



HAL
open science

Politiques environnementales et éco-innovations des firmes de services : un modèle d'adaptation multi-agents

Benoît Desmarchelier, Faridah Djellal, Faïz Gallouj

► **To cite this version:**

Benoît Desmarchelier, Faridah Djellal, Faïz Gallouj. Politiques environnementales et éco-innovations des firmes de services : un modèle d'adaptation multi-agents. 2011. hal-01101509

HAL Id: hal-01101509

<https://hal.science/hal-01101509>

Preprint submitted on 8 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Politiques environnementales et éco-innovations des firmes de services : un modèle d'adaptation multi-agents

Benoît Desmarchelier^{*}, Faridah Djellal[†], Faïz Gallouj[‡]

1^{er} avril 2011

Résumé

Contrairement à un préjugé fréquent, les prestations de service sont polluantes car elles mobilisent des outils matériels et nécessitent des déplacements, sources d'externalités. Pour faire face à ces externalités, les entreprises de services peuvent mettre en oeuvre des éco-innovations. L'objectif de cet article est d'évaluer la sensibilité de cette éco-innovation aux politiques environnementales en comparant l'efficacité de deux d'entre elles : la taxe environnementale et l'information des consommateurs. Pour réaliser cet objectif, nous construisons un modèle d'innovation multi-agents inspiré de la biologie évolutionniste et des théories de l'innovation dans les services (Gallouj et Weinstein, 1997[22]). Le test de 123 scénarios différents confirme que les firmes de services sont sensibles aux politiques environnementales. Les résultats suggèrent une plus grande efficacité de l'écotaxe, qui permet d'obtenir un niveau de pollution plus faible et plus stable que celui que permet une politique d'information. La politique d'information semble à l'origine d'un effet pervers qui entraîne la disparition de niches de marché pour les services les plus écologiques.

^{*}Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, benoit.desmarchelier@ed.univ-lille1.fr

[†]Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, faridah.djellal@univ-lille1.fr

[‡]Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, Faiz.Gallouj@univ-lille1.fr

1 Introduction

Bien qu'un certain nombre de travaux récents (Gadrey, 2010[16]; Ayres et al., 2004[38]) soulignent le caractère particulièrement polluant et paradoxalement matériel des économies tertiaires, l'impact environnemental des activités de services continue d'être minimisé. Ainsi, à l'opposé de l'industrie ou de l'agriculture, les services sont souvent considérés comme respectueux de l'environnement (OCDE, 2000[37]; Mannaerts, 2004[34]; Baumol, 2010[2]). Ce paradoxe s'explique en particulier par l'ignorance de la dimension matérielle des activités de services dans la comptabilisation sectorielle des émissions de gaz à effets de serre (Gadrey, 2010). La matérialité des produits est en effet considérée comme la principale source d'externalités négatives, tandis que par définition, les services seraient immatériels, donc peu polluants. Ce raisonnement est erroné, car les services eux aussi ont un rapport fondamental (direct et indirect) à la matérialité. Il suffit pour s'en convaincre de réexaminer la définition traditionnelle du service (Gadrey, 1992[15]; Gallouj, 1999[18]). Il s'agit d'une opération de transformation d'un support réalisée par un prestataire à la demande d'un client. Ce support peut être un objet matériel, de l'information codifiée, un individu ou de la connaissance. L'opération de transformation mobilise souvent le client dans une relation de coproduction. Une telle définition laisse apparaître différentes sources de matérialité : celle du support, celle des outils et des biens (y compris immobiliers) utilisés pour la réalisation de la prestation, celle enfin liée à la coproduction qui peut nécessiter un déplacement du client et/ou du prestataire et/ou encore du support de la prestation.

La contribution des services à l'emploi et à la valeur ajoutée dans les économies contemporaines, ainsi que l'impact environnemental négatif de ces activités, devraient conduire à envisager la question de l'éco-innovation dans et par les services comme une préoccupation majeure. Pourtant, le traitement des problèmes environnementaux souffre souvent d'un « biais sectoriel et technologiste » (Djellal et Gallouj, 2009[11]) qui conduit à ignorer les éco-innovations non-technologiques dans les secteurs industriels et agricoles et les éco-innovations (qu'elles soient technologiques ou non) dans le secteur tertiaire. Ainsi, aucune activité de service ne figure parmi les activités prises en compte dans un récent rapport de la Commission Européenne sur les éco-innovations (European Commission, 2009[12]), et seules les solutions technologiques y sont discutées.

Selon Gallouj (1994[17]; Gallouj et Weinstein, 1997[22]; Gallouj

et Savona, 2009[20]), l'innovation dans les services peut être appréhendée selon trois perspectives théoriques différentes : l'assimilation, la différenciation et l'intégration, qui peuvent être appliquées à la problématique de l'éco-innovation dans les services (Djellal et Gallouj, 2009[11]). L'approche assimilatrice considère l'innovation dans les services comme le résultat de l'adoption d'innovations technologiques produites dans d'autres secteurs. Les éco-innovations dans les services prendraient donc la simple forme de l'adoption de technologies plus écologiques (par exemple nouveaux modes de chauffage, véhicules électriques ...). L'approche différenciatrice souligne quant à elle l'importance des formes d'innovation non technologiques dans les services. Dans ce cadre, les éco-innovations sont des solutions non technologiques qui réduisent l'impact environnemental du service (écotourisme, livrets d'épargne développement durable, usage de produits locaux dans la restauration...). En s'appuyant sur le constat d'une convergence entre l'industrie et les services, l'approche intégratrice (Gallouj et Weinstein, 1997[22]), se propose de fournir des outils identiques pour analyser les processus d'innovation et leurs résultats aussi bien dans les activités industrielles que tertiaires. Cette approche s'appuie sur une décomposition du produit (bien ou service) en vecteurs de caractéristiques dans la tradition initiée par Lancaster (Gallouj et Weinstein, 1997[22] ; Saviotti et Metcalfe, 1984[40] ; de Vries, 2006[10] ; Windrum et Garcia-Goñi 2008[44]). Une innovation voit alors le jour lorsque les caractéristiques internes ou externes du produit sont modifiées. Un exemple d'éco-innovation, dans une telle perspective intégratrice, est le développement de logiques de mise en location de leurs produits par les firmes industrielles. Dans ce cas, le bien n'est plus envisagé comme un artéfact matériel, mais comme un bouquet de fonctions ou de caractéristiques de services.

La question que nous souhaitons traiter dans ce travail n'est pas celle de l'existence de l'éco-innovation dans les services. Les exemples qui viennent d'être évoqués, qui pourraient être complétés par de nombreux autres, suffisent à faire accepter l'idée que les services eux-aussi éco-innovent. Nous nous intéressons plutôt ici aux politiques publiques. Nous cherchons ainsi à vérifier dans quelle mesure l'éco-innovation des firmes de service est sensible aux politiques publiques en faveur de l'environnement et à comparer différents types de politiques publiques selon leur capacité à induire des éco-innovations dans les services.

Le but de ce travail est de fournir une réponse théorique à ces deux questions à travers la construction d'un modèle multi-agents d'éco-

innovation dans les services. Il s'agit plus précisément, d'une part, d'examiner dans quelle mesure les politiques de fiscalité écologique et les politiques d'information des consommateurs sont capables d'initier des éco-innovations dans les services, et d'autre part, d'évaluer laquelle de ces politiques est la plus efficace, au sens de sa capacité à induire la création d'un dominant design plus ou moins écologique. On notera que, compte tenu de la tendance, soulignée précédemment, à la convergence entre services et industrie, nous proposons un modèle qui s'inscrit dans la perspective intégratrice de l'innovation. L'article est organisé en trois parties. La première partie pose les fondations théoriques d'un modèle d'éco-innovation des firmes de services. Dans la seconde partie, nous construisons le modèle qui découle de ces fondations et nous en présentons les propriétés. Pour tenir compte des spécificités des services, le modèle intègre les deux principaux canaux par lesquels les activités de services polluent, à savoir, d'une part, leur matérialité et, d'autre part, leur interactivité (coproduction) en ce qu'elle peut induire des déplacements. Dans la troisième partie, nous présentons et discutons les résultats de nos simulations en ce qui concerne l'influence des politiques fiscales et d'information des consommateurs sur l'éco-innovation des entreprises de service.

2 Cadre théorique

Nous formulons ici les bases théoriques du modèle qui nous servira à répondre à nos deux questions. Nous commençons par envisager la spécificité de la pollution des activités de services, et nous en déduisons une façon de poser le problème environnemental de la firme de service sous la forme d'un modèle d'adaptation. Nous passons ensuite en revue les principaux modèles d'adaptation en économie. Une de leur principale faiblesse est qu'ils dissocient la phase de recherche de l'entreprise de celle de la diffusion des innovations, c'est pourquoi nous proposons pour notre part de coupler notre modèle d'adaptation à une théorie de la dynamique des préférences des consommateurs.

2.1 La pollution des activités de service

La question de la pollution des activités de services est, pour l'essentiel, absente de la littérature théorique. Nous évoquons ici deux exceptions intéressantes qui diffèrent par leur niveau d'analyse. La contribution de Baumol (2010[3]) est d'ordre macroéconomique. La pollution y est générée par la maladie des coûts qui affecte les services. Gadrey (2010[16]), pour sa part, privilégie une perspective microéconomique, qui laisse davantage envisager la possibilité d'actions

correctives.

Dans une contribution récente, Baumol (2010[3]) mobilise ainsi la théorie de la maladie des coûts (Baumol 1967[1]; Baumol et Wolff 1983[4]) pour fournir une explication macroéconomique de la pollution des économies tertiaires. Dans la mesure où les possibilités de mécanisation des services sont relativement plus faibles que celles de l'industrie, Baumol considère que la croissance de la productivité du travail dans les services est inférieure à celle de la productivité moyenne de l'économie. En supposant par ailleurs que le niveau du salaire macroéconomique croît au rythme de la productivité moyenne du travail dans l'économie, l'écart entre ce que coûte un travailleur pour une firme de service et ce qu'il produit s'accroît de plus en plus, générant une spirale inflationniste dans les activités tertiaires. Cette inflation chronique peut expliquer la forte empreinte écologique des sociétés tertiaires (Baumol 2010[3]). En effet, puisque les prix des services augmentent très rapidement, certains d'entre eux, en particulier les services de réparation, peuvent devenir plus coûteux pour les consommateurs ou les entreprises que la mise au rebut d'un bien défectueux et le rachat d'un nouveau. Dans ces conditions, les rejets de déchets et la production matérielle devraient croître indéfiniment dans des économies tertiaires que Baumol (2010[3]) qualifie de « throw away societies ». De ce point de vue (écologique), la croissance des secteurs tertiaires dans l'emploi et la production, ainsi que le développement de logiques servicielles dans les secteurs industriels apparaissent particulièrement inquiétants.

En privilégiant le niveau microéconomique cette fois, Gadrey (2010[16]) identifie deux sources de pollution dans les activités de service : l'environnement matériel nécessaire à la prestation (outils matériels, ordinateurs, bâtiments. . .) et sa dimension interactive ou coproductive. Autrement dit, le service ne peut pas invoquer son immatérialité supposée pour revendiquer un certain statut écologique. Il entretient avec la matière des relations multiples et diverses, qui sont sources de consommation énergétique, de dégradation écologique et de pollution. Quant à la coproduction, elle implique souvent une rencontre physique et des déplacements de biens et de personnes. Cette rencontre est d'autant plus polluante que les protagonistes de la relation de service sont éloignés géographiquement et que la fréquence des interactions est importante. La caractéristique technique d'interactivité, qui est souvent considérée comme une des spécificités fondamentales des services, est donc envisagée comme une source importante de pollution. On notera cependant que l'interactivité n'implique pas toujours un déplacement

physique (en particulier lorsqu'elle s'appuie sur l'usage des TIC¹). C'est pourquoi nous proposons d'isoler la sous-dimension 'mobilité' au sein de la caractéristique plus générale d'interactivité.

Dans ce travail, nous considérons que le problème microéconomique de la pollution des activités de services peut être posé dans les termes de la question du choix du design final du service. Dans la perspective de la représentation du produit en termes de caractéristiques (Saviotti et Metcalfe, 1984[40], Gallouj et Weinstein, 1997[22]), on peut décomposer un produit (bien ou service) en trois grandes catégories de caractéristiques de services² :

- les caractéristiques principales, c'est-à-dire celles qui motivent en premier lieu l'achat du produit,
- les caractéristiques complémentaires qui conditionnent les performances des caractéristiques principales,
- les externalités, qui sont des caractéristiques non désirées.

Dans le cas des activités de services, nous distinguerons deux types d'externalités négatives liées aux deux sources de pollution identifiées précédemment : celles issues de la mobilité induite par l'interactivité du service et celles qui proviennent de son environnement matériel³.

Les sources microéconomiques d'externalité que nous venons d'évoquer n'ont rien d'irréversible, car des éco-innovations sont toujours possibles. Ainsi, nous pouvons envisager le problème environnemental de la firme de services comme un problème de choix de son vecteur de caractéristiques finales. Dans cette perspective, nous identifions trois caractéristiques importantes : le prix⁴ du service, les externalités qu'il engendre et la contrainte de mobilité pour le consommateur⁵. Les externalités comprennent les deux sources énoncées précédemment, à savoir celles liées à la mobilité (dans ce cas, il s'agit de la mobilité du client, du prestataire et du support du service) et celles liées à la matérialité du service. L'introduction d'une caractéristique de mo-

1. Dans ce cas, c'est de nouveau directement l'environnement matériel qui est la source de pollution. Plus généralement, même dans le cas de la mobilité, c'est l'usage de systèmes matériels (moyens de transport) qui est la cause de la pollution.

2. Une caractéristique de service, ou caractéristique finale, est une caractéristique qui procure de l'utilité au client

3. Dans la suite du texte, nous noterons indifféremment "externalité liée à la matérialité" et "externalité hors mobilité"

4. Le prix n'est pas une caractéristique de service au sens de Saviotti et Metcalfe (1984[40]) car il ne procure pas une utilité en lui-même. Il est cependant un levier essentiel d'action des pouvoirs publics en faveur de la diffusion des produits environnementaux

5. Le vecteur de caractéristiques que nous créons étant évalué par le client, la mobilité du prestataire et celle du support sont ignorées de cette dimension de mobilité.

bilité du consommateur se justifie par le fait que les consommateurs peuvent être sensibles aux contraintes de mobilité (préférer la mobilité) indépendamment de la question de la pollution. Le vecteur des caractéristiques du service est donné par (1).

$$\begin{pmatrix} x_{kt} \\ y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt} \\ z_{kt} \end{pmatrix} \quad (1)$$

x_{kt} est le prix du service de la firme k à la période t , y_{kt} représente les externalités générées par le service. y_{kt} est la somme des externalités liées à la mobilité, $f(m_{kt})$, et des externalités liées à la matérialité v_{kt} . m_{kt} représente la mobilité totale de la transaction de service : mobilité du client, du prestataire et du support. z_{kt} est la mobilité nécessaire de la part du client pour la consommation du service de la firme k .

$$z_{kt} \leq m_{kt}$$

La transformation de cette mobilité m_{kt} ⁶ en externalité est opérée par la fonction $f(\cdot)$, qui est une normalisation de m_{kt} . Compte tenu des techniques et des habitudes de production existantes, nous définissons un niveau de mobilité minimum, m_{min} et un niveau maximum m_{max} , de sorte que :

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

La firme de service est donc confrontée à un problème de choix de design du service : elle doit choisir son vecteur $(x_{kt} \ y_{kt} \ z_{kt})$. Son problème s'apparente à celui formalisé par les modèles biologiques d'adaptation (Holland 1992[26]), encore appelés « modèles de recherche » (Chang et Harrington, 2006[9]). La section suivante a pour objectif de présenter l'origine et le principe de ces modèles ainsi que leurs principales applications en économie.

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

Les modèles d'adaptation ont d'abord été mis en œuvre dans le domaine de l'étude des mécanismes de sélection et de mutation des organismes vivants sur une période longue, mais ils offrent de nombreuses

6. Plus précisément, m_{kt} est le produit d'un tirage aléatoire dans une loi Uniforme définie sur l'intervalle $[z_{kt}; 10]$

possibilités d'application à d'autres domaines (Holland 1992[26]). L'objet de cette section est d'en présenter brièvement les principes en mettant l'accent en particulier sur le modèle NK , qui est le plus utilisé en économie. Nous mettrons également en évidence les limites de ce modèle dans son application économique.

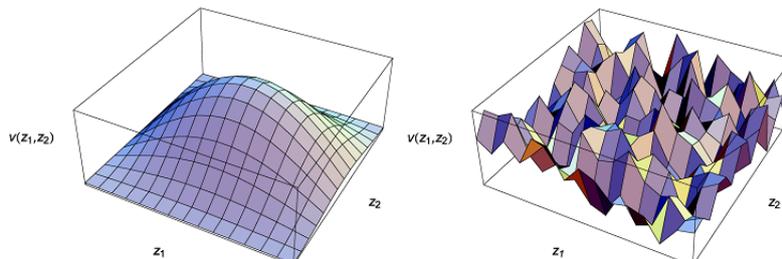
Kauffman (1993[30] ; 1995[31]) s'appuie sur Wright (1931[47]) pour tenter de simuler l'évolution d'une population d'organismes artificiels dans un espace à N dimensions. Chacune de ces dimensions représente un gène particulier composé de deux allèles. Ces allèles sont symbolisés par une chaîne binaire, et donc chaque gène, ou dimension, peut prendre deux états : 0 ou 1. Par ailleurs, chaque gène est supposé être covariant avec K autres gènes, choisis de façon aléatoire. Afin d'orienter la recherche des organismes, une valeur de performance (fitness) est attribuée à chacune des localisations (locus) de l'espace de dimension N . Concrètement, cette valeur est obtenue en calculant pour chaque locus la moyenne de 2^{k+1} tirages dans une loi de probabilité. L'environnement de recherche du modèle est donc entièrement défini par les deux paramètres N et K , ce qui explique son appellation.

La surface de performance (fitness) ainsi obtenue est bien souvent "rugueuse" et en même temps plus ou moins covariante (Kauffman, 1995[31]), ainsi elle comprend de nombreux extremums locaux sans pour autant être totalement aléatoire. La figure 1 représente les deux cas extrêmes d'une surface covariante et d'une surface aléatoire, toutes deux définies sur un espace à deux dimensions. En biologie, le but des organismes évoluant sur de telles surfaces est d'en trouver le maximum global ou bien une localisation qui s'en approche. Pour atteindre cet objectif, les organismes opèrent une adaptation locale par mutations incrémentales, avec toutefois des possibilités de mutations plus importantes au moyen de « sauts » sur la surface.

Selon Kauffman (1995[31]), si l'on envisage la surface de performance (fitness) comme une surface de coûts, et les organismes comme des entreprises qui cherchent à minimiser ces coûts, alors la recherche des entreprises conduit leurs coûts à suivre une trajectoire semblable à celle des courbes d'apprentissage. En effet, sur une surface rugueuse mais covariante, les stratégies de recherche éloignées (les « sauts » sur la surface) ont de fortes chances d'être fructueuses en début de simulation, tandis qu'ensuite, ce sont les mutations/innovations incrémentales qui sont les plus fructueuses⁷. Ainsi, les coûts des firmes évoluant

7. Kauffman (1995) en donne l'explication intuitive suivante. On peut tout d'abord considérer que si l'organisme est initialement placé aléatoirement sur la surface, alors sa

FIGURE 1 – Cas extrêmes d’une surface d’adaptation covariante et d’une surface aléatoire (Chang et Harrington, 2006 p.1291)



sur une telle surface diminuent de moins en moins rapidement, reproduisant la trajectoire des coûts décrite par une courbe d’apprentissage. D’autres utilisations économiques du modèle NK existent dans la littérature. Ainsi, March (1991[35]) montre l’effet vertueux pour l’entreprise de disposer de salariés dont la socialisation est rapide et le taux de turn over plutôt important lorsque l’environnement cognitif de la firme, représenté par une surface de fitness aléatoire, est mouvant. Levinthal (1997[33]) quant à lui montre que ce sont les stratégies de recherche éloignées qui permettent aux firmes de survivre à des changements brutaux dans leur environnement. En rendant coûteux pour la firme le déplacement sur une surface, Kauffman, Lobo et Macready (2000[41]) essaient quant à eux de déterminer la distance de recherche optimale pour les entreprises. Selon leurs analyses, une firme rationnelle commencera par une recherche éloignée (innovation radicale) puis, à mesure que sa performance augmente, elle adoptera une recherche locale (innovation incrémentale).

Ces multiples applications du modèle NK en économie ont le mérite de mettre en évidence la grande diversité des problèmes économiques qui peuvent être abordés par les modèles d’adaptation. Mais

performance est proche de la valeur moyenne permise par cette surface. Ensuite, si la surface de performance (fitness) est rugueuse mais covariante, alors les localisations voisines, si elles sont meilleures que la localisation initiale, ont de fortes chances de n’être que légèrement meilleures (en raison de la covariance). En revanche, la moitié des localisations de la surface sont supérieures à la moyenne, et donc il y a de fortes chances pour qu’une localisation éloignée, choisie aléatoirement, soit plus avantageuse que les localisations du voisinage immédiat. C’est ce qui explique la survenue d’innovations radicales (de sauts) en début de simulation. Cependant, à mesure que la performance de l’organisme augmente, et donc à mesure qu’il s’approche de l’optimum global, il y a de moins en moins de localisations éloignées qui sont plus avantageuses que la localisation initiale ou que son voisinage, d’où le remplacement des innovations radicales par des innovations incrémentales. (voir notamment p.195).

ce modèle biologique présente certaines faiblesses dans ses applications économiques. En effet, il repose sur une surface de performance aléatoire, qui n'a donc aucun fondement économique (Chang et Harrington, 2006[9]). Par ailleurs, puisque les processus de recherche simulés correspondent en fait à des processus d'innovation, on peut reprocher à ces applications de ne pas tenir compte de l'environnement économique dans lequel s'opère la recherche des entreprises. Ainsi, les modèles NK ne prennent pas en compte les multiples et constantes interactions entre les sphères de recherche, d'innovation, de production, de diffusion et de consommation (Kline et Rosenberg, 1986[32]).

Le modèle d'adaptation proposé par Chang et Harrington (2000[7]; 2004[8], 2006[9]) constitue un indéniable effort pour inscrire la construction de la surface de performance dans la théorie économique. Ce modèle s'efforce d'établir le degré optimal de centralisation pour l'organisation d'une firme de grande distribution composée d'une société mère et de plusieurs filiales. Chacune des filiales fait face à son propre marché, et donc à un problème d'optimisation spécifique. Concrètement, une filiale évolue dans un espace de N activités, chacune étant composée de R pratiques marchandes⁸. L'espace d'adaptation est donc de taille R^n . La firme cherche la combinaison de pratiques qui maximise la surface de performance, qui est calculée comme une surface de profit. Soit $W_i = w_1 \dots w_n$ le vecteur des pratiques marchandes préférées par le consommateur i et $Z_j = z_1 \dots z_n$, les pratiques de la firme j . La fonction de demande de chaque consommateur i est donnée par l'équation (2).

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

Avec $\beta \in (0;1)$, $\gamma > 1$ et Γ tel que $\Gamma - \sqrt{\sum_i (z_j - w_i)^2} > 1$ (Chang et Harrington, 2006[9]).

Cette fonction de demande du consommateur individuel i suggère que, quel que soit le vecteur Z choisi par la firme, une quantité non nulle de son produit sera achetée par chaque consommateur présent sur le marché. Après avoir calculé la somme des quantités demandées par les consommateurs pour chaque localisation dans R^n , une surface de profit est définie sur cet espace. Le problème de la firme consiste à maximiser la surface ainsi obtenue.

8. "Ces pratiques représentent tous les éléments qui influencent l'attrait d'un magasin pour les clients. Elles peuvent inclure le type de produits proposés, le nombre de produits proposés et les régimes de compensation [service après vente]" (Chang et Harrington, 2000[7] p.1429).

Comme nous l'avons déjà souligné, l'intérêt du modèle de Chang et Harrington (2000[7], 2004[8] et 2006[9]) est de donner un fondement économique explicite à la surface de performance, en particulier en introduisant une interaction entre les préférences des consommateurs et le processus de recherche de la firme. Cette interaction n'est cependant pas tout à fait cohérente avec la vision non-linéaire du processus d'innovation (Kline et Rosenberg, 1986[32]), puisque les préférences des consommateurs sont statiques chez Chang et Harrington. Par ailleurs, les consommateurs demandent une quantité positive de produits quelque soit le vecteur des pratiques de la firme, ce qui suggère que ce modèle n'est utilisable que dans les situations de monopole. En effet, si plusieurs firmes étaient présentes sur ce marché, chaque consommateur achèterait une quantité positive de produits à chaque entreprise présente sur le marché. Ainsi, dans le modèle proposé par Chang et Harrington, chaque filiale de l'entreprise est seule sur son marché ou, pour le dire autrement, chaque entreprise évolue sur sa propre surface de performance, chacune des surfaces étant construite à partir de préférences de consommateurs différents.

Malgré ces réserves, ce modèle reste particulièrement intéressant pour notre projet. En effet, s'il était couplé à une théorie de la dynamique des préférences des consommateurs (ce qui n'est pas le cas pour l'instant), il serait en mesure de reproduire une vision non-linéaire du processus d'innovation. De même, si la surface de performance était construite de façon à représenter une surface d'utilité qui ne rende plus systématiquement les décisions d'achat des consommateurs, alors des situations concurrentielles pourraient être modélisées. Ces remarques suggèrent d'accorder une grande importance à la théorie du consommateur dans la construction d'un modèle d'adaptation en économie. Cette prise en compte du consommateur est fondamentale dans le cas des services car les firmes de services accordent un rôle central aux consommateurs dans leurs activités d'innovation (Gallouj et Sundbo, 2000[21]). La section suivante est donc consacrée à la recherche d'une théorie de la dynamique des préférences des consommateurs.

2.3 Influences interpersonnelles et dynamiques d'opinion

La théorie microéconomique standard envisage le plus souvent des préférences des consommateurs fixes⁹, ou variables en fonction du revenu (loi d'Engel). Par ailleurs, le consommateur représentatif étudié

9. Voir Varian (2005) pour un exposé rigoureux.

est considéré en dehors de toute interaction sociale, il n'est influencé dans ses choix par aucun autre individu. Une telle théorie est donc plutôt inadaptée pour expliquer des phénomènes émergents tels que les effets de mode ou la diffusion des innovations, notamment lorsqu'on les considère à revenu donné.

Contrairement à la conception statique de la théorie traditionnelle du consommateur, les théories évolutionnistes accordent une attention particulière à la dynamique des préférences et, en dépit de la grande diversité des théories proposées, un consensus est identifiable autour de la notion de réseau social pour expliquer cette dynamique (Witt, 2001[46] ; Janssen et Jager, 2001[28] ; 2002[29] ; Cantono et Silverberg, 2009[6] ; Nelson et Consoli, 2010[36]). Le consommateur évolue donc dans un univers multi-agents et ses préférences sont influencées par celles de ses voisins ou bien des individus avec lesquels il est en contact. Cette conception de l'individu comme entité influençable est (1) compatible avec la théorie de la diffusion des innovations proposée par Rogers (1995[39]), (2) souvent formalisée par un automate cellulaire et (3) elle peut être associée à la théorie socio-psychologique de la dynamique des opinions (French, 1956[13] ; Friedkin, 1986[14] ; Hegselmann et Krause, 2002[24] et 2005[25]). Ces trois points sont développés dans cette section.

Rogers (1995[39]) se propose d'expliquer le fait stylisé bien établi selon lequel un produit dont la diffusion est un succès voit sa part de marché et le nombre de ses unités vendues suivre une trajectoire temporelle en forme de S. Selon lui, une telle trajectoire s'explique par les trois caractéristiques suivantes : (1) les individus sont hétérogènes, notamment en termes de préférences et dans leur aptitude à accepter la nouveauté¹⁰, (2) ils sont influençables, et (3) ils sont majoritairement homophiles, c'est à dire qu'ils aiment entrer en contact avec des individus dont ils sont relativement proches en termes de goûts, de statut social, d'opinions... Il faut donc envisager le réseau global des consommateurs comme un agrégat de multiples sous-réseaux différents et composés chacun d'individus semblables. Dans le cas extrême où tous les individus sont homophiles, les différents sous-réseaux sont indépendants les uns des autres, ce qui peut rendre la diffusion d'une innovation difficile. En revanche, lorsqu'un certain nombre d'agents hétérophiles sont présents dans la population, ils peuvent jouer un rôle de pont entre les sous-réseaux et devenir des leaders d'opinion en

10. Rogers (1995) propose ainsi de décomposer la population des consommateurs en cinq catégories, classées par ordre décroissant d'ouverture à la nouveauté : innovators, early adopters, early majority, late majority et laggards.

influençant les membres de nombreux autres sous-réseaux dans leurs choix d'adopter ou non une innovation. Lorsqu'une masse critique d'individus a été convaincue, une dynamique auto-entretenu de diffusion de l'innovation se met en place. La diffusion d'une innovation dépend donc d'un certain équilibre entre hétérophilie et homophilie parmi les consommateurs.

Cette théorie paraît tout à fait compatible avec les efforts visant à produire une théorie évolutionniste du consommateur. Ainsi selon Witt (2001[46]), la satisfaction des besoins humains nécessite souvent l'usage d'outils, dont l'être humain suppose qu'ils sont en mesure de satisfaire le besoin ressenti. L'individu acquiert donc ce qui est appelé une "consumption knowledge [...] by communicating with, and observing and imitating, other consumers" (p.28), d'où l'influence des autres membres du réseau sur les choix de consommation d'un individu. Cette idée d'influence se retrouve aussi dans la théorie du consommateur élaborée par Nelson et Consoli (2010[36]). Pour ces auteurs, les préférences individuelles ne sont jamais vraiment à l'équilibre, car elles sont influencées par de nombreux facteurs : les "amis", donc le réseau social, mais aussi l'âge de la personne, les accidents. . .

Une façon commune de représenter des agents dont les préférences et les choix changent constamment sous l'influence d'un réseau social est d'utiliser un automate cellulaire de dimension 2 (Hegselmann et Flache, 1998[23] ; Hegselmann et Krause, 2002[24] et 2005[25] ; Janssen et Jager, 1999[27] ; Cantono et Silverberg, 2009[6]), c'est-à-dire une matrice dans laquelle chaque case peut prendre différents états. Dans le cas présent, chaque case correspond à un consommateur, dont les états possibles sont les préférences individuelles. L'état d'un consommateur est alors constamment influencé par les états des autres consommateurs dans un voisinage donné, si bien que l'automate cellulaire est toujours en mouvement. Un automate cellulaire peut donc parfaitement représenter l'idée d'absence d'équilibre présente chez Nelson et Consoli (2010[36]) et d'encastrement de l'individu dans un réseau d'influence (Rogers, 1995[39] ; Witt, 2001[46]).

Une théorie de l'évolution des préférences des consommateurs, utilisable dans un automate cellulaire, peut nous être fournie par les travaux portant sur l'influence des interactions sociales sur les opinions des individus. A la suite des travaux de French (1956[13]), un certain nombre d'auteurs, dont Friedkin (1986[14]) et Hegselmann et Krause (2002[24] et 2005[25]), proposent de représenter l'opinion d'un individu comme étant la moyenne de son opinion et de celle de son

voisinage. Cette façon de procéder a l'avantage d'être très flexible car de nombreux types de calculs de moyennes sont possibles, de même que les coefficients de pondération utilisés peuvent être fixes ou bien dynamiques. De façon générale, en supposant qu'un individu i a $j = n$ voisins influents, et si x_{it} est l'opinion de l'individu i à la période t et a_{ij} l'importance accordée par i à l'opinion de son voisin j , nous avons :

$$x_{it} = \sum_{j=1}^{j=n} a_{ij} \cdot x_{jt-1} \quad (3)$$

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

Il peut être démontré que l'équation (3) d'évolution des préférences individuelles conduit au consensus à partir du moment où chaque couple d'agents pondère positivement l'opinion d'un troisième agent (Hegselmann et Krause, 2002[24]). Nous proposons de retenir l'équation (3) pour représenter la dynamique des opinions des consommateurs dans le modèle que nous construisons dans la suite de cet article. En effet, cette équation est dynamique, applicable à un réseau social et elle peut amener à un consensus, ce dernier étant nécessaire pour expliquer la diffusion réussie d'une innovation (Rogers, 1995[39]). De plus, nous pouvons limiter les situations d'application de cette équation afin de représenter les cas où une innovation ne parvient pas à se diffuser, par exemple, en conditionnant son entrée en vigueur au cas où un leader d'opinion se trouve dans le voisinage d'un individu.

3 Le modèle

Dans cette seconde partie, notre objectif est de construire un modèle d'adaptation qui soit conforme aux hypothèses discutées précédemment (comportement des consommateurs et définition de l'espace de recherche). Nous procédons en trois temps. Tout d'abord, nous présentons l'espace de recherche des entreprises et la mesure de performance associée, ensuite nous formulons nos hypothèses concernant les capacités d'adaptation des firmes de services sur cet espace. Enfin nous montrons que le modèle est capable de reproduire des dynamiques de marché bien connues (émergence d'un dominant design et successions de phases monopolistiques et concurrentielles).

3.1 Espace de recherche et mesure de performance

Les dimensions de l'espace de recherche sont celles du produit présentées dans l'équation (1). Ainsi, une firme k offrira un service de

prix x_{kt} , d'externalité¹¹ y_{kt} et qui réclame une mobilité des clients notée z_{kt} . Les modèles d'adaptation (ou de recherche) sont des modèles d'optimisation discrets, et donc chaque dimension de l'espace à optimiser est définie par un nombre fini et entier de variantes. Par convention, chacune de nos trois dimensions comprendra 10 variantes telles que $x_{kt} \in [1; 10]$, $y_{kt} \in [1; 10]$ ¹² et $z_{kt} \in [1; 10]$. L'espace d'adaptation offre donc 10^3 localisations, ou designs de service, possibles. Les valeurs attribuées à chaque localisation permettent de classer et comparer les designs correspondants. Ainsi, le design correspondant à la localisation $\begin{pmatrix} 5 & 3 & 2 \end{pmatrix}$ est plus cher, moins polluant et réclame une mobilité du client moindre que le design $\begin{pmatrix} 4 & 6 & 4 \end{pmatrix}$.

Comme dans tout modèle d'adaptation, une valeur de performance est attribuée à chacune des localisations de l'espace. La particularité de notre modèle est que cette valeur dépend des préférences des consommateurs. Le modèle comprend 400 consommateurs représentés par un automate cellulaire de taille 20×20 . En début de simulation, chaque consommateur i se voit attribuer un vecteur de préférences initiales $\begin{pmatrix} x_{it} & y_{it} & z_{it} \end{pmatrix}$. En notant $RND(1; 10)$ un tirage aléatoire dans une loi uniforme définie dans l'intervalle discret $[1; 10]$, les préférences initiales sont attribuées par la procédure (4).

$$\begin{aligned}
 & x_i = RND(1; 10) \\
 & \text{si } x_i > 5 \quad \text{alors} \quad \begin{pmatrix} y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RND(1; 5) \\ RND(1; 5) \end{pmatrix} \\
 & \text{si } x_i \leq 5 \quad \text{alors} \quad \begin{pmatrix} y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RND(6; 10) \\ RND(6; 10) \end{pmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

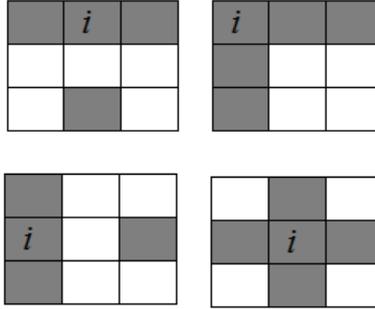
Autrement dit, nous faisons l'hypothèse que les consommateurs qui sont prêts à payer le prix le plus élevé sont aussi plus attentifs à la qualité environnementale et à la proximité du service qu'ils achètent. Par ailleurs, chaque consommateur ne peut acheter qu'un service par période, et il achètera celui qui lui procure le plus d'utilité, donc celui

11. On rappellera qu'il y a deux types d'externalités : celles produites par la mobilité $f(m_{kt})$ et celles produites par la matérialité v_{kt} , de sorte que $y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt}$.

12. Dans certains cas, nous aurons $y_{kt} \in [2; 20]$. Ce point sera abordé dans la suite du travail.

qui s'approche le plus de son propre vecteur de préférences. Dans la suite de ce travail, nous expérimenterons différents scénarios. Ainsi, si seule une source d'externalité est prise en compte par les agents, nous aurons $y_i \in [1; 10]$ et $y_k \in [1; 10]$. Si en revanche les deux sources sont prises en compte, nous aurons $y_i \in [2; 20]$ et $y_k \in [2; 20]$. Mais en l'absence de politique environnementale, nos consommateurs ignorent la caractéristique y d'externalité.

FIGURE 2 – Voisinage de Von Neumann



La dynamique des préférences d'un consommateur i dépend des préférences de ses voisins j . Le voisinage influent est un voisinage de type Von Neumann, de sorte que les j voisins influents sur i sont ceux qui seront situés immédiatement au-dessus, en-dessous, à la droite et à la gauche de i (cf. figure 2). La dynamique des préférences de i est donnée par l'équation (5).

$$\begin{pmatrix} x_{it} \\ y_{it} \\ z_{it} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_i x_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j x_{jt-1} \\ \beta_i y_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j y_{jt-1} \\ \beta_i z_{it-1} + (1 - \beta_i) \cdot (1/n) \sum_j z_{jt-1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Avec $\beta_i \in (0.1; 0.9)$, un paramètre indiquant le degré d'indépendance du consommateur i vis-à-vis de ses voisins et n , le nombre de voisins influents. Dans le cas standard, $n = 4$ mais nous verrons que cette valeur pourra changer selon le scénario envisagé. La valeur de performance U_{lt} de la localisation l en t est donnée par l'équation (6).

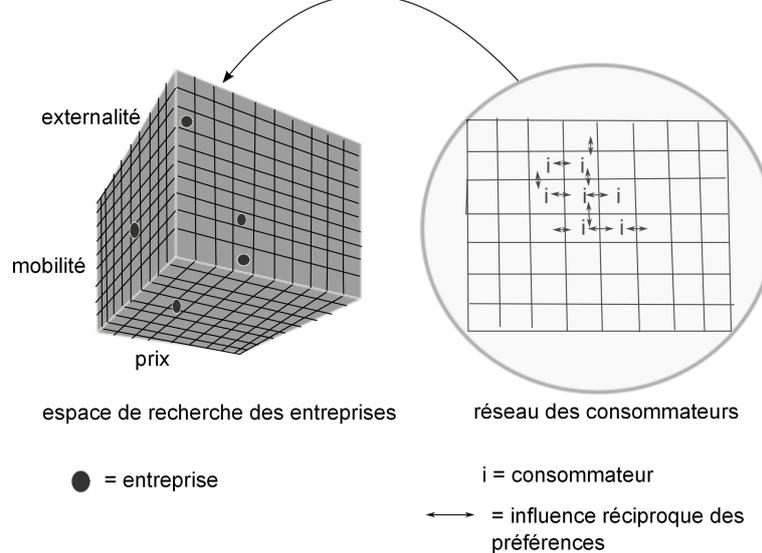
$$U_{lt} = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left[10 - \frac{1}{3} \cdot (|x_{it-1} - x_l| + |y_{it-1} - y_l| + |z_{it-1} - z_l|) \right] \quad (6)$$

Avec $(x_l \ y_l \ z_l)$ les coordonnées de la localisation (ou design) l dans l'espace de recherche à trois dimensions, et $N = 400$, le nombre total de consommateurs. Cette équation signifie que, plus un design l est proche du vecteur de préférences d'un grand nombre de consommateurs, et plus ce design sera performant, donc attractif, du point de

vue des firmes. De plus, $U_{it} \in [1; 10]$ car chaque distance $|x_{it-1} - x_t|$ est au moins égale à 0 et au plus égale à 9.

En résumé, les préférences des consommateurs sont en mouvement grâce à l'équation (5), ce qui provoque des variations dans les valeurs de performance des localisations de l'espace de recherche des entreprises (équation 6). On pourrait considérer que le modèle représente un marché sur lequel un sondage est réalisé auprès des consommateurs à chaque période, ce qui va indiquer aux firmes vers quel design plus ou moins écologique il faut tendre. Le fonctionnement du modèle est résumé par la figure 3.

FIGURE 3 – Résumé du fonctionnement général du modèle
actualisation des valeurs de performance



3.2 Comportements de recherche et règle d'entrée et de sortie des entreprises

La littérature économique a longtemps négligé la question de l'innovation dans les services. Elle s'y est intéressée finalement, tout d'abord, en concluant à une certaine faiblesse des services dans ce domaine. Les services seraient peu innovants : ils produisent en effet peu d'innovations technologiques, et ils ne s'appuient pas sur des activités de R-D (qui seraient prises en charge par des départements de R-D spécialisés). Un certain nombre de travaux relativement récents (pour une

synthèse, cf. Gallouj et Djellal, 2010[19]) sont venus remettre en cause ces jugements négatifs. Il y aurait ainsi dans les services des innovations cachées et invisibles aux outillages analytiques traditionnels (des innovations non technologiques de produit et de processus, des innovations ad hoc et sur-mesure, des innovations organisationnelles, des innovations sociales ...).

Dans notre modèle, nous faisons l'hypothèse que les firmes de services innoveraient régulièrement. Elles entreprennent des activités de recherche à toutes les périodes. Par ailleurs, nous considérons que la tendance au développement de logiques de sur-mesure, et plus fondamentalement, la nature (d'un certain point de vue) immatérielle de leur production, pousse les firmes de services à accorder une grande importance aux standards de qualités et aux exigences de la demande (Gallouj et Sundbo 2000[21]). C'est un argument supplémentaire en faveur du calcul de nos valeurs de performance à partir d'une théorie de la dynamique des préférences des consommateurs.

Par hypothèse, les firmes du modèle sont rationnelles, c'est-à-dire qu'elles cherchent le design dont la performance est maximale. Cependant, cette rationalité est perturbée par une information limitée : les firmes ne connaissent pas le design dont la valeur de performance est maximale. En début de simulation, une localisation aléatoire dans l'espace de recherche est attribuée à dix firmes. Ensuite, à l'issue de chaque période de vente, les firmes constatent leur part de marché et la comparent à la moyenne en vigueur selon la règle suivante : si une firme a une part de marché supérieure à la moyenne, alors elle n'est pas incitée à innover, dans le cas contraire elle cherchera à innover¹³. Cette règle est nécessaire, car le résultat d'un effort d'innovation en termes de parts de marché est incertain. En effet, puisqu'un design plus performant a aussi plus de chances d'être visé par les autres firmes, il peut être avantageux de conserver le design actuel (moins performant) s'il procure un résultat économique satisfaisant¹⁴.

13. Cette hypothèse est semblable à celle formulée par Winter (1984[45]). Chez cet auteur en effet, les firmes ne réalisent des dépenses de R-D que lorsqu'elles sont en-dessous d'un certain niveau de profit.

14. Nous considérons donc que la part de marché moyenne est un résultat économiquement satisfaisant. En effet, si toutes les firmes offraient le même design, les consommateurs choisiraient leur service de façon aléatoire, ce qui procurerait à chacune des firmes une part de marché théorique égale à la moyenne. Chaque firme est « consciente » que si l'ensemble formé des valeurs de performance a un optimum global unique et que toutes les firmes veulent l'atteindre, alors sa part de marché tendra asymptotiquement vers la moyenne si elle cherche, elle aussi, à atteindre ce maximum global. Ceci explique l'inclinaison des firmes à conserver une situation qui procure une part de marché supérieure à la moyenne,

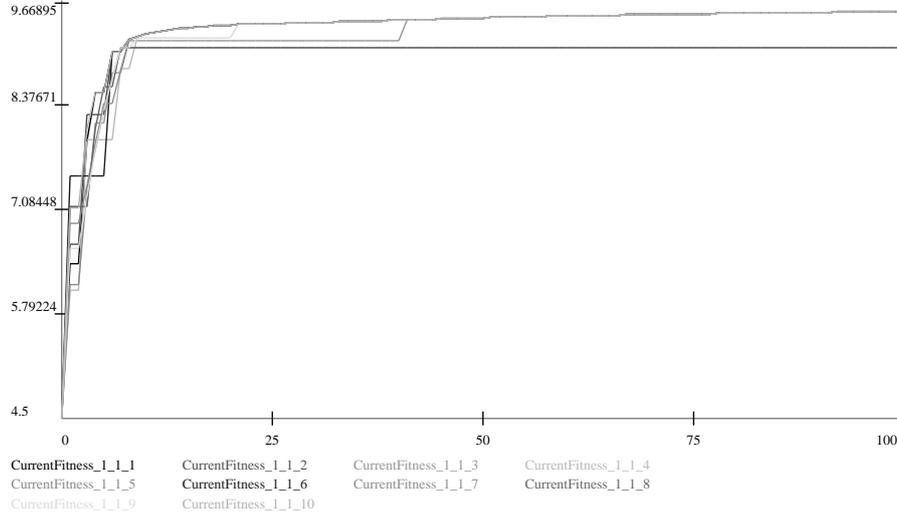
Lorsqu'elles s'engagent dans une activité de recherche, les firmes ont également des capacités cognitives qui sont limitées en ce sens que leur recherche est surtout locale. Autrement dit, toutes les possibilités d'innovations incrémentales mais une seule possibilité d'innovation radicale sont testées par la firme à chaque période. Dans le cas de l'innovation radicale, une localisation est tirée aléatoirement. La firme choisira parmi tous les designs et son design actuel celui qui a la valeur de performance la plus élevée. On note que les innovations radicales sont de plus en plus rarement les options les plus avantageuses au fur et à mesure que la simulation se déroule, notamment parce que la firme est de plus en plus proche du maximum de performance possible (voir la note 7 sur ce point). C'est l'idée bien connue selon laquelle les innovations radicales sont suivies d'innovations incrémentales.

La figure 4 représente la performance atteinte par les dix entreprises dans une simulation à 100 périodes. On remarque que les innovations radicales, repérables par des sauts de performance, sont de plus en plus rares à mesure qu'on se rapproche du maximum de la surface, qui est de 10, au profit des innovations incrémentales, qui correspondent ici à des augmentations graduelles de performance.

En ce qui concerne les entrées et sorties d'entreprises, nos hypothèses sont les suivantes. Tout d'abord, la population d'entreprises est constante. Ainsi, une firme qui quitte le marché est immédiatement remplacée par une nouvelle. Nous considérons également qu'une firme doit quitter le marché dès qu'elle réalise une part de marché nulle. Tout comme chez Levinthal (1997[33]), l'entrée qui s'ensuit peut être innovante ou répliquative. Chez cet auteur, la probabilité d'une entrée répliquative est d'autant plus forte que la charge génétique (genetic

même si elle est sous-optimale en termes de désirabilité pour les consommateurs. Nous introduisons également par ce biais une possibilité de lock-in des firmes dans un design sous-optimal.

FIGURE 4 – Evolution de la performance atteinte par les entreprises sur le marché simulé



load) de la population des entreprises est élevée¹⁵.

On préférera plutôt utiliser l'indice de Herfindahl-Hirshman (HHI) pour décider du caractère innovant ou réplcatif des entrées sur le marché. Ainsi, lorsqu'une entrée doit avoir lieu, un tirage aléatoire est réalisé dans une loi uniforme définie sur le compact $[0; 1]$. Si la valeur du tirage est supérieure au HHI, alors l'entrée est innovante, sinon elle est réplcative. Autrement dit, plus le marché se rapproche d'une situation de monopole et plus les entrées seront réplcatives. Concrètement, un entrant qui choisit la réplcation copiera le design de l'une des firmes survivantes, en privilégiant le design de la firme la plus performante. Quant à l'entrant innovant, il choisit 5 localisations aléatoires et il compare la performance de ces designs potentiels avec celui de l'une des firmes déjà en place. Le design choisi sera le

15. Soit U_{max} la performance maximale atteinte par l'un des designs proposés sur le marché et \bar{U} la performance moyenne des designs. En notant L la charge génétique de notre population d'entreprises nous avons :

$$L = (U_{max} - \bar{U})/U_{max}$$

Selon cette conception, plus un design est supérieur aux autres et plus le nouvel entrant sera tenté de le copier. Si nous remplaçons la « performance » par une mesure de profit, on peut interpréter cet indice de la façon suivante : plus une firme apparaît profitable par rapport aux autres, et plus la probabilité est élevée pour que les autres firmes (firmes en place ou firmes entrantes) la copient.

plus performant d'entre les 6 designs observés. Cette procédure implique que les entrées sont de moins en moins innovantes à mesure que le marché devient mature. Nous pouvons justifier ce postulat de deux façons : d'abord, comme nous le verrons dans la section suivante, le modèle tend vers le dominant design, or l'incitation à réaliser une entrée innovante sur un marché où un dominant design est déjà présent est très faible, à moins de proposer une technologie supérieure à celle du produit en place (Windrum et Birchenhall, 2005[43]). Ensuite, l'équation (5) assure la convergence des préférences, et donc à mesure que la simulation se déroule, les possibilités de varier les designs se réduisent. Dans un tel contexte (dominant design et préférences assez homogènes des consommateurs), proposer un design innovant conduit immédiatement à l'échec.

3.3 Dynamiques émergentes : destruction créatrice et dominant design

Afin de s'assurer de la pertinence d'un modèle théorique, il est utile de comparer son comportement dynamique avec des phénomènes concrets.

Selon Bleda et Valente (2009[5]), les marchés de produits hétérogènes sont caractérisés par des tendances à la succession de phases de concurrence et de monopole. La figure 5 reproduit certaines propriétés émergentes¹⁶ du modèle dans une simulation à 200 périodes. Les parties (c) et (d) de la figure montrent que les designs de services sont très hétérogènes en début de simulation. Cette hétérogénéité produit de fortes différences de parts de marché (partie (a)), ce qui révèle des niveaux différents d'adaptation aux préférences des consommateurs. Il en résulte une réduction de la diversité des designs par l'innovation et la copie des designs à succès, et donc une homogénéisation progressive des parts de marché.

Après une première dynamique d'homogénéisation des designs et des parts de marché, chaque innovation de produit se traduit par une nouvelle dispersion des parts de marché avec l'apparition de monopoles. En effet, le mouvement d'homogénéisation dans une caractéristique du service ne signifie pas que toutes les caractéristiques s'homogénéisent en même temps. En conséquence, une firme qui copie une caractéristique à succès d'une autre firme propose un nouveau design

16. Une propriété émergente est "une propriété découlant des interactions des unités [agents] qui n'est pas une propriété des unités [agents] individuelles" (Tsfatsion, 2006[42] p.836).

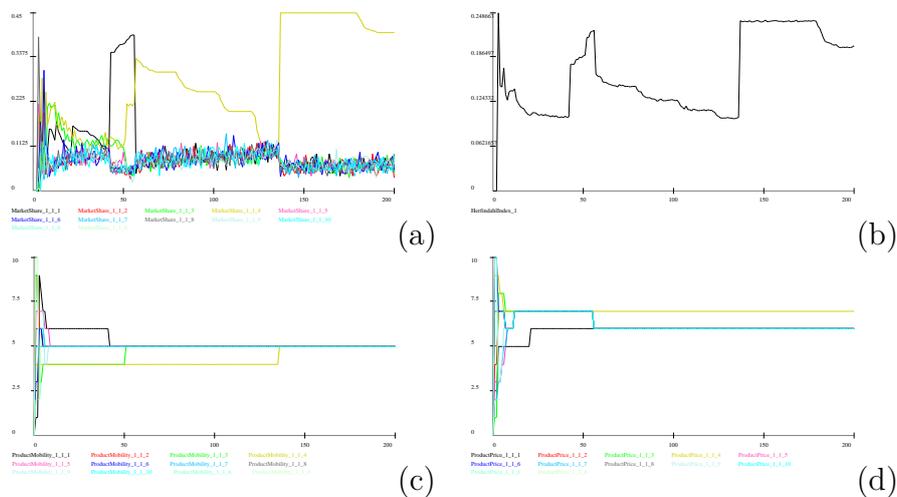


FIGURE 5 – (a) Dynamique des parts de marché, (b) Evolution de l'indice de Herfindahl-Hirshman, (c) homogénéisation du degré de mobilité des services proposés, (d) homogénéisation des prix

unique qui plaît aux consommateurs et lui procure une position nouvelle de monopole. Deux mécanismes rendent cependant temporaire la position dominante : (1) les firmes de la frange concurrentielle peuvent elles aussi innover, produisant une chute brutale de la part de marché de la firme jusque-là dominante, et (2) la dynamique des préférences des consommateurs peut écorner peu à peu l'avantage qu'avait acquis la firme innovante. L'indice de Harfindahl-Hirshman (partie (d)) permet de capter la dynamique générale de succession de phases de dispersion et d'homogénéisation des parts de marché.

Le modèle parvient donc à reproduire le comportement d'un marché en concurrence en combinant émergence progressive d'un dominant design et succession de phases de dispersion et d'homogénéisation des parts de marché.

4 Politiques environnementales et éco-innovations de produit dans les services

Le modèle semble parvenir à reproduire les dynamiques concurrentielles à l'œuvre sur un marché de produits différenciés. Il s'agit désormais de l'utiliser pour répondre à nos deux questions initiales : les politiques environnementales ont-elles une incidence sur le design environnemental des services proposés sur le marché ? Le cas échéant,

quelle est la plus efficace des deux politiques : la taxation des externalités ou l'information des consommateurs ? Notre modèle offrant de nombreuses possibilités de scénarios de politiques environnementales, nous commençons par exposer tous les scénarios testés, puis nous présentons les résultats obtenus.

4.1 Les politiques environnementales

Par définition, un effet externe n'est pas évalué par le marché. Ainsi, lorsqu'aucune politique environnementale n'est appliquée, les comportements des consommateurs sont déterminés par les deux hypothèses suivantes :

1. la tolérance y_{it} des consommateurs envers les externalités est fixe,
2. les externalités n'entrent pas dans la décision d'achat.

Par conséquent, en l'absence de politique publique, la valeur de performance des différents designs et son évolution sont totalement indépendantes de la dimension "externalité" du service. Les politiques environnementales peuvent porter sur toutes les externalités à la fois y_{kt} , ou sur certaines de leurs composantes : uniquement les externalités liées à la mobilité $f(m_{kt})$ ou bien les dégradations engendrées par la matérialité de la prestation de service v_{kt} . En notant ms_{kt} la part de marché de la firme k en t , nous calculons un indice de pollution moyenne \bar{y}_t . Cet indice tient compte des externalités totales y_{kt} car, même si les agents n'en ont pas conscience, c'est toujours ce niveau de pollution y_{kt} qui est rejeté dans la nature à chaque transaction de service.

$$\bar{y}_t = \sum_{k=1}^{10} ms_{kt} \cdot y_{kt} \quad (7)$$

C'est cet indicateur qui nous servira à évaluer l'effet des politiques publiques. Nos simulations envisagent deux types de politiques environnementales : une politique d'écotaxe et une autre d'information des consommateurs, par exemple au moyen de labels.

4.1.1 L'écotaxe

En appliquant le principe du "pollueur payeur", la taxe à payer pour une firme k consiste en une somme T identique au niveau d'externalité perçu et mesuré par les pouvoirs publics. Trois cas de figure sont alors possibles : $T = f(m_{kt})$, $T = v_{kt}$ ou $T = y_{kt} = f(m_{kt}) + v_{kt}$. La taxe aura pour effet immédiat de modifier l'échelle des prix (tableau 1), sans que pour autant la capacité à payer des consommateurs

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

TABLE 1 – Effet des différentes politiques de taxe sur l'échelle des prix

n'en soit affectée, ce qui devrait forcer des entreprises à adopter des designs plus écologiques.

4.1.2 La politique d'information

En début de simulation, les externalités produites y_{kt} ne sont pas évaluées par les consommateurs et leurs préférences environnementales y_{it} sont inactives. Les politiques d'information vont permettre de corriger ce manque de clairvoyance des agents. Comme pour la taxation, trois situations sont possibles : l'information peut porter sur l'une des deux sources d'externalité, $f(m_{kt})$ ou v_{kt} , ou bien sur les deux à la fois, y_{kt} .

Les consommateurs sont hétérogènes (leurs préférences y_{it} sont différentes). Nous supposons ainsi qu'une campagne d'information aura deux effets différents dans le temps.

- Un effet immédiat : les consommateurs les plus écologiques réagissent immédiatement en intégrant l'externalité perçue par les pouvoirs publics ($f(m_{kt})$, v_{kt} ou y_{kt} selon le cas) dans leur décision d'achat. Pour représenter cet effet, nous définissons un seuil E tel que, si la tolérance y_{it} de l'individu i pour les externalités remplit la condition $y_{it} \leq E$, alors l'individu i tiendra compte de l'information qu'il a reçue dans sa décision d'achat. De plus, la préférence y_{it} subira ensuite l'influence des préférences environnementales des autres consommateurs écologiques qui se trouvent dans son voisinage (à condition que de tels consommateurs se trouvent bien dans ce voisinage).
- Effet médiat : Les consommateurs j dont les préférences sont telles que $y_{jt} > E$ peuvent aussi devenir écologiques en étant influencés par leurs voisins. En notant K , un paramètre indiquant le nombre de voisins écologiques (n_{et}) nécessaire pour qu'un processus de contagion ait lieu, j adoptera lui aussi une attitude écologique dès lors que $n_{et} \geq K$.

TABLE 2 – Récapitulatif des scénarios simulés pour chacun des trois niveaux d’information des pouvoirs publics

	Politique d’Information				information et écotaxe				écotaxe
	K=0	K=1	K=2	K=3	K=0	K=1	K=2	K=3	
E=1									
E=2									
E=5									
E=7									
E=10									

4.2 Résultats

Chaque simulation dure 1000 périodes, et les politiques environnementales sont mises en place à partir de la période 200. Les paramètres E et K offrent une grande variété de possibilités de simulations. Ainsi, pour chaque niveau d’information des pouvoirs publics sur les externalités (qu’il s’agisse de l’externalité liée à la mobilité $f(m_{kt})$, à la matérialité v_{kt} , ou des deux y_{kt}), nous avons simulés tous les cas de figure décrits dans le tableau 2.

Au total, nous avons envisagé 123 scénarios et répété chacun d’eux 20 fois. Pour chaque scénario, la moyenne de l’indice de pollution globale \bar{y}_t pour ces répétitions est présentée en annexe. Les séries obtenues permettent de dégager un certain nombre de résultats généraux.

Résultat 1 : Les firmes réagissent aux politiques environnementales en éco-innovant.

Cette conclusion vient de l’observation, dans tous les scénarios, d’un changement dans la dynamique de l’indice de pollution \bar{y}_t au moment de la mise en place de la politique environnementale. Cette réaction provient de l’influence des politiques publiques sur les valeurs de performance de l’espace de recherche, notamment par l’intermédiaire des préférences des consommateurs. En d’autres termes, cette conclusion découle de l’attention que portent les entreprises à ces préférences.

Résultat 2 : La volatilité des externalités est considérablement réduite lorsqu’une taxe est mise en place.

De façon générale, la volatilité de l’indice de pollution \bar{y}_t signifie que plusieurs designs environnementaux sont en concurrence. Une

telle situation est le produit de l'hétérogénéité des préférences écologiques des consommateurs, d'où la volatilité plus prononcée lorsque l'apprentissage social est difficile ($K=3$) et sans taxe. Pour comprendre comment une écotaxe peut amener un dominant design environnemental lorsque les consommateurs sont hétérogènes, il faut se souvenir de notre hypothèse de relation négative entre la tolérance aux externalités y_{it} et le prix préféré x_{it} . Sous cette hypothèse, la population des consommateurs peut être divisée en deux groupes : les consommateurs aisés pour qui les externalités sont insupportables, et les consommateurs pauvres qui ne se soucient guère de l'environnement. Or, l'écotaxe rend les produits polluants également plus chers, et comme dans un contexte d'apprentissage social difficile les consommateurs pauvres ne valorisent pas les externalités, les préférences pour les prix de ces derniers, et l'envie de produits propres des consommateurs plus riches, convergent vers un même design propre et relativement peu cher. Ainsi, la taxe a cette capacité de créer une convergence des designs de produit lorsque les préférences des consommateurs sont hétérogènes.

Résultat 3 : Sauf dans le cas où une politique d'information porte sur l'externalité liée à la mobilité, c'est lorsque la diffusion du comportement écologique est difficile ($K=3$) que les politiques environnementales sont les plus efficaces.

Ce résultat est plutôt paradoxal dans la mesure où il exprime l'idée qu'il vaut mieux une population comportant un nombre relativement faible d'individus qui valorisent l'environnement (c'est-à-dire qui préfèrent des externalités environnementales faibles). Mais il s'explique aisément par l'action du paramètre K . En effet, lorsque K traduit une diffusion aisée des comportements écologiques, des individus de moins en moins sensibles à l'environnement prennent part au débat public sur la pollution. Cette participation a deux effets : d'une part, elle augmente la tolérance des autres individus aux externalités via l'équation (5), et d'autre part, elle réduit la polarisation de la distribution des valeurs de performance sur les designs les plus écologiques en raison de l'incorporation de valeurs relativement élevées de tolérance aux externalités dans l'équation (6). Pour le dire autrement, des individus peu concernés par l'environnement peuvent (1) réduire la sensibilité de la population, par exemple en avançant des arguments contre la thèse d'un réchauffement climatique. (2) Ils peuvent aussi contribuer à la disparition d'un marché de niche dans les services les plus écologiques. En effet, un marché de niche pour de tels services n'est possible que si une fraction des consommateurs manifeste une répulsion prononcée envers les services polluants. En d'autres termes,

les politiques d'information des consommateurs devraient, d'après nos résultats, être évitées auprès de populations dans lesquelles les phénomènes de contagion sont rapides.

Nous observons que, lorsque la politique d'information est appliquée sur les externalités liées à la mobilité sans être accompagnée d'une écotaxe, les externalités sont plus faibles lorsque K traduit une diffusion aisée des comportements écologiques ($K = 1$). Ce résultat est contraire à celui de tous les autres scénarios de politiques environnementales. Il s'explique par la relation que nous avons postulée entre la mobilité du client, z , et son externalité, $f(m)$ avec $m \geq z$. La relation entre m et z étant de nature stochastique, le consensus qui s'établit sur la mobilité (cf. le dominant design émergent sur la figure 5 c) est compatible avec une large gamme d'externalités liées à cette mobilité. Cette grande diversité des profils d'entreprises en termes d'externalités liées à la mobilité nécessite un large consensus, d'où les meilleurs résultats obtenus pour une population homogène dans ce cas.

Résultat 4 : La politique d'écotaxe est plus efficace que la politique d'information

Cette efficacité provient de divers avantages de l'écotaxe sur l'information. D'abord, le résultat d'une écotaxe ne dépend pas des caractéristiques cognitives de la population. Ensuite, nous avons constaté qu'une écotaxe pouvait rendre compatibles des préférences hétérogènes, d'où la facilité de l'émergence d'un dominant design environnemental. Par ailleurs, la politique d'information apparaît désavantagée par la façon dont les préférences des individus semblent évoluer dans une situation où les consommateurs sont encastés dans un réseau d'influences interpersonnelles réciproques. En effet, dans un tel contexte les préférences des individus semblent s'homogénéiser autour d'une valeur intermédiaire, qui n'est guère satisfaisante du point de vue environnemental (notamment parce que l'on sait désormais que l'écotaxe permet de faire beaucoup mieux).

Nous pouvons aussi remarquer que, dans le cas où la politique d'information est appliquée seule sur les externalités liées à la matérialité, il y a un risque d'effet pervers. En effet, lorsque la diffusion des comportements écologiques est aisée, $K = 0$ ou $K = 1$, la politique publique provoque l'émergence d'un design de produit plus polluant. Ce résultat s'explique par l'oubli des externalités liées à la mobilité, $f(m)$ car, comme nous l'avons déjà remarqué, la relation stochastique postulée entre la mobilité et son externalité induit la présence d'un

grande diversité de designs écologiques en termes de mobilité. Ainsi, lorsque l'information ne porte que sur les externalités liées à la matérialité, le design environnemental moyen sera d'autant meilleurs que la population des consommateurs est hétérogène, et donc qu'il existe des niches de marché dans les designs les plus propres (cf. le résultat 3).

Résultat 5 : Une politique environnementale est plus efficace lorsqu'elle porte sur toutes les sources d'externalité.

Cette observation est en quelque sorte une tautologie, mais elle permet de souligner l'importance qu'il faut accorder à l'examen minutieux des sources d'externalité, examen qui semble particulièrement nécessaire dans le cas des activités de services.

5 Conclusion

Notre objectif initial était double : savoir si les entreprises de services sont sensibles aux politiques environnementales, et déterminer lesquelles des politiques de taxe ou d'information des consommateurs sont les plus efficaces pour inciter à l'émergence d'un dominant design écologique dans les services. Nous avons tenté de répondre à ces questions en construisant un modèle théorique d'innovation des firmes de service. Ce modèle a la particularité de représenter une coévolution entre la dynamique des préférences d'une population de consommateurs hétérogènes et la direction prise par les entreprises dans leurs activités de recherche. De plus, l'espace de recherche des firmes offre la particularité d'incorporer deux sources importantes de pollution dans les activités de services, à savoir leur environnement matériel et la mobilité nécessaire à la relation de service.

Nos résultats montrent que les politiques environnementales sont capables d'inciter les firmes de service à éco-innover, et que la politique d'écotaxe semble être plus efficace que la politique d'information des consommateurs. En effet, la politique d'information peut engendrer un effet pervers dans la mesure où lorsqu'elle parvient à pousser tous les consommateurs à tenir compte des externalités environnementales, la dynamique de leurs préférences environnementales peut entraîner la disparition des niches de marchés dans les services les plus écologiques et favoriser l'apparition d'un dominant design qui peut même être relativement plus polluant qu'en l'absence de politique d'information. L'écotaxe a également un avantage important sur la politique d'information : elle rend convergents les intérêts de groupes de consom-

mateurs hétérogènes, réduisant ainsi la volatilité du design écologique moyen. Nos simulations confirment également ce qui peut paraître une évidence, à savoir qu’il vaut mieux des politiques publiques qui portent sur tous les canaux de pollution, c’est-à-dire ici sur la pollution issue de la matérialité et de la mobilité, plutôt que des politiques qui ne visent que l’un de ces canaux.

Références

- [1] William J. Baumol. Macroeconomics of unbalanced growth : the anatomy of urban crisis. *The American Economic Review*, 57 :415–426, 1967.
- [2] William J. Baumol. Foreword. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter Foreword, pages xviii–xxi. Edward Elgar, 2010.
- [3] William J. Baumol. The two-sided cost disease and its frightening consequences. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter 4, pages 84–92. Edward Elgar, 2010.
- [4] William J. Baumol, Sue Anne Batey Blackman, and Edward N. Wolf. *Productivity and American leadership : the long view*. The MIT Press, 1994.
- [5] Mercedes Bleda and Marco Valente. A demand-oriented approach to reduce pollution. *Technological Forecasting & Social Change*, 76 :512–524, 2009.
- [6] Simona Cantono and Gerald Silverberg. A percolation model of innovation diffusion : the relationship between diffusion, learning economies and subsidies. *Technological Forecasting & Social Change*, 76 :487–496, 2009.
- [7] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Centralization vs. decentralization in a multi-unit organization : a computational model of a retail chain as a multi-agent adaptive system. *Management Science*, 46 :1427–1440, 2000.
- [8] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Organization of innovation in a multi-unit firm : coordinating adaptive search on multiple rugged landscape. In W. Barnett et al., editor, *Economic Complexity*, chapter 7, pages 189–214. Emerald Group Publishing Limited, 2004.
- [9] Myong-Hun Chang and Joseph E. Harrington. Agent-based models of organizations. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L.

- Judd, editors, *Handbook of Computational Economics. Agent-Based Computational Economics*, chapter 26, pages 1273–1337. North-Holland, 2006.
- [10] Erik J. de Vries. Innovation in services in networks of organizations and in the distribution of services. *Research Policy*, 35 :1037–1051, 2006.
- [11] Faridah Djellal and Faïz Gallouj. Innovation dans les services et entrepreneuriat : au-delà des conceptions industrialistes et technologistes du développement durable. *Innovations*, 1 :59–86, 2009.
- [12] European Commission Directorate-General Environment. The potential of market pull instruments for promoting innovation in environmental characteristics. Final Report, 2009.
- [13] John R.P. French. A formal theory of social power. *Psychological Review*, 63 :181–194, 1956.
- [14] Noah E. Friedkin. A formal theory of social power. *Journal of Mathematical Sociology*, 12 :103–126, 1986.
- [15] Jean Gadrey. *L'onomie des services*. La Duverte, 1992.
- [16] Jean Gadrey. The environmental crisis and the economics of services : the need for revolution. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter 5, pages 93–125. Edward Elgar, 2010.
- [17] Faïz Gallouj. *Economie de l'innovation dans les services*. L'Harmattan, 1994.
- [18] Faïz Gallouj. Les trajectoires de l'innovation dans les services : vers un enrichissement des taxonomies lutionnistes. *Evonomies et Societes, serie economie et gestion des services*, 1 :143–169, 1999.
- [19] Faïz Gallouj and Faridah Djellal. Introduction : filling the innovation gap in the service economy - a multidisciplinary perspective. In Faïz Gallouj and Faridah Djellal, editors, *The Handbook of Innovation and Services. A Multi-disciplinary Perspective*, chapter Introduction, pages 1–23. Edward Elgar, 2010.
- [20] Faïz Gallouj and Maria Savona. Innovation in services : a review of the debate and a research agenda. *Jouranl of Evolutionary Economics*, 19 :149–172, 2009.
- [21] Faïz Gallouj and Jon Sundbo. Innovation as a loosely coupled system in services. *International Journal of Services Technology and Management*, 1 :15–36, 2000.

- [22] Faïz Gallouj and Olivier Weinstein. Innovation in services. *Research Policy*, 26 :537–556, 1997.
- [23] Rainer Hegselmann and Andreas Flache. Understanding complex social dynamics : a plea for cellular automata based modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/3/1.html>, 1998.
- [24] Rainer Hegselmann and Ulrich Krause. Opinion dynamics and bounded confidence. models, analysis and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/2.html>, 2002.
- [25] Rainer Hegselmann and Ulrich Krause. Opinion dynamics driven by various ways of averaging. *Computational Economics*, 25 :381–405, 2005.
- [26] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992.
- [27] Marco A. Janssen and Wander Jager. An integrated approach to simulating behavioral processes : a case study of the lock-in of consumption patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2 :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/2/2/2.html>, 1999.
- [28] Marco A. Janssen and Wander Jager. Fashions, habits and changing preferences : simulation of psychological factors affecting market dynamics. *Journal of Economic Psychology*, 22 :745–772, 2001.
- [29] Marco A. Janssen and Wander Jager. Stimulating diffusion of green products. co-evolution between firms and consumers. *Journal of Evolutionary Economics*, 12 :2383–306, 2002.
- [30] Stuart Kauffman. *The Origins of Order. Self Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, 1993.
- [31] Stuart Kauffman. *At Home in the Universe*. Oxford University Press, 1995.
- [32] Stephen J. Kline and Nathan Rosenberg. An overview of innovation. In Ralph Landau and Nathan Rosenberg, editors, *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*, chapter 16, pages 175–306. The National Academy of Sciences, 1986.
- [33] Daniel A. Levinthal. Adaptation on rugged landscapes. *Management Science*, 43 :934–950, 1997.
- [34] Hein Mannaerts. Environmental policy analysis with stream : a partial equilibrium model for material flows in the economy. In Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen, editors,

- Economics of Industrial Ecology*, chapter 7, pages 195–222. MIT Press, 2004.
- [35] James G. March. Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science*, 2 :71–87, 1991.
 - [36] Richard R. Nelson and Davide Consoli. An evolutionary theory of household consumption behavior. *Journal of Evolutionary Economics*, 20 :665–687, 2010.
 - [37] OECD. The service economy, 2000.
 - [38] Leslie W. Ayres Robert U. Ayres and Benjamin Warr. Is the u.s. economy dematerializing? main indicators and drivers. In Jeroen C.J.M. van den Bergh and Marco A. Janssen, editors, *Economics of Industrial Ecology*, chapter 3, pages 57–93. MIT Press, 2004.
 - [39] Everett M. Rogers. *Diffusion of innovations*. The Free Press, 1995.
 - [40] Pier Paolo Saviotti and John Stanley Metcalfe. a theoretical approach to the construction of technological output indicators. *Research Policy*, 13 :141–151, 1984.
 - [41] José Lobo Stuart Kauffman and William G. Macready. Optimal search on a technology landscape. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 43 :141–166, 2000.
 - [42] Leigh Tesfatsion. Agent-based computational economics : a constructive approach to economic theory. In Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd, editors, *Handbook of Computational Economics*, volume 2, chapter 16, pages 831–880. North-Holland, 2006.
 - [43] Paul Windrum and Chris Birchenhall. Structural change in the presence of network externalities : a co-evolutionary model of technological successions. *Journal of Evolutionary Economics*, 15 :123–148, 2005.
 - [44] Paul Windrum and Manuel Garcia-Go ni. A neo-schumpeterian model of health services innovation. *Research Policy*, 37 :649–672, 2008.
 - [45] Sidney G. Winter. Schumpeterian competition in alternative technological regimes. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5 :287–320, 1984.
 - [46] Ulrich Witt. Learning to consume-a theory of wants and the growth of demand. *Journal of Evolutionary Economics*, 11 :23–36, 2001.

[47] Sewall Wright. Evolution in mendelian populations. *Bultin of Mathematical Biology, reprinted from Genetics (vol. 16, 1931)*, 52 :241-295, 1990.

6 Annexes

FIGURE 6 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec écotaxe et politique d'information appliquées à l'externalité produite par la matérialité v_{kt}

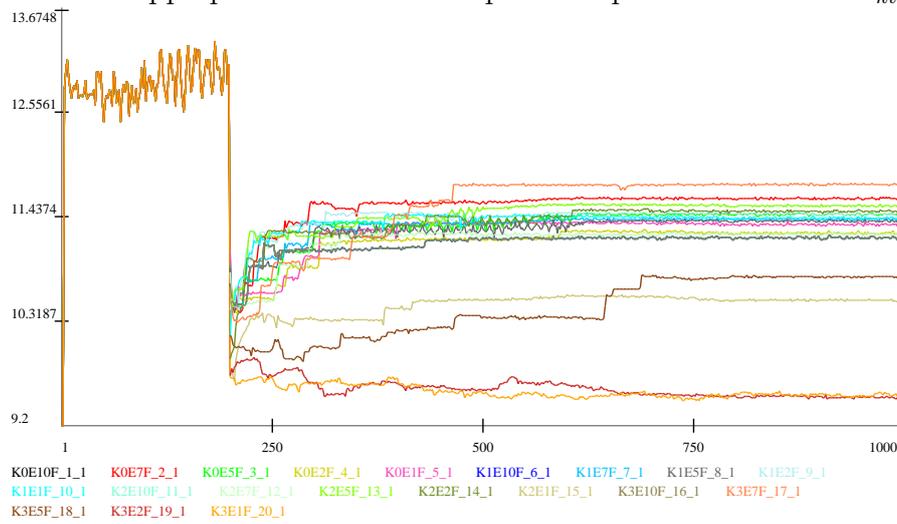


FIGURE 7 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec seulement la politique d'information appliquée à l'externalité produite par la matérialité v_{kt}

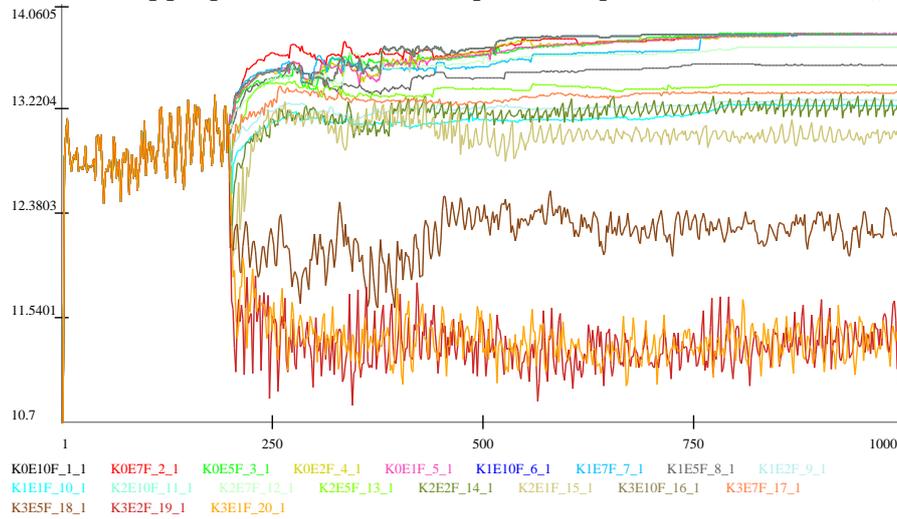


FIGURE 8 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec écotaxe et politique d'information appliquées à la mobilité z_{kt}

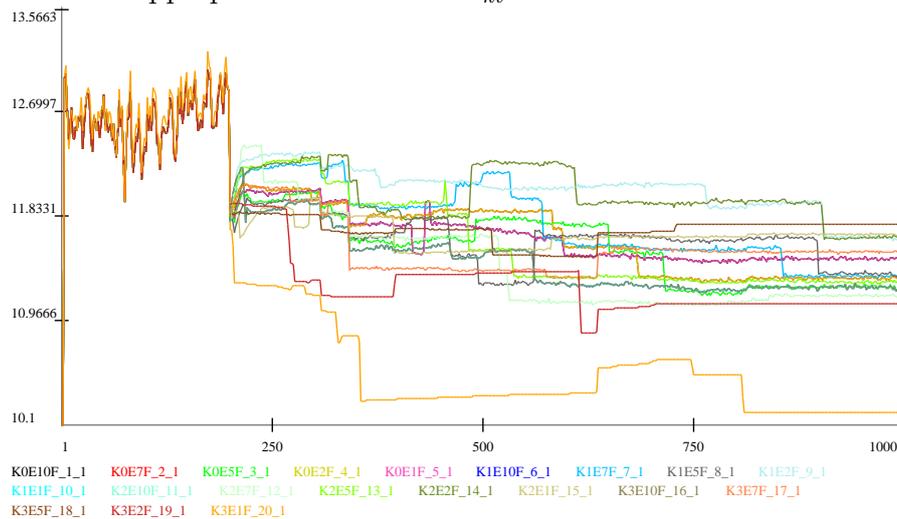


FIGURE 9 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec seulement la politique d'information appliquée à la mobilité z_{kt}

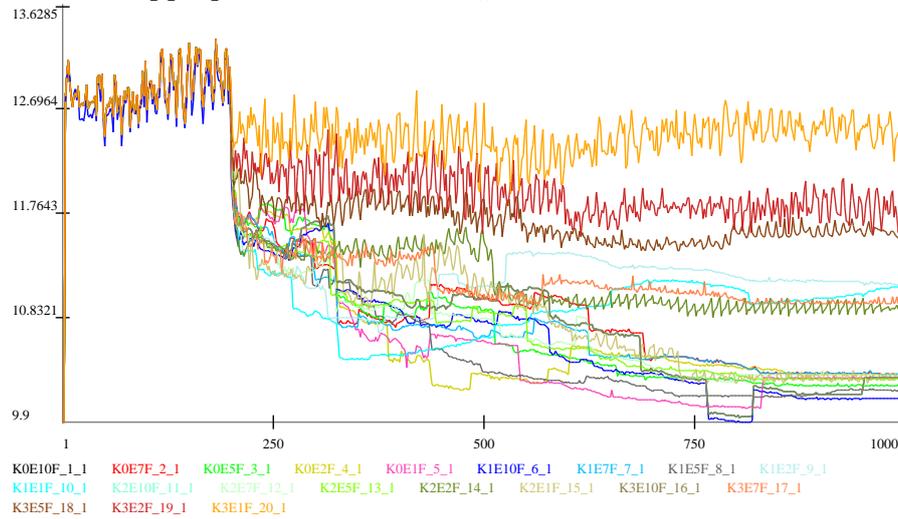


FIGURE 10 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec écotaxe et politique d'information appliquées à la somme des externalités y_{kt}

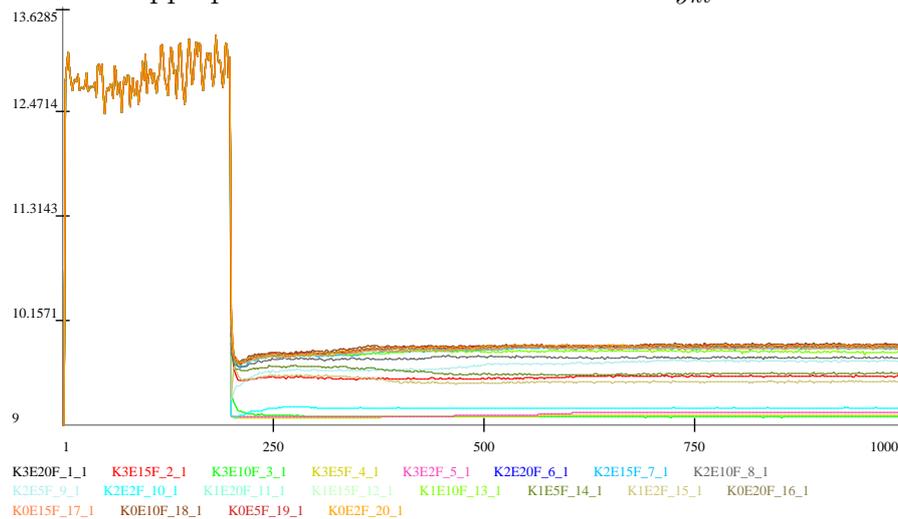


FIGURE 11 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec seulement la politique d'information appliquée à la somme des externalités y_{kt}

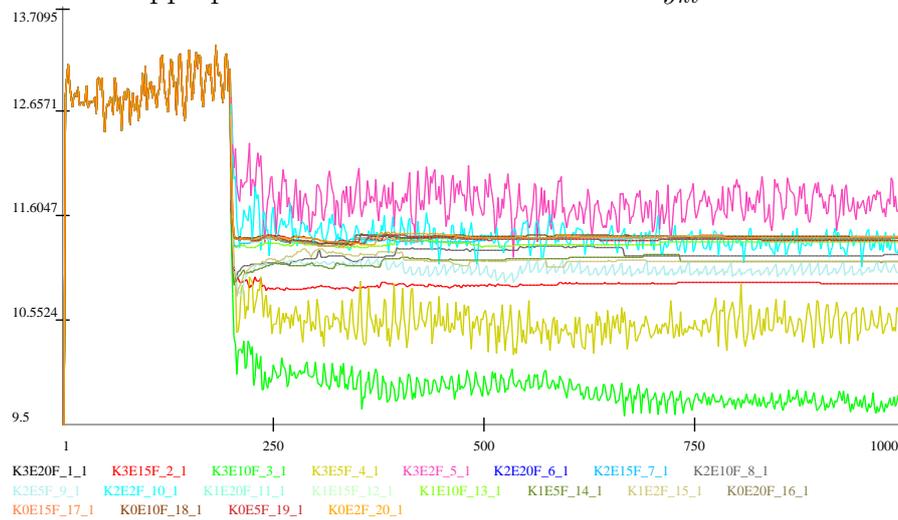


FIGURE 12 – Évolution de l'indice de pollution \bar{y}_t avec seulement l'écotaxe appliquée à l'externalité liée à la matérialité v_{kt} , à celle liée à la mobilité z_{kt} et à toutes les sources d'externalité y_{kt}

