinga, N.** (1994) "The Influence of Pollution as a Stock and as a Flow on Economic Growth Rates", document de travail *Eindhoven University of Technology* Juin.

[210] **Verdier, T.** (1993) "Environmental Pollution and Endogenous Growth: a comparison between Emission Taxes and Technological Standards", document de travail *Fondazione Eni Enrico Mattei nota di lavoro* (57.93).

[211] **Verspagen, B.** (1997) "Measuring Intersectoral Technology Spillovers: Estimates from the European and US Patent Oce Databases", *Economic System Research* **9**, 47-65.

[212] **WCED** (1987) *Our Common Future*, Oxford University Press.

[213] **Young, A.** (1998) "Growth without Scale Effects", *Journal of Political Economy* **106** (1), 41-63.

Résumé

Nous étudions les conditions pour que la croissance optimale d'une économie polluante puisse être durable. L'étude est menée dans le cadre de modèles de croissance fondée sur la R&D dans lesquels la production est à l'origine d'émissions polluantes qui sont déversées dans l'écosystème. La pollution et la R&D sont à l'origine d'effets externes qui affectent le fonctionnement de l'économie. Pour ce dernier phénomène, les connaissances (le facteur accumulable) qui sont utilisées dans le processus d'innovation sont non-rivales et la protection de l'innovateur par le brevet est à l'origine de monopoles temporaires. Dans une première partie, nous supposons que la fonction de production des innovations a un rendement unitaire sur le facteur accumulable. Avec cette hypothèse, conforme à la théorie de la croissance endogène, nous montrons dans quelle mesure la croissance durable peut être améliorée par la promotion des technologies propres. Dans une seconde partie, la prise en compte de la théorie de la croissance semi-endogène conduit à introduire un rendement inférieur à l'unité sur le facteur accumulable. Dans le cas des technologies propres, une condition de durabilité supplémentaire concerne la difficulté de la recherche qui ne doit pas être trop importante. Nous avons de plus envisagé l'hypothèse où il existe deux secteurs de recherche, l'un spécialisé dans l'amélioration de la productivité, l'autre dans la réduction de l'intensité polluante. Dans ce cas, les nouvelles conditions de durabilité portent sur l'existence d'externalités inter-sectorielles.

Abstract

Technological Progress for Sustainable Development?
An Inquiry into the Intensity and the Direction of Environmental Friendly Technical Change

We study the conditions for optimal growth of polluting economy to be sustainable. This analysis is based on R&D growth models in which production gives rise to pollution emissions. Pollution and R&D lead to externalities that affect economic activities. For the latter, knowledge which is used as an input for innovations is nonrivalvous and patent secures the monopoly position resulting from innovation. In a first part we suppose that the function of production of innovations has unitary return on knowledge. This assumption is that of endogenous growth theory and we evaluate the fact that sustainable growth can be improved by promoting environmental friendly innovations. In the second part we take into account decreasing return on knowledge as the new theory of semi-endogenous growth does. When innovation is environmental friendly, a new necessary condition of sustainability arises on the difficulty in R&D which must be low enough. On the contrary, when two R&D sectors, one specialized in the improvement of quality and other in pollution intensity, new conditions for sustainability arise from the existence of intersectoral spillovers.

Discipline : Sciences Économiques.

Mots clefs : croissance durable, croissance endogène, croissance semi-endogène, R&D, progrès technique endogène, technologie propre, pollution, concurrence imparfaite.

Key Words: *sustainable growth, endogenous growth, semi-endogenous growth, R&D, endogenous technical change, environmental friendly innovation, pollution, imperfect competition.*

Laboratoire de Recherche :

ERASME - Laboratoire d'Économie, École Centrale Paris, Grande Voie des Vignes 92295 Châtenay-Malabry Cedex.

EUREQua - Université Paris I - Panthéon Sorbonne, Maison des Sciences Économiques, 106-112 boulevard de l'Hôpital 75647 Paris Cedex 13.