



GREThA

Groupe de Recherche en
Économie Théorique et Appliquée

Innovations environnementales et dynamique industrielle

Vanessa OLTRA

Mäider SAINT JEAN

*Université de Bordeaux
GREThA UMR CNRS 5113*

*Cahiers du GREThA
n° 2009-22*

GREThA UMR CNRS 5113
Université Montesquieu Bordeaux IV
Avenue Léon Duguit - 33608 PESSAC - FRANCE
Tel : +33 (0)5.56.84.25.75 - Fax : +33 (0)5.56.84.86.47 - www.gretha.fr

Innovations environnementales et dynamique industrielle

Résumé

Ce document de recherche présente une analyse théorique et empirique des innovations environnementales et de leur rôle dans la dynamique industrielle. Notre approche s'inscrit dans une perspective évolutionniste du changement technologique qui nous permet de développer une analyse dynamique des innovations environnementales mettant en exergue leur caractère multidimensionnel et leur évolution le long de trajectoires technologiques enchâssés dans les paradigmes technologiques dominants. Dans cette optique, les innovations environnementales apparaissent comme des compromis technologiques visant à combiner les objectifs réglementaires et les performances environnementales avec les objectifs de productivité et de compétitivité des firmes. Les analyses sectorielles présentées dans la première section nous permettent d'illustrer les concepts, en particulier les trajectoires de technologies propres dans le cas de la chimie verte et de l'automobile, et d'identifier les principales sources de blocage et d'irréversibilités technologiques. Dans une deuxième section, nous nous concentrons sur le rôle de la demande de qualité environnementale dans les relations verticales interfirmes. Nous présentons un modèle évolutionniste de dynamique industrielle intégrant explicitement les exigences de performances environnementales de donneurs d'ordre ainsi que les activités d'innovations environnementales des fournisseurs. Les résultats des simulations mettent en évidence le rôle déterminant de la demande dans le changement de paradigme, notamment à travers une masse critique d'utilisateurs ayant des exigences environnementales et un consentement à payer élevés.

Mots-clés: innovations environnementales; paradigmes et trajectoires technologiques; compromis technologique; dynamique industrielle et modélisation évolutionniste

Environmental Innovations and Industrial Dynamics

Abstract

This article presents an empirical and theoretical analysis of environmental innovations in an evolutionary framework. Such an evolutionary analysis enables us to develop a dynamic analysis of environmental innovations emphasizing their multidimensional character and their evolution along technological trajectories embedded in dominant technological paradigms. In this perspective, environmental innovations appear as technological compromises which aim at combining regulatory objectives and environmental performances with productivity and competitiveness objectives of firms. The sectoral analyses presented in the first section illustrate these concepts, in particular the trajectories of clean technology and the sources of technological lock-in in the automotive industry and in green chemistry. In section 2, we focus on the role of demand and of environmental quality requirements in vertical relationships between firms. We present an evolutionary model of industrial dynamics which explicitly takes into account innovative activities of suppliers and environmental requirements of industrial clients. Simulation results underscore the determining role of demand in technological paradigm shifts, and more particularly the role of a critical mass of users characterized by high environmental requirements and high willingness to pay.

Keywords: environmental innovations; technological trajectories and paradigms; technological compromises; industrial dynamics and evolutionary simulation models

JEL : Q55; B52; O33

Reference to this paper: Vanessa OLTRA, Maïder SAINT-JEAN, “Innovations environnementales et dynamique industrielle”, Working Papers of GREThA, n°2009-22, <http://ideas.repec.org/p/grt/wpegrt/2009-22.html>.

Ce document constitue le chapitre 7 de l'ouvrage *Industries, Innovations, Institutions. Eléments de dynamique industrielle*, coordonné par Marie-Claude Bélis-Bergouignan, Bernard Jullien, Yannick Lung et Murat Yildizoglu à paraître aux Presses Universitaires de Bordeaux, 2010.

Ce chapitre est consacré aux innovations environnementales qui regroupent, de façon très générale, l'ensemble des produits et procédés permettant d'améliorer l'impact sur l'environnement. Il a pour objet de présenter les caractéristiques des innovations environnementales et de proposer une modélisation à la fois conceptuelle et formalisée de la dynamique de ces innovations. Les fondements théoriques et empiriques d'une telle modélisation seront progressivement exposés ainsi que les principaux résultats des analyses en découlant.

Il faut en premier lieu resituer la notion d'innovation environnementale dans un questionnement plus général sur le rôle de la réglementation environnementale sur la compétitivité des firmes. En effet, les innovations environnementales apparaissent comme un résultat plus ou moins direct de la pression réglementaire et constituent un moyen privilégié de satisfaire des compromis entre des dimensions multiples telles que l'efficacité économique, la qualité des produits et l'amélioration de la qualité environnementale. En fait, comme toutes les innovations, les innovations environnementales (IE) résultent d'une conjonction de facteurs de type *technology-push* et *demand pull*, tels que la concurrence entre les firmes, les conditions de la demande, les conditions d'appropriation des innovations, les opportunités technologiques, l'apprentissage des firmes et leur capacité d'absorption, ainsi que les caractéristiques des secteurs et les relations inter-firmes. Mais les IE présentent de surcroît la caractéristique d'être influencées par la pression réglementaire. Par conséquent et, en deuxième lieu, il est important de relier cet objet d'analyse (les IE) à un champ théorique adapté qui permette d'appréhender l'ensemble de ces déterminants, ce qui est le cas de l'analyse évolutionniste du changement technologique. D'une part, les IE y apparaissent comme circonscrites par un potentiel technologique, par les compétences des firmes et les choix qu'elles ont effectués. D'autre part, cette théorie considère l'avènement de nouveaux "paradigmes verts" en termes de phases de transition puisque les trajectoires technologiques existantes génèrent de l'inertie, voire des phénomènes de verrouillage technologique. Enfin, cette théorie montre que les phases de turbulence sont plus favorables à l'émergence de trajectoires alternatives que les phases de stabilité puisqu'elles font apparaître des fenêtres d'opportunité. Ces dernières représentent la réunion provisoire d'un ensemble de circonstances rendant possible la sélection de la nouveauté, sachant que les situations de compétition technologique affectent tout particulièrement le développement des technologies environnementales, soit parce qu'elles doivent être capables de concurrencer des technologies existantes tout en satisfaisant des fonctions similaires, soit parce qu'elles doivent remplir des

fonctions différentes pour des besoins différents. C'est donc une analyse évolutionniste du changement technique qui sera mobilisée dans ce chapitre pour appréhender les innovations environnementales. La première section s'attache à étudier le rôle du lien direct entre réglementation environnementale et innovation, tandis que la deuxième section s'intéresse au rôle indirect de la réglementation *via* la demande de qualité environnementale exprimée par des clients à des fournisseurs, en particulier dans le cadre de relations verticales interfirmes.

1. Innovations environnementales et réglementation

1.1. Le contexte général : réglementation et compétitivité des firmes

Dans ce paragraphe, il s'agit de resituer la problématique des IE dans les débats sur l'impact positif ou négatif de la réglementation environnementale sur la compétitivité des firmes. L'article de Porter et van der Linde de 1995 et l'hypothèse désormais fameuse qui en a découlé sur les résultats doublement gagnants de la pression réglementaire (*win-win effects*) ont marqué le renouvellement des analyses sur les IE et ont ouvert la voie d'un rapprochement entre l'économie de l'innovation, l'économie de l'environnement et l'économie industrielle. Selon ces auteurs, la réglementation environnementale est susceptible d'apparaître comme une opportunité et non pas seulement comme une contrainte additionnelle. Porter et van der Linde ont ainsi développé l'argument d'une relation positive entre réglementation environnementale et compétitivité des firmes. Afin de se mettre en conformité avec la réglementation, les firmes entreprennent des actions innovantes qui leur permettent non seulement de protéger l'environnement, mais également de saisir des nouvelles opportunités commerciales, ce qui améliore leur compétitivité, aboutissant ainsi à un résultat doublement gagnant. Dans cette perspective, l'innovation devient le moteur central de l'adaptation des firmes aux pressions environnementales.

Traditionnellement, l'analyse de la réglementation environnementale comme source d'incitation à innover des firmes pour protéger l'environnement a fait l'objet de nombreux travaux théoriques (Downing et White, 1986 ; Magat, 1979 ; Malueg, 1989 ; Milliman et Prince, 1989). Typiquement, le modèle de Milliman et Prince (1989) montre que les instruments de type économique (taxes, marché de droits à polluer) sont plus efficaces, en termes d'allocation des ressources après innovation, que des instruments de type *command and control*. Implicitement, ce type d'approche suppose non seulement que les firmes soient capables d'exploiter les différentes technologies disponibles, qui définissent l'ensemble de production, mais aussi que les firmes soient incitées à allouer des ressources à la recherche et développement.

Avec Porter et van der Linde, c'est la création de ressources qui est mise en avant et le lien positif entre réglementation environnementale et productivité devient la norme plutôt que l'exception. Or, sur le plan empirique, la validation de l'hypothèse de Porter donne des résultats mitigés (pour une critique voir Palmer et al, 1995). De façon générale, deux types de critiques leur sont généralement adressés :

- l'une porte sur la non automaticité d'un lien positif entre réglementation environnementale et productivité : les cas où "ça marche" sont aussi nombreux que les cas où "ça ne marche pas". Le résultat des activités de R&D étant par nature incertain, il se peut que, par chance, une entreprise se trouve dotée d'une technologie qui *ex post* se révèle être rentable. Toutefois cela n'implique pas qu'il était possible d'appréhender *ex ante* la rentabilité de l'investissement dans cette technologie sur la

base de sa profitabilité attendue;

- l'autre porte sur la capacité des pouvoirs publics en charge de la réglementation environnementale à détecter des opportunités de profit non exploitées jusqu'alors par les firmes, celles-ci étant supposées mieux informées que les pouvoirs publics.

Il est loin d'être évident qu'une réglementation environnementale puisse accroître systématiquement la performance des entreprises qui y sont soumises. La question est alors de savoir quel statut accorder à l'hypothèse de Porter.

Ambec et Barla (2000) montrent que l'ensemble des études empiriques examinant l'impact des réglementations environnementales sur l'évolution de la productivité dans des industries polluantes met l'accent sur la prise en compte de la nature de la réglementation environnementale. Les réglementations environnementales de type incitatif sont les plus susceptibles d'avoir un impact positif sur la productivité. En outre, les auteurs soulignent que les études empiriques pâtissent de la difficulté de mesurer l'intensité de la réglementation environnementale. En effet, celle-ci est souvent mesurée indirectement à partir des investissements anti-pollution¹, ce qui ne permet pas de saisir le fait que, selon l'hypothèse de Porter, les firmes vont réagir aux réglementations environnementales en modifiant leur processus de production. Or, ces changements se traduisent généralement par une augmentation des investissements sans que ceux-ci ne soient classés comme dépenses de dépollution alors que, précisément, ce sont ces types d'investissements qui seraient susceptibles d'aboutir à des améliorations de la productivité. Outre les difficultés liées à la mesure de la réglementation environnementale, les études empiriques de productivité présentent trois autres limitations importantes selon Ambec et Barla (2000) :

- Les mesures de productivité ne tiennent pas vraiment compte des améliorations dans la qualité de la production. La réglementation environnementale peut donc engendrer des bénéfices privés si les consommateurs sont prêts à payer davantage pour des biens plus respectueux de l'environnement (cf. politiques d'achat vert des pouvoirs publics).
- La perspective dynamique est essentielle à adopter. Porter et van der Linde précisent que l'impact de la réglementation environnementale est dynamique : il se peut qu'initialement la réglementation environnementale engendre des coûts, les bénéfices ne se matérialisant que plus tard. Or, la plupart des études empiriques ne testent pas l'existence d'effets dynamiques.
- Les indicateurs de productivité utilisés ne donnent aucun "crédit" pour la diminution de la pollution, alors qu'une telle réduction doit être vue (et mesurée) comme une amélioration de l'efficacité du processus de production. Ces mesures risquent donc de sous-estimer systématiquement la productivité dans les industries qui ont fait des efforts de réduction de la pollution.

Il est donc important de reconnaître comme le font Porter et van der Linde (1995) qu'une réglementation stricte risque, *a priori*, d'augmenter les coûts de dépollution des firmes qui y sont soumises. Toutefois, si l'on se place dans une perspective dynamique, ces coûts supplémentaires (ou leur simple perspective) vont pousser les entreprises à une révision générale de leur processus de production et donc à innover. Ainsi, ces efforts d'innovation peuvent non seulement aboutir à réduire les coûts de dépollution, mais également permettre l'augmentation de la productivité de la firme. Cet accroissement de la productivité résulte soit d'une amélioration de la qualité du produit offert (augmentant la valeur du produit), soit d'une

¹ Dans son enquête annuelle, le SESSI définit les investissements pour protéger l'environnement comme les efforts déployés par les industriels dans le but de protéger l'environnement et dont le résultat est l'entrée ou l'augmentation de la valeur ou de la durée d'un élément d'actif dans le patrimoine de l'entreprise.

meilleure utilisation des intrants (réduisant les coûts de production).

D'autres études empiriques basées sur des données de panel (firmes ou secteurs) traitent du lien entre la réglementation et les innovations environnementales afin de mettre en exergue l'effet incitatif de la réglementation et son impact sur la compétitivité des firmes. Ainsi, Lanjouw et Mody (1996) montrent qu'aux Etats Unis, au Japon et en Allemagne, le renforcement de la réglementation, qui se traduit par une augmentation des coûts de mise en conformité, est lié à un accroissement des dépôts de brevets dans le domaine des technologies environnementales. Dans le même ordre d'idée, Jaffe et Palmer (1997) soulignent qu'une augmentation des coûts de mise en conformité est associée à une hausse concomitante des dépenses de R&D des firmes ; alors que Cleff et Rennings (2000) précisent que l'impact de la réglementation est plus fort pour les innovations environnementales de procédé que pour les innovations de produit qui semblent davantage influencées par le comportement stratégique des firmes et l'effet de la demande. Plus récemment, Beise et Rennings (2003) suggèrent qu'une réglementation stricte peut être un moyen de constituer au niveau local un *lead market*² permettant aux firmes de bénéficier d'un avantage de "premier innovateur" ou de "premier adopteur" et d'exporter ensuite leurs innovations. Au niveau empirique, l'effet incitatif de la réglementation sur les innovations environnementales est donc bien documenté, même s'il demeure controversé par certains auteurs (voir la synthèse de Jaffe et al., 1995)³.

C'est dans ce contexte d'analyse marqué à la fois par une pleine reconnaissance de l'innovation comme rôle moteur pour maintenir ou améliorer la compétitivité des firmes et par la mise en place, notamment au niveau européen, d'une palette d'outils réglementaires visant à combiner différents types d'instruments de politique environnementale (économiques, *command and control*, volontaires) que se situent nos recherches.

1.2. Innovations environnementales et technologies propres : définitions et propriétés

En réalité, ce qui fonde le cœur même de la définition d'une innovation environnementale, *i.e.* son impact environnemental, qu'il soit intentionnel ou non, direct ou indirect, est très difficile à appréhender, tant du côté des producteurs que de celui des consommateurs. En attestent, par exemple, les difficultés d'évaluation tenant aux asymétries d'information, aux incertitudes et à l'existence de controverses scientifiques. Ainsi, plusieurs critères peuvent être utilisés pour évaluer l'impact environnemental d'une innovation : les émissions de gaz à effet de serre, eux-mêmes très divers, l'efficacité énergétique, la pollution de l'air, la pollution de l'eau, le bruit, les déchets, la pollution des sols etc. Compte tenu de cette multiplicité de critères environnementaux, l'impact environnemental global d'une innovation est très difficile à apprécier⁴. En outre, la phase d'utilisation d'une innovation environnementale et sa diffusion dans le tissu économique peuvent être à l'origine d'effets rebonds tels que l'accumulation des pollutions due à l'usage intensif d'une technologie plus propre finisse par annuler, voire par dépasser, le bénéfice environnemental initial de la technologie. D'où l'augmentation des dépenses apparaissant en aval du processus

²Une définition du concept de *lead market* est donnée dans Jacob et al. (2005, p.3) : "Some countries are earlier in adopting (environmental) innovation... If these innovations are adopted subsequently without great changes in other countries, the countries where the first market introduction took place can be viewed as *lead markets*."

³ Voir également Brunnermeier and Cohen (2003), Taylor and al. (2003), Frondel et al. (2004) ou encore Lee et al. (2004).

⁴ C'est ce que tentent de faire les approches en termes d'ACV en analysant les effets environnementaux d'un produit depuis le « berceau à la tombe ».

d'innovation et les moindres économies de coût réalisées à un premier stade⁵. Finalement, il s'avère que les innovations environnementales ne peuvent pas être définies en termes d'impact environnemental absolu mais en référence à des technologies alternatives. D'où, la définition ci-dessous :

"The production, assimilation or exploitation of a product, production process, service or management or business methods that is novel to the organization (developing or adopting it) and which results, throughout its life cycle, in a reduction of environmental risk, pollution and other negative impacts of resources use (including energy use) compared to relevant alternatives" (MEI Report, 2008)⁶.

Une telle définition fait place à un ensemble très hétérogène d'innovations, puisque tout procédé ou produit plus économe en ressources et/ou moins polluant est une IE. De plus, le degré de nouveauté de la technologie est considéré à son niveau minimum, celui de la firme. Par conséquent, cette définition englobe toutes les innovations qui permettent à une firme de diminuer progressivement ou drastiquement ses effets environnementaux négatifs à travers des nouveaux produits, procédés, méthodes ou services.

Outre la relativité de l'impact environnemental qu'elles sous-tendent, les IE peuvent être analysés à plusieurs niveaux selon les types d'innovation qu'elles impliquent ou selon l'étape du cycle de vie dans laquelle elles se situent. Ainsi, en reprenant par exemple la terminologie de Freeman (1992), trois types d'innovations environnementales peuvent être distinguées : les innovations incrémentales, les innovations radicales et les innovations systémiques. Les innovations incrémentales correspondent à des améliorations de produits, procédés ou organisations existants, et constituent la majorité des innovations environnementales actuellement développées. Les innovations radicales supposent un saut technologique nécessitant des changements considérables dans les connaissances et les compétences requises pour produire ou utiliser la nouvelle technologie. Le saut est d'autant plus difficile à franchir que les dimensions économiques et environnementales recherchées par les IE ne peuvent être combinées sans altérer les performances économiques et donc la compétitivité des firmes. Les technologies propres (cf ci-dessous) sont généralement le résultat d'innovations environnementales radicales permettant la réduction de la pollution à la source. Les innovations systémiques sont portées par des grappes d'innovations radicales qui sont économiquement et techniquement en interrelation. Kemp et Rotmans (2001) insistent sur la notion d'innovations systémiques dans la mesure où elles jouent un rôle crucial dans la gestion de la transition (*transition management*) pour atteindre des objectifs de soutenabilité. Plusieurs exemples rentrent dans cette catégorie, notamment pour développer « l'économie de l'hydrogène » qui remet en cause l'usage du pétrole et du gaz naturel pour la production d'énergie ou encore pour favoriser la « mobilité intégrée » consistant à faciliter l'utilisation de différents modes de transports.

Cette taxonomie souligne que, selon le degré de rupture et d'enclassement de la technologie dans le système existant, les freins au changement vers un système plus soutenable seront d'ampleur et de nature différentes. En particulier la question des infrastructures et des coûts de changement est d'autant plus prégnante que les innovations sont systémiques et nécessitent des grappes d'innovations. Il en résulte que les leviers

⁵ La phase de mise au rebut des produits en fin de vie peut aussi s'avérer problématique dans la mesure où l'accumulation des déchets peut générer quantitativement et qualitativement des effets négatifs qui viendraient contrebalancer les résultats positifs obtenus en amont.

⁶ Dans le rapport MEI (2008), cette définition est donnée pour le terme d'"éco-innovation", qui est ici synonyme d'innovation environnementale.

d'action de politique publique pour favoriser le développement des innovations environnementales seront également différenciés selon les types d'innovation.

Le cycle de vie de la technologie et du produit apporte également un éclairage intéressant pour les innovations environnementales. Comme le rappelle Huber (2004), l'évolution de la technologie peut être appréhendée à travers des cycles temporels différents bien qu'interdépendants : le cycle de l'innovation, la diffusion d'une innovation et le cycle de vie de l'industrie. L'innovation englobe la totalité du processus de structuration et de diffusion d'un élément nouveau du début à la fin de son cycle de vie. La diffusion désigne généralement le processus par lequel une innovation est adoptée. Sachant que le processus d'innovation et le processus de diffusion sont interdépendants, la diffusion se produit dès le début du cycle de vie de toute innovation et se poursuit tout au long des différentes étapes de ce cycle.

Le cycle de structuration d'une innovation technologique peut être décomposé en cinq étapes : phase de création précoce par invention ou découverte initiale, grâce à la recherche, l'exploration expérimentale ou artisanale ; phase de création avancée reposant sur un développement organisé ; phase de croissance forte ou accélérée d'une innovation (décollage) ; phase de maturité ; phase de stagnation, de déclin, de saturation ou de remplacement. L'objectif fondamental d'une telle représentation est de mettre en évidence que la courbe d'apprentissage d'une innovation est un processus de développement structurel, en progression continue. Chaque phase est marquée par des spécificités : type d'innovation, type de marché ou d'acteurs-clés impliqués dans le processus de structuration ou de diffusion. Quelques travaux (Huber, 2004 ; Markard et Wirth, 2008) ont cherché à repérer le stade de développement de chaque technologie environnementale retenue et à caractériser chaque phase ou à localiser les acteurs-clés du processus d'innovation environnementale et la population d'adopteurs potentiels. En fait, une telle grille de lecture met en évidence la nécessité de tenir compte en termes de politique publique du positionnement de l'innovation environnementale dans le cycle de vie de la technologie et dans la dynamique industrielle.

Selon Rennings (2000), la principale caractéristique des innovations environnementales est la production d'externalités positives dans les deux phases d'innovation et de diffusion. En effet, ces innovations produisent non seulement des effets de *spillover* typiques des efforts de R&D associés au processus d'innovation, mais aussi des externalités positives en améliorant la qualité environnementale des procédés ou des produits. Cette propriété, qualifiée par Rennings (2000) de "double externalité", est liée aux caractéristiques de bien public des biens environnementaux. Ainsi, les innovations environnementales seraient par définition source d'externalités positives et leur diffusion serait toujours socialement désirable en raison de leur contribution à la protection de l'environnement. En termes d'incitations privées, le défaut d'incitation et d'appropriation des innovations, identifié par Arrow (1962), est donc renforcé par cette double externalité. Dès lors, l'existence de cette propriété légitime l'intervention publique en encourageant ou en fournissant elle-même une partie de l'effort de R&D. C'est pourquoi la réglementation constitue la principale source d'incitation à investir dans des innovations environnementales. Ceci constitue la deuxième caractéristique des innovations environnementales qui trouvent leur principale source d'incitation dans la pression réglementaire. Comme le souligne Rennings (2000), il faut ajouter aux deux déterminants classiques des innovations, à savoir les effets *technology push* et *demand pull*, un troisième déterminant appelé *regulatory push-pull effect*. Une telle conception s'inscrit dans la lignée des travaux sur les "innovations induites" qui, dans le domaine de l'environnement, considèrent que la mise en place d'exigences et d'objectifs environnementaux, par le biais d'instruments économiques et réglementaires, induit des innovations permettant aux firmes de réduire le coût de mise en conformité (Jaffe et al., 2002).

Progressivement, les travaux portant sur l'impact de la réglementation sur l'innovation et la compétitivité des firmes ont mis en évidence un ensemble de critères déterminants, tels que le degré de sévérité, la flexibilité et l'horizon temporel des réglementations. Selon Ashford et al. (1985), c'est le type d'instrument réglementaire et la façon dont il est implémenté qui déterminent les incitations à innover et le type de réponse technologique. Les travaux récents mettent en évidence que les stratégies d'innovation des firmes sont également déterminées par leur perception du caractère plus ou moins contraignant des réglementations existantes et par leurs anticipations quant à l'évolution future du cadre réglementaire (Johnstone, 2007).

Au total, il apparaît que la réglementation joue un rôle déterminant, mais de façon différenciée selon le type d'instrument, le contexte et la perception des firmes. De plus, les études empiriques montrent que les innovations environnementales répondent également à d'autres objectifs et ne sont donc pas focalisées uniquement sur les objectifs réglementaires⁷.

De nombreuses études empiriques montrent que les innovations environnementales des firmes sont également guidées par des objectifs de productivité et de réduction des coûts, en particulier des coûts liés à l'utilisation de matières premières et d'énergie (Frondel et al. (2007), Horbach (2008)), Belin et al. (2009)). Rehfeld et al. (2007) et Wagner (2007) mettent en évidence la complémentarité entre les innovations organisationnelles et les innovations environnementales de produit et/ou de procédé. En particulier, la mise en place d'un système de management environnemental semble avoir un impact positif sur la capacité des firmes à réaliser des innovations environnementales. D'autres travaux montrent que les innovations environnementales sont aussi influencées par les déterminants classiques des innovations tels que la R&D, les effets de réseaux et les relations verticales (Mazzanti et Zoboli, 2006).

Du côté de la demande, même s'il est généralement supposé que les innovations environnementales sont "tirées" par les exigences environnementales croissantes des consommateurs, il existe peu d'études empiriques évaluant ce type d'effets. Il demeure en effet difficile d'estimer la prise en compte et la valorisation des critères environnementaux dans les comportements de consommation. Comparativement aux innovations conventionnelles, les effets du type *demand pull* sont largement encouragés par des instruments de politique environnementale, comme les taxes et les subventions, qui cherchent à influencer les motivations et les critères d'achat des consommateurs. Mais, comme le soulignent Taylor et al. (2006), les instruments politiques du côté de la demande influencent plus l'adoption et la diffusion des technologies environnementales que les innovations à proprement parler.

Il apparaît donc que les innovations environnementales ne sont pas exclusivement guidées par des exigences réglementaires, mais par une multiplicité de déterminants et d'objectifs résumés dans le tableau 1. Ainsi, malgré le rôle déterminant de la réglementation, les innovations environnementales ne doivent pas être considérées comme une réponse directe et systématique à celle-ci.

⁷ Voir par exemple, Frondel et al. (2007), Horbach (2008) et Mazzanti et Zoboli (2006).

Tableau 1 - Les déterminants des innovations environnementales

Déterminants réglementaires et politiques	Mise en place de politiques environnementales: instruments réglementaires et économiques Anticipation de nouvelles réglementations environnementales Cadre réglementaire : sévérité, flexibilité, temporalité Economies de coûts, amélioration de la productivité
Déterminants du côté de l'offre	Innovations organisationnelles : systèmes de management environnemental, responsabilité étendue du producteur Activités de R&D Relations industrielles, relations verticales, activités de réseau
Déterminants du côté de la demande	Conscience environnementale et préférences des consommateurs pour les écoproduits Augmentation des parts de marché et pénétration de nouveaux marchés

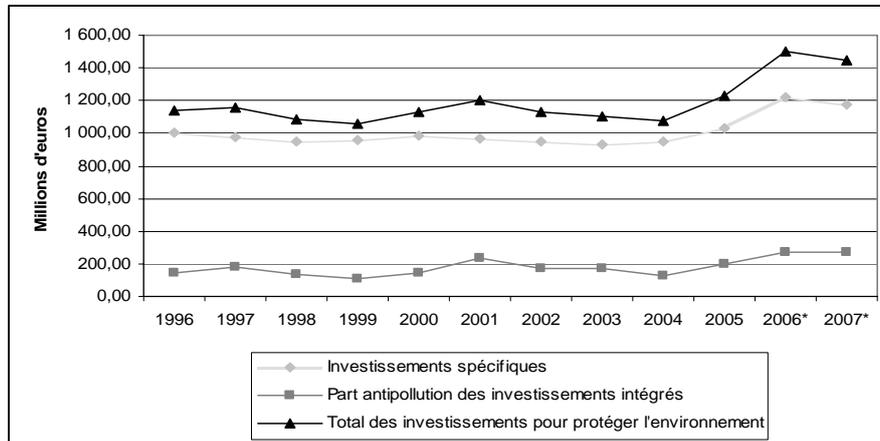
Source : Oltra, 2008.

Enfin, les innovations environnementales peuvent être différenciées selon qu'elles s'inscrivent dans une perspective curative ou préventive. Les activités d'innovations environnementales curatives correspondent au développement de technologies dites *en bout de chaîne* (ou additives) qui consistent en des équipements apposés aux processus de production afin de réduire ou de traiter *ex post* les émissions polluantes. L'exemple courant est celui des filtres à poussières dans les cheminées, des équipements de désulfurisation, ou de toute technologie dite de dépollution. Dans ce cas, les firmes ne modifient pas fondamentalement leurs pratiques et leurs procédés, et les émissions polluantes sont traitées "en bout de chaîne" dans une optique curative. *A contrario* dans le cadre d'une approche préventive, les firmes cherchent à modifier leurs procédés afin de réduire à *la source* les émissions polluantes. On parle dans ce cas de *technologies propres* ou de technologies intégrées (ADEME, 1998). Kemp et al. (1992) définissent ainsi les technologies propres comme toutes les techniques, procédés et produits qui permettent d'éviter ou de diminuer à la source les émissions polluantes et/ou l'usage de matières premières, de ressources naturelles et d'énergie. Ils distinguent quatre types de technologies propres : les techniques de substitution et d'économie d'inputs, les technologies de prévention et de contrôle de la pollution, les technologies de récupération et de recyclage interne et, enfin, les procédés propres radicalement nouveaux.

Les firmes ont longtemps privilégié l'approche curative, essentiellement pour des raisons de coûts. A partir des années 1980, les pouvoirs publics ont commencé à inciter au développement des technologies propres, celles-ci se présentant comme une option technologique plus favorable au développement durable à long terme. Mais les technologies propres représentent toujours une part minoritaire des investissements des firmes (cf. figure 1). Si l'on se réfère aux données du SESSI sur l'évolution des investissements anti-pollution des firmes en France, on observe que les investissements pour changement de procédé correspondant aux investissements intégrés représentent une part minoritaire relativement constante (environ 14%) depuis 10 ans, les investissements spécifiques (correspondant aux équipements de bout de chaîne) restant largement dominants. Ce phénomène s'explique essentiellement par les différences de coût et de rentabilité entre les deux types d'investissement. L'adoption de technologies de bout de chaîne est généralement considérée comme le moyen le plus rapide et le moins coûteux de se mettre en conformité avec les

réglementations. Toutefois, à long terme, la réduction à la source de la pollution par le développement et/ou l'adoption de technologies propres permet des économies de coûts significatives ainsi que des gains de productivité. Cet arbitrage entre rentabilité à court terme et à long terme est un élément déterminant des stratégies des entreprises en matière d'investissements anti-pollution. C'est ce qui sera étudié dans le paragraphe suivant dans une perspective dynamique de trajectoires technologiques.

Figure 1 - Evolution des investissements anti-pollution en France de 1996 à 2007



Note : les enquêtes 2006 et 2007 portent sur l'ensemble des établissements de 20 employés et plus, les enquêtes précédentes portaient sur un champ restreint aux établissements les plus polluants.

Source : SESSI

1.3. Les trajectoires de technologies propres : vers un cadre conceptuel

Les données SESSI présentées ci-dessus nous montrent qu'il semble exister de nombreux freins à l'adoption de technologies propres. Cette section élabore un cadre conceptuel permettant d'appréhender les technologies propres comme des trajectoires technologiques (au sens de Dosi, 1988) et de capturer les principaux freins à leur développement.

Pour qu'une firme accepte de se lancer dans un projet de développement et/ou d'adoption d'une technologie propre, il faut qu'il y ait, outre l'incitation réglementaire, une incitation privée qui se traduise par des gains de productivité et/ou de compétitivité. En d'autres termes, il faut que l'objectif de minimisation des dommages environnementaux créés par la firme soit compatible avec son objectif de recherche de profits et de parts de marché. Cette capacité à combiner les objectifs environnementaux avec les objectifs d'efficacité productive et de compétitivité des firmes est une condition nécessaire à l'adoption d'une technologie propre⁸. Les cas empiriques présentés dans la section suivante montrent que ce point est souvent source de blocage pour le développement des technologies propres. Nous pouvons donc avancer que le développement des technologies propres dépend de la capacité des firmes à associer trois dimensions : les performances environnementales, l'efficacité productive et la qualité du produit. C'est dans cette optique que nous nous proposons de

⁸ Florida (1996) analyse la corrélation entre l'intensité en R&D et la conception de produits verts. Son étude empirique montre à la fois que les firmes à "orientation verte" tendent, du point de vue des dépenses en R&D, à être plus grandes et plus intensives en R&D et qu'il peut exister des synergies ou des complémentarités entre performances industrielles et environnementales.

modéliser les trajectoires de technologies propres⁹.

Cet aspect multidimensionnel des technologies propres renvoie à ce que Porter et van der Linde (1995) appellent les effets de compensation liés aux innovations environnementales (*innovation offsets*). Pour ces auteurs, les innovations environnementales impulsées par la réglementation peuvent créer des effets induits sur les procédés (et/ou les produits) qui peuvent compenser les coûts de mise en conformité avec la réglementation et, dans certains cas, être source d'avantages compétitifs pour les firmes. Les auteurs distinguent deux types d'effets de compensation : les effets liés aux innovations de procédé (*process offset*) qui se traduisent essentiellement par des gains de productivité, et les effets liés aux innovations de produit (*product offset*) entraînant une amélioration de la qualité du produit¹⁰. Ces deux effets peuvent se combiner selon le type de technologies propres permettant ainsi d'allier les trois dimensions précitées. Les effets de compensation sont donc une condition nécessaire à l'adoption d'une technologie propre.

Ce caractère multidimensionnel n'est pas spécifique aux technologies propres puisque, comme le souligne Dosi (1982), le paradigme technologique¹¹ définit également l'ensemble des variables technologiques et économiques sur lesquelles les innovations doivent porter. Dans cette optique, le progrès technologique tend à suivre certaines trajectoires technologiques qui correspondent à un compromis évolutif entre les différentes variables, ou dimensions, définies par le paradigme. La dimension environnementale peut donc être vue comme une dimension supplémentaire à intégrer dans ce compromis et dont le poids ne fait qu'augmenter sous les pressions réglementaires. Cette nouvelle dimension tend donc à modifier les trajectoires technologiques, de façon plus ou moins radicale et elle peut, dans certains cas, induire un changement de paradigme technologique (Dosi et Grazzi, 2006).

De nombreux exemples (économie de l'hydrogène, piles à combustible, chimie verte) montrent que le degré de radicalité des innovations environnementales joue un rôle déterminant au niveau de la capacité des firmes à bénéficier des effets de compensation. Les technologies propres peuvent correspondre à des innovations plus ou moins radicales selon qu'il s'agisse, par exemple, de la mise en œuvre d'une technique de recyclage interne ou d'un nouveau procédé de production radicalement nouveau. Comme le soulignent Fauchaux et Nicolai (1998) : "Il existe des innovations radicales répondant à des objectifs environnementaux. La chimie sans chlore, les bio-carburants, l'énergie photovoltaïque en constituent des exemples... Or ce sont les ruptures technologiques environnementales qui autorisent une transformation du système productif en amorçant une nouvelle trajectoire technologique qui finit par coïncider avec une trajectoire de développement durable". En ce sens, le développement de certaines technologies propres entraîne un changement de paradigme technologique au sens de Dosi (1988). Il s'agit par exemple de la "chimie verte" ou encore des véhicules à pile à combustible dont les développements remettent profondément en cause les directions de recherche, ainsi que la base de connaissances et de compétences des firmes, et nécessite une longue phase de R&D et d'adaptation de l'ensemble du système ou du secteur industriel. Généralement plus risquées et plus coûteuses à court terme, ces technologies sont bien évidemment les plus porteuses en termes de performances environnementales à long terme et les plus favorables à un mode de développement durable.

⁹ Pour une présentation détaillée de cette modélisation, voir Oltra et Saint Jean (2005b).

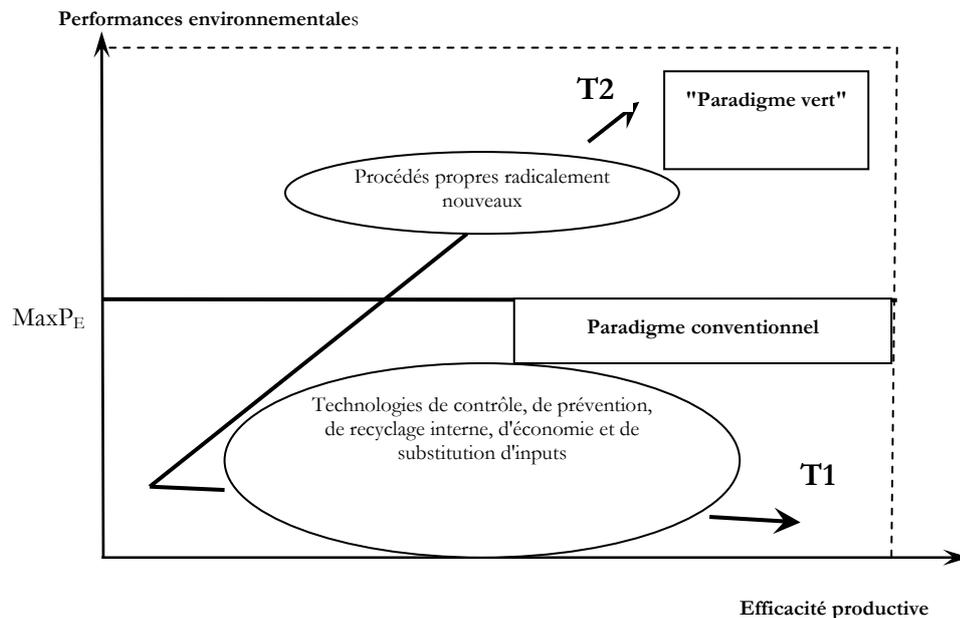
¹⁰ Des exemples des deux types d'effet sont présentés dans Porter et van der Linde (1995) et dans Oltra et Saint Jean (2005a).

¹¹ "A technological paradigm is defined as a pattern for the solution of selected technoeconomic problems based on highly selected principles derived from the natural sciences. A technological paradigm defines contextually the needs that are meant to be fulfilled, the scientific principles utilised for the task and the material technology to be used" (Dosi, 1988, p.224).

Etant donné le degré de rupture par rapport à l'existant, les effets de compensation sont dans ce cas plus incertains, du moins à court ou moyen terme. Le changement de paradigme remet en cause la capacité des firmes à combiner les différentes dimensions de la technologie ; cet effet de "destruction créatrice" doit être surmonté progressivement par les firmes pour que les technologies propres puissent se développer.

Dans le cadre de cette approche paradigmatique, nous proposons de représenter les technologies propres comme des trajectoires technologiques se déployant dans un espace à deux dimensions : d'une part les performances environnementales "à la source" du procédé de production, et d'autre part l'efficacité productive au sens large (productivité, délais, coûts de maintenance et de stockage...) de ce même procédé (ou d'un ensemble de procédés).

Figure 2 - Les trajectoires de technologies propres



Cette représentation fait apparaître deux paradigmes technologiques qui correspondent chacun à un ensemble de directions de recherche et d'opportunités technologiques en termes de performances environnementales et d'efficacité productive. Le paradigme conventionnel correspond à l'ensemble des technologies dites conventionnelles, au sens des technologies de référence établies dans un secteur d'activités donné. En d'autres termes, il s'agit des opportunités technologiques liées au *dominant design* : en restant dans ce paradigme, les firmes peuvent, grâce à leurs activités d'innovation, améliorer leurs performances environnementales, tout en maintenant ou en augmentant leur efficacité productive (effet de compensation). Chaque paradigme est borné par une frontière technologique liée aux limites inhérentes aux technologies en termes de potentiel d'amélioration. Cette frontière délimite l'ensemble des opportunités, tant en termes d'efficacité productive qu'en terme de performances environnementales. Nous supposons que le potentiel d'amélioration des performances environnementales est limité par $MaxPE$ qui correspond au niveau maximum de performances environnementales que les firmes peuvent atteindre en demeurant dans le paradigme conventionnel. Seul un changement de paradigme permettrait de repousser les limites en termes de performances environnementales. Le cas échéant, les firmes doivent changer de paradigme en adoptant des technologies propres radicalement nouvelles ("paradigme vert"). Il s'agit par exemple, dans le cas de l'industrie automobile, du paradigme défini par le moteur à combustion interne, qui correspond dans ce cas au paradigme

conventionnel dont le potentiel de performances environnementales est limité (par exemple en termes d'émissions de CO₂), et du paradigme vert lié aux "véhicules propres" ou à très faibles émissions (pile à combustible et véhicules électriques).

Dans cet espace, nous distinguons deux trajectoires technologiques : la trajectoire T1 guidée par des innovations qui n'impliquent pas de rupture par rapport aux connaissances et procédés existants et la trajectoire T2 qui conduit à un changement de paradigme guidé par le développement de technologies propres radicalement nouvelles. Ces deux types de trajectoires correspondent à des stratégies d'innovation différentes que nous exemplifions dans le paragraphe suivant.

Les modifications des procédés de production liées à l'adoption de technologies propres affectent également les performances du produit. Par performances du produit, nous désignons toutes les caractéristiques du produit, au sens de Lancaster, qui définissent les besoins des consommateurs. Les effets induits sur les performances du produit sont déterminants dans l'adoption de technologies propres puisqu'ils déterminent la sélection du marché. Ces effets posent problème dans le cas de modifications radicales des procédés et, en particulier, dans les cas de changement de paradigme. En effet, la remise en cause des connaissances et des compétences existantes peut entraîner dans un premier temps un effet de destruction des compétences qui se traduit par une baisse des performances du produit. Dans ce cas, la principale difficulté pour les firmes est de combiner les performances environnementales avec les objectifs d'efficacité productive et les exigences des consommateurs. L'objectif environnemental vient s'ajouter aux objectifs initiaux des firmes et l'adoption d'une technologie propre ne doit pas remettre en cause les caractéristiques fondamentales du produit. Par exemple, un "véhicule propre" doit à la fois consommer et polluer moins, mais également offrir aux consommateurs un confort de conduite et une puissance suffisante. Les firmes doivent donc être en mesure d'explorer et d'exploiter les complémentarités technologiques entre les technologies existantes, les objectifs environnementaux et les besoins des consommateurs. Or de nombreux exemples montrent que ce point constitue souvent un frein au développement de technologies propres et à un changement de paradigme.

1.4. Une analyse sectorielle des trajectoires de technologies propres

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats d'études empiriques conduites au niveau sectoriel. Nous nous sommes intéressés à la directive européenne visant à une réduction des émissions de COV (composés organiques volatils) dans l'industrie, et à ses effets dans les secteurs de la chimie et de la métallurgie. Cette directive (European Directive 1999/13/CE) vise à "prévenir et réduire les effets directs et indirects des émissions de COV dans l'environnement, principalement dans l'air, ainsi que les risques potentiels pour la santé publique dus à l'utilisation de solvants organiques dans les activités et installations industrielles". L'objectif est de réduire de 57% d'ici 2010 les émissions de l'industrie européenne par rapport au niveau qu'elles avaient en 1990. Les deux secteurs que nous considérons ont poursuivi des stratégies d'innovation environnementale différenciées présentées de façon détaillée dans Belis-Bergouignan et al. (2004).

1.4.1 Le rôle de la réglementation des COV sur les innovations environnementales de la chimie

Le cas de la chimie nous intéresse tout particulièrement parce qu'il permet d'étudier

comment les contraintes environnementales, liées aux pressions réglementaires et aux effets avérés sur la santé de certaines substances chimiques, se sont traduites par de nouvelles opportunités technologiques modifiant les trajectoires et, progressivement, le paradigme dominant de la pétrochimie. En effet, traditionnellement considérée comme une activité fortement polluante, la chimie s'est peu à peu emparée de la problématique environnementale pour "redorer son blason", trouver de nouvelles opportunités d'innovation et renouveler ses produits et ses procédés. Aux Etats-Unis, suite au Pollution Prevention Act de 1990, l'objectif d'une chimie moins polluante est clairement affiché. C'est dans ce contexte que l'on a commencé à parler de "chimie verte", définie comme l'ensemble des principes et des techniques pour réduire ou éliminer l'usage ou la formation de substances dangereuses et/ou toxiques dans la conception, la production et l'utilisation de produits chimiques. Depuis, la "chimie verte" n'a cessé de se développer et de s'afficher comme le défi majeur de la chimie pour la décennie 2000-2010. Douze principes ont été définis¹² dont l'usage limité de solvants toxiques et d'agents de séparation ainsi que la conception de nouvelles méthodes de synthèse moins dangereuses et moins toxiques. En ce sens la "chimie verte" se présente comme un nouveau paradigme ouvrant de nouvelles voies de recherche, de nouvelles méthodes et heuristiques et nécessitant le développement d'une nouvelle base de connaissances. Les recherches menées dans ce domaine, en particulier sur les nouveaux modes de synthèse et les nouvelles molécules, ont de nombreuses applications industrielles pour les biocarburants, les lubrifiants, les détergents, les peintures et vernis, etc.

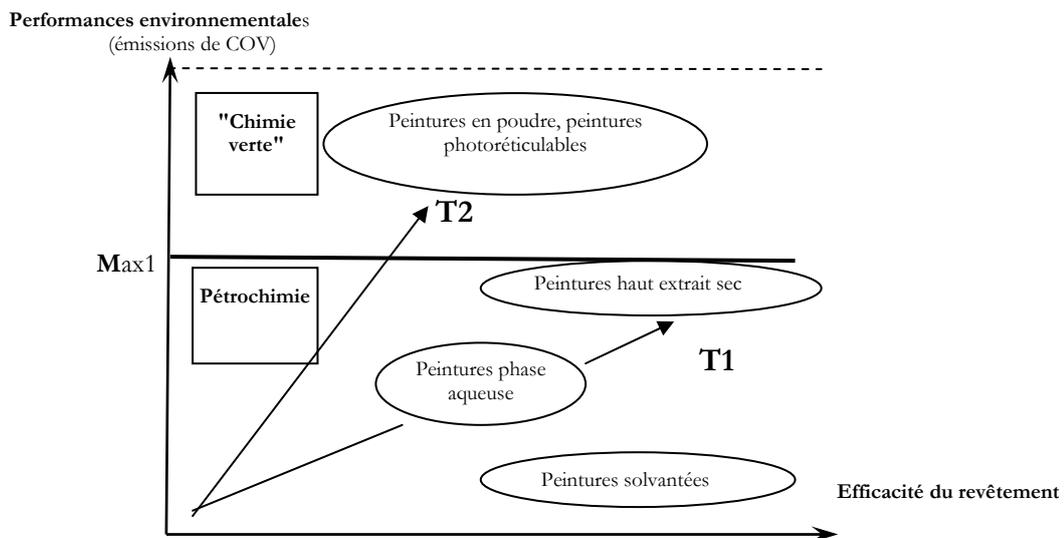
La directive européenne sur les COV s'inscrit dans cette perspective en limitant l'utilisation industrielle de solvants chlorés. Nous nous sommes intéressés au secteur des peintures qui est une cible importante de la directive COV en raison de la forte utilisation de solvants. Sous l'impulsion de cette réglementation, de nouvelles technologies propres ont été développées afin de limiter la teneur en solvant des peintures et leurs émissions de COV. Seul le passage à des peintures totalement sans solvant chloré s'inscrit dans le paradigme de la "chimie verte".

Les principales technologies développées sont les peintures à faible teneur en solvant, les peintures en phase aqueuse, les peintures à haut extrait sec, les peintures en poudre et les peintures photoréticulables. Les deux premières options correspondent typiquement à notre trajectoire T1, dans la mesure où ces peintures contiennent toujours des solvants, mais en quantité réduite. En d'autres termes, ces technologies se situent toujours dans ce que nous appelons le "paradigme dominant" (celui de la pétrochimie), ce qui leur permet de réduire à moindres coûts les émissions de COV, tout en demeurant compatible avec les techniques d'application classiques et en exhibant de bonnes performances du revêtement. Les peintures à haut extrait sec constituent une technologie intermédiaire entre les peintures classiques solvantées et les technologies totalement sans solvant. Elles utilisent en effet deux fois moins de solvants que les peintures classiques et dégagent de faibles émissions de COV. Les performances en termes de revêtement sont satisfaisantes, avec l'avantage d'un temps de séchage très court, mais l'inconvénient d'une forte sensibilité aux variations de température. Les peintures en poudre et les peintures photoréticulables, qui font appel à de nouveaux modes de synthèse notamment grâce à des procédés photochimiques, sont les seules totalement sans solvant et pratiquement sans émission de COV. C'est pourquoi nous pouvons dire qu'elles sont les seules technologies s'inscrivant dans le paradigme de la "chimie verte" (ici dans le sens plus précis de "chimie sans chlore"), ce qui représente un saut technologique radical dans le domaine des peintures. Ces peintures présentent l'avantage de combiner les exigences environnementales avec les performances du produit. En effet, en termes de

¹² Voir le site de US Environmental Protection Agency : <http://www.epa.gov/greenchemistry/>

performances du revêtement, ces peintures offrent les avantages d'une très bonne résistance à l'usure, aux chocs et aux variations de température, d'une facilité d'application et d'un rapport coûts/bénéfices intéressant en raison de leur rendement élevé (Technologies propres et sobres, 1995). Leur principal inconvénient est l'étendue de leur utilisation, puisqu'elles ne conviennent pas à tous les types d'usage et de configuration. Malgré cela, ces peintures ont connu une croissance très rapide et représentent aujourd'hui 13% du marché, essentiellement dans les secteurs transformateurs de métaux (SESSI, 2000). De manière générale, les trois types de peintures "propres" (base aqueuse, haut extrait sec et en poudre) connaissent un développement considérable sur le marché, alors que les peintures les plus solvantées voient leur part de marché diminuer depuis 1995 (SESSI, 2000).

Figure 3 - Les trajectoires de technologies propres dans le secteur des peintures



Comme le représente la figure 3, le cas des peintures illustre bien notre cadre conceptuel et nous donne des exemples de trajectoires de technologies propres associant les exigences environnementales avec les performances du produit. En effet, les nouvelles technologies développées combinent efficacement les objectifs de réduction des émissions de COV avec les objectifs de qualité des peintures en termes d'efficacité du revêtement (rendement, résistance, temps de séchage, facilité d'application...). C'est sans doute ce qui explique la diffusion rapide des technologies propres dans ce secteur d'activité, ainsi que le développement de technologies radicalement nouvelles dans le cadre du paradigme de la "chimie verte".

De nombreux autres exemples peuvent être trouvés dans le cas de la "chimie verte", puisque le nombre d'innovations environnementales développées dans ce domaine n'a cessé de croître depuis 1990. Cette évolution se traduit par une forte croissance des brevets depuis 1990, en particulier aux Etats-Unis (Nameroff et al., 2004). Dans le cas de l'Europe, la réglementation REACH (Registration, Evaluation and Autorisation of Chemicals) va sans doute renforcer les incitations à l'innovation dans le domaine de la "chimie verte". Nameroff et al. (2004) évaluent la concentration par secteur des brevets dans la "chimie verte" en calculant le rapport entre le nombre de brevets sur la période [1992-2001] dans le domaine de la "chimie verte" et le nombre de brevets sur la même période dans le domaine de la chimie en général. Ce ratio s'avère particulièrement faible (entre 0.74 et 1) dans les secteurs industriels les plus impliqués dans la production de produits chimiques, à savoir la chimie, la pharmacie et l'énergie ; alors qu'il est supérieur à 2 dans le domaine de la recherche publique (universités et agences gouvernementales). Ces données montrent que dans les secteurs de la

chimie et de la pharmacie, nous n'observons pas encore de changement radical dans les stratégies d'innovation, puisque l'essentiel des brevets reste dans le paradigme dominant de la pétrochimie.

Le changement de paradigme se fait donc progressivement et les firmes tendent à poursuivre les deux trajectoires T1 et T2 à la fois, en continuant à exploiter le paradigme dominant tout en faisant émerger lentement les technologies de la "chimie verte". Les irréversibilités technologiques liées aux phénomènes d'apprentissage, d'expérience et de coûts sont particulièrement fortes dans ce cas, puisque le changement de paradigme implique une remise en cause de la base de connaissances et de compétences concernant les modes de synthèse. De plus, la combinaison des exigences environnementales de la "chimie verte" avec les performances des nouveaux modes de synthèse et des produits chimiques obtenus est problématique pour certaines applications, notamment dans le domaine pharmaceutique où le processus de recherche et de mise sur le marché est particulièrement long et coûteux. Comme le montrent Nameroff et al. (2004), la recherche publique joue un rôle essentiel (11% du total des brevets de la chimie verte sur la période 1992-2001, avec un indice de concentration de 2.32), en particulier dans la recherche des nouveaux modes de synthèse.

1.4.2. Le rôle de la réglementation des COV sur les innovations environnementales de la métallurgie

Un autre cas intéressant est celui de la métallurgie avec, en particulier, les activités de traitement de surface qui constituent une cible de la directive COV en raison de l'utilisation de solvants chlorés. De manière générale, les activités de traitement de surface sont soumises à de nombreuses réglementations en raison de leur caractère polluant en termes de production de déchets et d'effluents gazeux et aqueux. Pour répondre aux enjeux environnementaux, de nombreuses technologies propres ont été développées, notamment de nouveaux procédés de traitement de surface faisant appel à des procédés chimiques (par exemple, l'utilisation de solution aqueuse pour le dégraissage), mécaniques (projection de médias pour le nettoyage et le dégraissage) ou physico-chimiques (utilisation de lasers, de plasma, d'ultrasons...). De nombreuses technologies propres sont ainsi disponibles selon le type d'opérations de traitement de surface. Etant donnée la variété des opérations de traitement de surface, les firmes tendent à suivre des trajectoires technologiques spécifiques. Notre étude en région Aquitaine (présentée dans Belis-Bergouignan et al., 2004) nous a permis de mettre en évidence deux types de trajectoires technologiques T1 et T2, selon que les firmes continuent à utiliser des solvants en y ajoutant des technologies de contrôle, de recyclage interne et de régénération, ou qu'elles modifient radicalement leurs procédés en optant, par exemple, pour des procédés à ultrasons, lasers ou plasma froid. Ces trajectoires technologiques sont fortement influencées par les donneurs d'ordre, puisque les activités de traitement de surface sont réalisées par des PME sous-traitantes de l'automobile, de la fabrication de matériel électrique et électronique, et de l'aéronautique. 82% des entreprises du traitement de surface emploient moins de 20 salariés et les opérateurs indépendants sont nombreux (SESSI, 2005). Dans ce contexte, les entreprises doivent non seulement répondre aux réglementations environnementales, mais aussi aux exigences des donneurs d'ordre, eux-mêmes soumis à des réglementations. Ces relations verticales tendent donc à renforcer le poids des contraintes environnementales et conditionnent fortement les trajectoires technologiques des firmes, qui ont d'autant plus de difficulté à combiner les critères environnementaux avec les exigences des donneurs d'ordre en termes de performances des procédés et des produits.

Ces deux études de cas illustrent le cadre conceptuel présenté précédemment et ainsi les effets de la réglementation environnementale sur les trajectoires d'innovation des firmes.

Mais ces trajectoires sont aussi marquées par la nécessité de combiner les critères environnementaux avec les exigences des clients ou plus largement avec les préférences des consommateurs. C'est l'objet de la section suivante où le rôle de la demande est explicitée et une autre méthode d'analyse est exposée consistant à s'appuyer sur un modèle évolutionniste de dynamique industrielle, lui-même cohérent avec les propriétés des innovations environnementales exposées plus haut.

2. Le rôle de la demande de qualité environnementale dans les relations verticales interfirmes

Cette section présente un modèle de dynamique industrielle qui intègre explicitement la demande de firmes industrielles ayant des exigences de performances économiques et environnementales. Une telle demande se traduit par une demande de caractéristiques au sens de Lancaster qui définissent les besoins des utilisateurs du produit. Outre les caractéristiques usuelles de prix et de qualité du produit, les clients vont exprimer une demande de qualité environnementale auprès de leurs fournisseurs afin de satisfaire les exigences de performances environnementales auxquelles ils sont soumis à travers les pressions réglementaires et/ou les exigences de la demande finale. Dans la suite, nous ferons ainsi référence à la *demande de qualité environnementale* pour exprimer les exigences en termes de performances environnementales des donneurs d'ordres. Nous préciserons dans un premier temps la manière dont se répercutent les exigences de performances environnementales sur l'offre en amont des fournisseurs, ou équipementiers, par le canal de la demande intermédiaire. Ceci nous conduira à souligner les implications de l'intégration explicite de la demande. Le modèle « complet » sera alors exposé de façon résumée en insistant sur les mécanismes économiques pris en compte et la logique sous-jacente d'un tel modèle. L'objectif de ce modèle est de représenter la dynamique d'un marché de produit incorporant des caractéristiques environnementales, régie par les interactions entre l'innovation technologique environnementale des fournisseurs, la modification des exigences des clients et la concurrence entre fournisseurs sur ce marché. Le dernier paragraphe permettra de présenter les principaux résultats du modèle de coévolution de l'offre et de la demande de qualité environnementale et de mettre en évidence les conditions d'émergence d'une niche de marché verte.

2.1. La "remontée" de la contrainte environnementale

Les fabricants de produit de consommation finale font remonter la contrainte environnementale en amont de la chaîne de production sous l'influence conjointe de deux facteurs :

la responsabilité étendue des producteurs et les objectifs de recyclage des produits en fin de vie¹³. Au principe du pollueur-payeur, qui consiste à faire reposer sur les pollueurs le coût de l'élimination des déchets, vient s'ajouter le principe de responsabilité étendue des producteurs. Ce principe rend les producteurs responsables de l'élimination de leurs produits en fin de vie. Il tend à mettre l'accent sur la responsabilité collective de tous les acteurs de la

¹³ La thèse de Brouillat (2008) « Dynamique industrielle et innovation environnementale : le cas de la prévention des déchets. » examine, à l'aide d'un modèle de micro-simulation, la dynamique d'innovation de produits éco-conçus moins polluants une fois en fin de vie. La mise en évidence des principaux déterminants des performances technologiques, économiques et environnementales des agents lui permet d'étudier les effets sur la dynamique technologique d'une réglementation basée sur le principe de responsabilité élargie du producteur.

filière et sur le besoin de mettre en place des filières de traitement pour les produits en fin de vie. Ce principe guide notamment l'organisation des filières d'élimination pour les Véhicules Hors d'Usage (V.H.U) et les déchets électriques et électroniques. En France, la position des pouvoirs publics sur la valorisation des déchets a évolué pour s'orienter vers plus de recyclage, et moins d'incinération (circulaire du 28 avril 1998). Le recours au recyclage, également préconisé au niveau européen¹⁴, oriente les efforts des industriels dans ce sens. Ainsi, l'accent mis sur la responsabilité étendue des producteurs et sur la valorisation sous forme de recyclage, pour certaines catégories de déchets, favorisent la prise en compte des impacts environnementaux des produits sur l'ensemble de leur cycle de vie par les fabricants;

le développement de marchés accessibles sous conditions de performances environnementales : certains marchés ne sont accessibles que par la présence d'écolabels (les détergents, les peintures et vernis ou les machines à laver le linge etc.). L'obtention de performances environnementales minimales peut aussi devenir une obligation pour l'accès à certains marchés publics (le secteur du ciment par exemple). Evidemment, certains consommateurs finals sont attentifs aux critères de protection de l'environnement et sont sensibles aux impacts environnementaux du produit lors de son utilisation (voire de sa fin de vie) ou de sa fabrication. Cela peut constituer une opportunité commerciale à saisir pour la firme qui souhaite pratiquer une différenciation de ses produits sur l'environnement. Un tel (re)positionnement suppose une modification conjointe des pratiques productives utilisées jusqu'alors. C'est donc l'ensemble des partenaires fournisseurs ou sous-traitants de la firme qui se trouvent impliqués dans la recombinaison des éléments entrant dans la fabrication du produit final. De façon générale, la spécification des exigences de qualité environnementale par un client implique que les caractéristiques du produit à fournir vont changer, ce qui peut affecter le processus de production des fournisseurs.

Ces facteurs ont donc des répercussions en amont sur les fournisseurs. En effet, les compétences et les connaissances technologiques des fournisseurs sont mobilisées. Dans le premier cas, les compétences et les connaissances concernent les matières qui entrent dans la composition du produit intermédiaire et qui déterminent, pour partie, les possibilités de recyclage et de démontage du produit final. Dans le second cas, les fabricants vont s'engager à respecter des critères de qualité environnementale. Les nouveaux efforts entrepris par les fabricants dans ce but impliquent des ajustements avec les fournisseurs en amont de la filière, puisque le fabricant va s'assurer que ses fournisseurs ont aussi des normes de performance environnementale qui vont dans le même sens que lui. Les fournisseurs sont alors eux-mêmes confrontés à une demande de qualité nécessaire à l'obtention de ces marchés. Les relations verticales interfirmes deviennent ainsi un lieu privilégié où se nouent des compromis entre des dimensions technologiques et environnementales.

D'un point de vue théorique, la relation interentreprises ne peut être assimilée à une pure relation de marché (Baudry, 1995). Dans ce dernier cas, le marché permet, d'une part l'adéquation qualitative et quantitative entre l'offre et la demande et, d'autre part la fixation du prix, l'échange s'effectuant entre deux organisations anonymes. Or, le produit industriel, qui fait l'objet de la relation interentreprises, nécessite des spécifications précises de la part de l'acheteur sur les caractéristiques de performances du produit. Le produit inclut notamment la capacité du vendeur à livrer en temps et lieu un produit adapté au client, mais aussi sa

¹⁴ Les états membres de l'Union Européenne ont transposé en 2002 la Directive européenne sur les Véhicules Hors d'Usage (VHU) qui prévoit des objectifs ambitieux de valorisation matière et énergétique (85% de valorisation totale dès 2006, 95% en 2015). Les Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) font aussi l'objet d'une réglementation spécifique au travers d'une directive européenne introduisant le principe de la responsabilité du producteur et fixant des objectifs élevés de collecte et de valorisation.

capacité à flexibiliser l'offre à des demandes futures et à suggérer des innovations. De manière générale, les relations interentreprises varient en fonction de la capacité du fournisseur à participer à la conception du produit. La spécificité d'une telle relation est que l'objet est spécifié *ex ante*, mais que rien ne garantit *ex post* une parfaite exécution de la transaction. De plus, l'organisation physique de la production impose également une coordination des plans entre les contractants (Baudry, 2004).

Dans le cadre d'une relation interentreprises, il existe une incertitude quant au degré de compétence du vendeur. Pour obtenir du vendeur une information sur une qualité intrinsèque d'un produit et ainsi faire face aux problèmes de sélection adverse qui en résultent, l'acheteur incite le vendeur à envoyer un signal qui témoigne de la fiabilité du produit. Ce signal prend la forme des dispositifs d'assurance qualité (normes ISO 9000 par exemple). Les années 1990 ont vu la tendance à la généralisation de "certification qualité". Ainsi les donneurs d'ordre, qui avaient tendance à considérer le prix comme le déterminant central du choix d'un sous-traitant, ont favorisé l'engagement de nouvelles modalités contractuelles, dans lesquelles des clauses de qualité ont largement été intégrées. Ces clauses ont eu pour effet d'entraîner d'importants investissements chez les sous-traitants et d'homogénéiser les prestations fournies.

La qualité du produit, soit la capacité du produit à répondre aux exigences du client (par exemple en termes d'efficacité, de durabilité ou de niveau de sécurité), est susceptible d'être élargie à la qualité environnementale. Plus précisément, les exigences environnementales requièrent de clarifier, au sein des relations interentreprises, les nouveaux critères de performance et de progrès induits par la contrainte de qualité environnementale des produits.

En fait, la qualité environnementale tend à devenir un critère pour sélectionner les fournisseurs et ainsi conditionner la poursuite des relations contractuelles dans le temps. Un donneur d'ordres désireux de rompre la relation pourra arguer d'une insuffisance des performances environnementales du fournisseur. Au contraire, si une forme de partenariat caractérise la relation entre le fournisseur et le client, ce dernier peut souhaiter consolider sa source d'approvisionnement et préférer adopter une démarche de coopération pour aider le fournisseur à obtenir de bonnes performances environnementales. Les modalités de contrôle de la performance environnementale des fournisseurs par les clients sont influencées par la densité de l'échange d'informations et par la durée de la relation interfirmes. Ainsi les formes de partenariat industriel basées sur la coopération interfirmes favorisent la "prise de parole" des clients auprès de leurs fournisseurs (Frigant, 2000). Une menace de rupture de contrat peut suffire à inciter le fournisseur à modifier ses pratiques productives pour respecter des normes environnementales. L'évaluation de la qualité environnementale par le client industriel pose un problème de nature différente de celui auquel sont confrontés les consommateurs finals, qui sont généralement incapables de vérifier la qualité environnementale des produits. La pression externe des consommateurs n'exprime pas toujours les besoins de protection de l'environnement de manière directe ou claire. Au contraire, les contrats des clients industriels sont fermes et conditionnels, ce qui implique que le contrôle de la qualité environnementale est plus actif (prise de parole, menace de rupture de contrat).

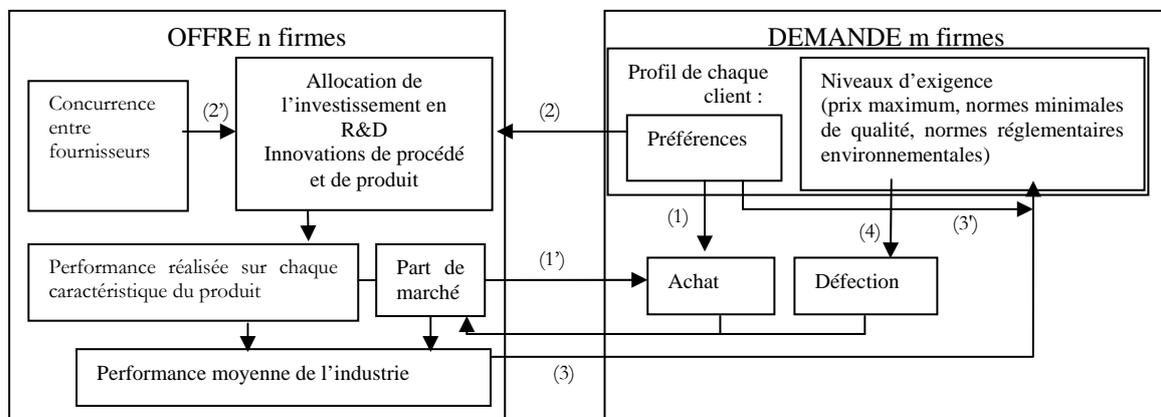
Ainsi, nous considérons que les clients vont relayer une exigence de qualité environnementale relative au produit final en la transmettant sous forme d'indications techniques et économiques aux fournisseurs et sous-traitants qui participent à sa fabrication. Cette exigence de qualité environnementale véhiculée par les clients ne se confond pas avec celle correspondant à la réglementation à laquelle est soumise le fournisseur au moment de la fabrication du bien intermédiaire. En effet, le fournisseur peut être soumis à des normes d'émissions polluantes à respecter au moment de son activité de production indépendamment de la requête du client. Par conséquent les deux types de contraintes ne se confondent pas.

En même temps, un client peut vouloir s'assurer de la qualité environnementale des méthodes de production de ses fournisseurs. En effet, le client peut chercher à se garantir contre une éventuelle mise en cause de son produit en s'assurant que ses sous-traitants sont eux-mêmes en conformité avec la réglementation. Il encourage ainsi un transfert de responsabilités lié aux conséquences de la réglementation. Afin de tenir compte de cette double exigence de qualité environnementale transmise par l'intermédiaire de la demande, le modèle présenté dans le paragraphe suivant tiendra compte de la qualité environnementale à la fois du procédé et du produit.

2.2. Un modèle de co-évolution de l'offre et de la demande de qualité environnementale

Un tel modèle s'inscrit dans la lignée des travaux de Nelson et Winter (1982), Chiaromonte et Dosi (1993) et Malerba et al. (1999). Ces modèles ont en commun de proposer une analyse des interactions entre changement technologique et structure de marché, en incorporant certains faits stylisés du changement technologique (spécificité, cumulativité, incertitude et interactivité, cf. *Cahiers du GREThA* 2009-16) et certains fondements microéconomiques sur le comportement des agents (rationalité limitée et hétérogénéité). Les principaux apports de notre modèle concernent la prise en compte des caractéristiques environnementales dans les relations interfirmes ainsi que l'incorporation explicite de la demande en interaction avec l'offre des firmes. Ceci nous permet d'étudier les interdépendances entre l'innovateur et les utilisateurs de l'innovation de produit, ainsi que l'influence du changement technologique sur l'évolution des préférences.

Schéma 1 - Interactions offre-demande du modèle



Un schéma représentant les principaux blocs constitutifs de l'industrie considérée dans le modèle permet de résumer les interactions entre offreurs et demandeurs. Aux différents mécanismes économiques intégrés dans le modèle correspond une formalisation adaptée qui est présentée dans le tableau 2 ci-après¹⁵.

¹⁵ Pour une présentation détaillée du modèle, voir la thèse de Saint-Jean (2002) et Saint-Jean (2005).

Tableau 2. - Correspondance entre les mécanismes économiques et la spécification du modèle

Mécanismes économiques	Spécification du modèle
1. Investissements en R&D et activités d'innovation des fournisseurs	
L'innovation est un moyen d'acquérir des positions dominantes sur le marché et une avance technologique. Les activités de R&D sont une source essentielle de l'innovation.	$RD_{i,t} = \mu_i \cdot P_{i,t} \cdot B_{i,t}$ avec $P_{i,t}$ le prix du produit i à la période t ; $B_{i,t}$ le stock de clients de la firme i à la période t et μ_i la part du chiffre d'affaires allouée à la R&D.
Deux types de dépenses de R&D sont effectués : la R&D productive et la R&D environnementale. La R&D productive permet d'améliorer la productivité du procédé et la performance du produit. La R&D environnementale permet d'améliorer la qualité environnementale du procédé et du produit.	$RD_{i,t}^h = \delta_{i,t}^h \cdot RD_{i,t}$: montant de ressources allouées à la caractéristique h $R_{i,t}^h = \gamma \cdot RD_{i,t}^h + (1 - \gamma) \cdot R_{i,t-1}^h$: niveau de recherche atteint sur la caractéristique h
Le processus d'innovation est caractérisé par une incertitude radicale ; la probabilité d'innovation dépend de l'investissement en R&D	$\Pi_{i,t}^h = \pi_1 / [\pi_2 + \pi_3 \cdot \exp(-\pi_4 \cdot R_{i,t}^h)]$: probabilité d'innovation
Les activités d'innovation se déploient au sein de paradigmes de telle sorte qu'elles sont fortement sélectives, finalisées dans des directions précises et souvent cumulatives. Le changement technologique est spécifique aux firmes, cumulatif et dépendant du sentier.	$X_{i,t}^h$ est le niveau de performance réalisé par la firme i pour la caractéristique h ($h=1, \dots, 4$). X^1 correspond à l'efficacité productive, X^2 à la performance du produit, X^3 à la qualité environnementale du procédé et X^4 à la qualité environnementale du produit. $\Delta X_{i,t}^h = \eta_0 \cdot (R_{i,t}^h)^{\eta_1} \cdot (E_{i,t}^h)^{\eta_2} \cdot (X^{h \max} - X_{i,t-1}^h)^{\eta_3}$: le résultat de l'innovation est fonction du niveau de recherche de la firme i , de l'expérience de la firme et de la distance à la frontière technologique. $E_{i,t}^h = \lambda \cdot (MaxE \times R_{i,t}^h) + (1 - \lambda) \cdot E_{i,t-1}^h$: expérience de la firme i
2. Prix du produit	
Application d'un taux de marge sur les coûts de production	$P_{i,t} = (1 + \theta_i) \cdot (1 / X_{i,t-1}^1)$ avec θ_i le taux de marge de la firme i et X^1 la caractéristique d'efficacité productive en relation inverse avec le prix
3. L'espace technologique	
Deux paradigmes offrant des opportunités environnementales différentes coexistent : un paradigme conventionnel et un paradigme « vert ». (cf. section 1, figure 2) Effet de destruction de compétences lors du changement de paradigme	<p>Le changement de paradigme expérimenté par une firme entraîne trois effets : des opportunités technologiques plus grandes sur la qualité environnementale du procédé, une baisse de la performance du produit et une baisse de l'expérience (E).</p>
4. Les règles de décision des clients	
a) L'achat La demande est fonction des caractéristiques du produit que les clients perçoivent ainsi que de leurs préférences. L'achat dépend aussi de comportements mimétiques, de rendements croissants d'adoption et de coûts de changement d'un fournisseur à un autre (effet d'attachement d'une clientèle à une firme).	$Proba_{j,t}^i = (1/P_{i,t-1})^{x_j^1} \cdot (X_{i,t-1}^2)^{x_j^2} \cdot (\tilde{X}_{i,t-1}^3)^{x_j^3} \cdot (\tilde{X}_{i,t-1}^4)^{x_j^4} \cdot (MS_{i,t-1})^e$ probabilité d'achat. x_j^1, x_j^2, x_j^3 et x_j^4 représentent les préférences que le client j attribue aux caractéristiques correspondantes. e traduit l'intensité de l'effet <i>bandwagon</i> qu'un fournisseur ayant une forte part de marché peut exercer sur un

	<p>client. $MS_{i,t} = \frac{B_{i,t}}{\sum_{i=1}^n B_{i,t}}$: part de marché</p>
<p>b) Le remplacement du produit Les biens durables sont remplacés seulement à l'issue d'une période d'utilisation.</p>	<p>Chaque client remplace son produit après T périodes, avec T fixé aléatoirement entre 1 et 10.</p>
<p>c) La défection La poursuite de la relation interfirmes est conditionnée par la réalisation de performances minimales imposées par la réglementation ou la demande finale. Menace implicite de défection/prise de parole gouvernant les relations interfirmes.</p>	<p>Si le fournisseur remplit les critères d'exigence du client, alors le fournisseur enregistre une vente supplémentaire ($N_{i,t} = +1$) tandis que son stock de clients demeure inchangé. Sinon, le fournisseur perd un client et voit son stock de clients diminuer ($B_{i,t} = -1$).</p>
<p>5. Les interactions inter-firmes</p>	
<p>a) Le transfert d'informations L'allocation de la R&D est guidée par les besoins de la demande à la fois en termes de caractéristiques prioritaires pour le client et en termes de normes minimales de qualité requises dans l'industrie.</p>	<p>Collecte de données : un score positif ($Z_{i,t}^h = +1$) est donné aux caractéristiques qui sont à la fois prioritaires aux yeux des clients et qui représentent une source d'avance technologique vis-à-vis des concurrents ; un score négatif ($W_{i,t}^h = +1$) est enregistré pour les caractéristiques ayant une performance inférieure à celle requise par le client.</p>
<p>b) L'évolution des investissements en R&D des fournisseurs Rationalité limitée Règles de décision adaptatives en fonction des stratégies individuelles et des retours de la demande</p>	$RDIndex_{i,t}^h = (1 - \alpha) \cdot RDIndex_{i,t-1}^h + \alpha \cdot \left[\frac{(\beta \cdot Z_{i,t}^h + (1 - \beta) \cdot W_{i,t}^h)}{(\beta \cdot \sum_h Z_{i,t}^h + (1 - \beta) \cdot \sum_h W_{i,t}^h)} \right]$ <p>ajustement de l'indice de R&D α est la vitesse à laquelle l'indice de R&D s'ajuste aux informations remontant des ventes réalisées par le fournisseur. β représente l'importance relative accordée aux scores positifs par rapport aux scores négatifs enregistrés par les caractéristiques.</p> $\delta_{i,t}^h = \frac{RDIndex_{i,t}^h}{\sum_h RDIndex_{i,t}^h}$
<p>c) L'évolution des exigences minimales des clients Les niveaux d'exigence des clients évoluent sous l'influence des activités d'innovation de l'industrie : diffusion sociale / apprentissage collectif</p>	<p>$levelX_{j,t}^h = levelX_{j,t-1}^h + \varepsilon \cdot (\max(0, x_j^h \cdot (\bar{X}_t^h - levelX_{j,t-1}^h)))$ hausse du niveau d'exigence des clients</p> <p>$\bar{X}_t^h = \sum_{i=1}^n MS_{i,t} \cdot X_{i,t}^h$: performance moyenne de l'industrie sur la caractéristique h</p>
<p>6. Le processus de sortie des firmes</p>	
<p>La perte de la clientèle entraîne la sortie de la firme du marché</p>	<p>Sortie à la fois quand le stock de clients est nul et quand les ventes sont égales à zéro sur au moins quatre périodes.</p>

Le modèle envisage deux populations de firmes, des fournisseurs et des clients, qui interagissent dans un contexte de relations verticales. Par conséquent, les préférences de la demande sont celles des clients industriels pour des produits intégrant des innovations environnementales. Ces innovations environnementales permettent d'améliorer la qualité environnementale du procédé de production et/ou celle du produit lors de son usage. Dans notre représentation de la demande, nous nous focalisons sur les interactions entre les pressions exercées par les clients industriels et le contenu en caractéristiques du produit offert par les fournisseurs. Il s'agit donc de représenter la demande d'un produit innovant multi-caractéristiques qui fait l'objet d'interactions entre fournisseurs et utilisateurs du produit.

C'est donc sur une définition des biens en termes de caractéristiques que nous nous fondons. Dans notre cas, le produit se détermine par rapport à quatre caractéristiques : le prix,

la performance du produit, la qualité environnementale du procédé et la qualité environnementale du produit.

Afin de représenter les préférences des clients, nous supposons que les clients attribuent un poids à chacune des caractéristiques. Plus la pondération sur une caractéristique est élevée, plus la caractéristique est importante aux yeux du client et inversement. L'ensemble des pondérations représente donc les préférences du client.

Il est évident que les acheteurs potentiels d'un produit nouveau n'ont pas de préférences *a priori* pour ce produit. Un certain nombre de travaux (Cowan et al., 1997 ; Aversi et al, 1999 ; Metcalfe, 2001 ; Adner et Levinthal, 2001 ; Windrum, 2005) considère alors que les préférences des acheteurs pour les produits sont déterminées par leur statut social, qui agit alors comme une "méta-préférence" exogène, forgeant les préférences actuelles selon l'état de la société dans son ensemble.

Le choix particulier d'une représentation des préférences sous forme de poids affecté aux caractéristiques du bien permet de capturer deux éléments intéressants pour notre analyse des technologies propres au sein de relations verticales interfirmes. D'une part, les pondérations offrent une représentation des préférences des acheteurs comme un ensemble hiérarchisé de caractéristiques du produit qui rend compte du caractère multi-critères du choix d'un produit et du caractère multi-dimensionnel des trajectoires de technologies propres (cf. section 1). D'autre part, l'utilisation de poids affectés aux caractéristiques du produit permet de représenter des acheteurs différenciés qui utilisent la même règle de décision et différentes structures de poids. Dans ce contexte, le poids des caractéristiques joue le rôle des préférences subjectives qui traduisent les goûts des clients, ainsi que le positionnement qu'ils veulent afficher sur le marché du produit final. Le poids relatif attribué à une caractéristique permet de déterminer l'intensité des besoins des clients.

Compte tenu de ces deux aspects, les pondérations s'avèrent relativement bien adaptées à l'incorporation de la demande de qualité environnementale au niveau des produits, ou à celui de l'activité qui a permis de les fabriquer. Les firmes qui développent des innovations environnementales initient alors des changements qui relèvent autant de la volonté de répondre à la pression de la demande et de la réglementation que d'un progrès objectif. Par rapport au modèle d'offre des technologies propres où la demande implicite était homogène (cf. Oltra et Saint-Jean, 2005b), l'approche adoptée ici nous permet de lever cette hypothèse. Cowan et al. (1997) ont mis en évidence que l'hétérogénéité des consommateurs a une influence importante sur la dynamique de la demande. D'après Metcalfe (2001), il est clair que les diversités de préférences sont contraintes, guidées par des forces politiques et sociales plus larges, parfois incorporées dans des réglementations (interdictions d'alcool ou de tabac) et souvent enchâssées dans des contraintes et des représentations sociales de ce qui constitue une consommation acceptable. Dans notre modèle, l'hétérogénéité des acheteurs est reflétée dans le poids différencié que des groupes de clients attribuent aux caractéristiques du produit ainsi que dans les contraintes de budget. Les réglementations environnementales jouent évidemment un rôle déterminant dans la nature des préférences et des exigences.

A cet égard, afin de tenir compte des limites budgétaires et des exigences de qualité minimale que les clients font peser sur les fournisseurs, nous introduisons, en plus des préférences subjectives, des contraintes prix et hors-prix qui varient pour chaque client ou groupe de clients.

Ainsi, les clients sont supposés dotés de prix de réserve. Ceci traduit l'idée selon laquelle les clients intermédiaires doivent faire face à des contraintes de coût de production du produit final qu'ils répercutent sur leurs fournisseurs au moment de l'engagement de relations contractuelles. Les clients sont donc caractérisés par un niveau maximal de prix à ne pas

dépasser compte tenu de leur contrainte de coût, qui traduit l'existence d'un plafond budgétaire.

En outre, les clients expriment des exigences de qualité minimale, que ce soit en termes de performance (ou d'efficacité) du produit ou bien de qualité environnementale. En ce qui concerne les exigences de performance minimale du produit, il paraît raisonnable de considérer que les clients soumettent à leurs fournisseurs le respect de clauses de qualité (normes de qualité ISO 9000 par exemple) qui permettent d'atteindre un certain niveau de performance et d'efficacité du produit. S'agissant des exigences de qualité environnementale minimale, elles sont directement liées aux réglementations environnementales portant sur le procédé et sur le produit.

Du côté de la demande, la décision d'achat des clients fait intervenir des probabilités d'achat qui dépendent de la performance des fournisseurs sur chaque caractéristique pondérée par les préférences subjectives du client ainsi que de leur part de marché (flèches 1 et 1' sur le schéma 1). Les probabilités d'achat dépendent des parts de marché et ainsi de l'histoire des firmes. Cette propriété traduit donc, dans une certaine mesure, un comportement de mimétisme des clients au moment de la décision d'acheter un produit.

Nous supposons en outre que la quantité de produit acheté par un client est égale à un et le renouvellement du produit, qui correspond par hypothèse à un bien intermédiaire ou un équipement semi-durable, se fait après un certain temps d'utilisation.

La question se pose alors de savoir si le client a des raisons de rester chez le fournisseur actuel qui a fait évoluer son produit au cours du temps ou, au contraire, de quitter ce fournisseur. Autrement dit, il s'agit de savoir si le client est satisfait de son fournisseur actuel et est prêt à renouveler son engagement auprès de lui. Dans notre modèle, la prise en compte des exigences de performance minimale et d'un plafond budgétaire au niveau des clients permet de fixer leurs seuils minimaux d'exigence. Ces seuils vont servir de critère de décision à l'issue de la période d'utilisation d'un produit, c'est-à-dire au moment de remplacer le produit. Les performances du fournisseur actuel sont alors comparées avec les critères seuils du client. Ainsi le prix proposé par le fournisseur est comparé avec le prix plafond du client et il en est de même des autres caractéristiques. A l'issue de cette comparaison, la décision de défection est prise si l'un au moins de ces seuils n'est pas atteint par le fournisseur actuel (flèche 4 sur le schéma 1). Dans ce cas, le client choisit un autre fournisseur parmi ceux restant sur le marché. Si, au contraire, le fournisseur actuel remplit les conditions minimales exigées par le client alors celui-ci gardera le même fournisseur.

Du côté des fournisseurs, il s'agit de spécifier comment a lieu la modification des caractéristiques des biens. En effet, le produit tel qu'il est défini par les quatre caractéristiques fait l'objet d'améliorations de la part des fournisseurs. L'évolution des caractéristiques du produit dépend de l'investissement en R&D des firmes. En même temps, les avancées technologiques des firmes de l'industrie sont susceptibles de faire évoluer les exigences des clients.

Afin de rivaliser avec les concurrents et d'attirer des clients (flèches 2 et 2' sur le schéma 1), les firmes vont offrir des combinaisons de caractéristiques différenciées qu'elles vont chercher à améliorer grâce à leurs activités de recherche et d'innovation. Ainsi les firmes vont investir en R&D de façon à accumuler des connaissances et des compétences sur les caractéristiques du produit. L'innovation de produit est le moyen par lequel elles explorent l'espace des caractéristiques.

L'orientation de la R&D en vue de l'amélioration d'une caractéristique est fonction des impulsions de la demande. Les acheteurs ont des motivations différentes pour effectuer un

achat et cette différenciation va déterminer les directions de recherche. Cette différenciation est en outre susceptible d'affecter les développements futurs des utilisations du produit.

Certes les offreurs s'adaptent aux exigences issues de la demande. Mais, pour capter la demande, les offreurs sont conduits à intégrer ces exigences dans la conception des produits et à procurer une information, par exemple, sur la non utilisation de substances polluantes dans le produit. Les caractéristiques ainsi poussées par les offreurs contribuent à faire évoluer les exigences des clients.

Nous tenons ainsi compte du fait que l'innovation influe sur la manière qu'ont les clients de se représenter l'utilisation du produit au cours du temps. En effet, les niveaux de performance auxquels peuvent prétendre les clients dans un premier temps sont fonction des usages que les clients font du produit. Au fur et à mesure des avancées technologiques, elles-mêmes fonction de la structure de la demande, les usages du produit peuvent changer et inciter les clients à revoir à la hausse leurs exigences minimales de performance du produit.

Plusieurs travaux récents sur la demande (Ruprecht, 2005 ; Frenzel Baudisch, 2007) tentent d'intégrer les comportements d'apprentissage chez le consommateur, dans la mesure où ce sont les expériences de consommation qui forgent le mode de consommation et d'utilisation d'un produit. Les expériences passées de consommation et les interactions sociales à l'origine d'un apprentissage par observation de l'expérience des autres interviennent comme un complément de la propre expérience directe d'un consommateur individuel (Witt, 2001). Dans notre modèle, les préférences subjectives restent fixes, tandis que le plafond budgétaire ainsi que les seuils de qualité minimale des clients évoluent en fonction des progrès de l'industrie et des exigences passées (flèches 3 et 3' sur le schéma 1). Dès lors, les exigences de performances économiques et environnementales peuvent évoluer sous l'influence des activités d'innovation et des processus d'apprentissage des firmes de l'industrie.

2.3. Les conditions d'émergence d'une niche de marché verte

Les résultats présentés ci-après résultent d'une configuration particulière concernant les conditions initiales du modèle. Ici, chaque simulation comporte 500 itérations. Nous considérons une population de 12 firmes en interaction avec une population de 200 acheteurs¹⁶. Chaque acheteur réalise un achat à la première période, puis renouvelle l'achat du produit de façon aléatoire dans un intervalle comprenant une à dix périodes. Les firmes sont initialement identiques, de telle sorte que les différences susceptibles d'émerger au cours de la dynamique du système résultent de leurs interactions spécifiques avec l'ensemble des acheteurs.

L'évolution des caractéristiques intervient dans un cadre délimité par un potentiel de développement. Chaque caractéristique est dotée d'une limite supérieure qui représente des contraintes technologiques. Conformément au cadre conceptuel présenté ci-dessus, nous supposons l'existence de deux paradigmes technologiques correspondant chacun à un ensemble de directions de recherche et d'opportunités technologiques, en termes de performances environnementales et d'efficacité productive. Le changement de paradigme

¹⁶ Cette configuration particulière suppose qu'un petit nombre de fournisseurs fait face à un grand nombre de clients. Le choix d'une telle configuration réside dans la possibilité pour les acheteurs d'identifier l'ensemble des fournisseurs en concurrence en raison de leur faible nombre. Mais cette situation oligopolistique du côté des fournisseurs représente aussi un facteur accroissant le coût de changement de fournisseur et donc le pouvoir de négociation de ceux-ci. Le modèle proposé capture ces deux aspects. L'industrie électrique et électronique pourrait s'apparenter à un tel cas.

permet de repousser les limites en termes de performances environnementales et il implique un effet de destruction de compétences qui se traduit par une baisse des performances du produit et une baisse de l'expérience accumulée.

En ce qui concerne la composition initiale de la demande, deux groupes distincts de clients sont considérés. Les différences entre ces deux groupes portent sur les préférences subjectives, c'est-à-dire sur le poids attribué à chaque caractéristique dans l'évaluation de la performance des fournisseurs, ainsi que sur les prix de réserve. Le premier groupe de clients (groupe 1) pondère fortement les caractéristiques environnementales, mais faiblement le prix et la performance du produit ; tandis que le second groupe (groupe 2) pondère fortement les caractéristiques économiques, mais faiblement les caractéristiques environnementales. Le premier groupe de clients avec un positionnement environnemental est supposé avoir un prix de réserve relativement élevé, en conformité avec l'hypothèse selon laquelle ce type de clientèle est prête à payer plus cher un produit répondant à des critères environnementaux. Le second groupe de clients, orienté prix et performance du produit, est supposé avoir un prix de réserve relativement bas.

Les exigences de performance minimale du produit sont supposées identiques pour les deux groupes de clients. Les exigences de performance environnementale minimale sont aussi les mêmes pour les deux groupes, dans la mesure où elles sont imposées par les autorités réglementaires et s'appliquent de façon homogène à l'industrie. Toutefois, les différents indices seuils évoluent différemment selon les groupes de clients en fonction de leurs préférences subjectives et des performances moyennes de l'industrie. Ainsi, en ce qui concerne les exigences minimales de qualité environnementale, les firmes seront d'abord soumises à une phase de mise en conformité réglementaire dont les impulsions proviennent de la demande. Il sera ensuite possible d'observer dans quelle mesure les firmes vont au-delà des normes réglementaires grâce aux exigences des clients à positionnement environnemental.

Compte tenu de ces conditions initiales, le modèle permet d'éclairer différents scénarios de la dynamique industrielle. Ainsi, les résultats agrégés mettent en évidence deux types de structure industrielle alternative émergente à long terme.

Une structure concentrée composée de firmes spécialisées sur le prix et la performance du produit. Les firmes survivantes à l'issue des 500 périodes sont caractérisées par un fort investissement en R&D sur les performances économiques du procédé et du produit tout en étant en conformité avec la réglementation environnementale. Toutefois ces firmes ne changent pas de paradigme et suivent des trajectoires de type T1 (cf. section 1). Ce cas est désigné par la notation MP car il fait apparaître un monopole ou un oligopole de firmes de type PROD¹⁷ évoluant dans le paradigme à faible potentiel environnemental. Sur une batterie de 50 séries de simulations, 26 séries correspondent à ce scénario MP (cf. figures 4 et 5).

Une structure concentrée où coexistent une niche de marché "verte" et un faible nombre de firmes dominantes caractérisées par une avance technologique sur le prix et la performance du produit. La niche de marché "verte" est due à la survie d'une firme caractérisée par un fort investissement en R&D environnementale qui lui permet de changer de paradigme. Cette entreprise est également caractérisée par un prix élevé et de faibles performances du produit. Ce cas sera identifié par la notation NV car il se caractérise par

¹⁷ Les firmes de type PROD désignent des firmes dont les activités de R&D sont majoritairement orientées vers l'amélioration de l'efficacité productive et de la performance du produit. Les firmes de type ENVI représentent quant à elles des firmes dont les activités de R&D sont essentiellement consacrées à l'amélioration de la qualité environnementale.

l'émergence d'une niche verte dominée par une firme de type ENVI qui évolue dans le paradigme à fort potentiel environnemental, suivant en cela une trajectoire de type T2 (cf. section 1, §2), et qui coexiste avec (au moins) une firme de type PROD dominant le marché et engagée sur une trajectoire de type T1. Sur une batterie de 50 séries de simulations, 20 séries correspondant au scénario NV ont été observées¹⁸ (cf. figures 4 et 5).

Le premier scénario correspond à l'émergence d'un design dominant exclusif qui, d'une part, permet de satisfaire la totalité de la clientèle malgré son hétérogénéité et qui, d'autre part, compromet la survie de firmes spécialisées sur les caractéristiques environnementales du produit. Le deuxième scénario correspond à l'émergence d'une niche de marché verte aux côtés d'un nombre peu élevé de firmes dominantes spécialisées sur les caractéristiques économiques du produit. La niche de marché verte résulte de l'ajustement entre une firme pionnière sur l'environnement et une clientèle sensible aux critères de protection de l'environnement, prête à payer un prix relativement élevé et caractérisée par de moindres exigences de performance minimale du produit.

Figure 4 – Efficacité productive et part de marché

Parts de marché à la dernière période en fonction de l'efficacité productive (50 simulations)

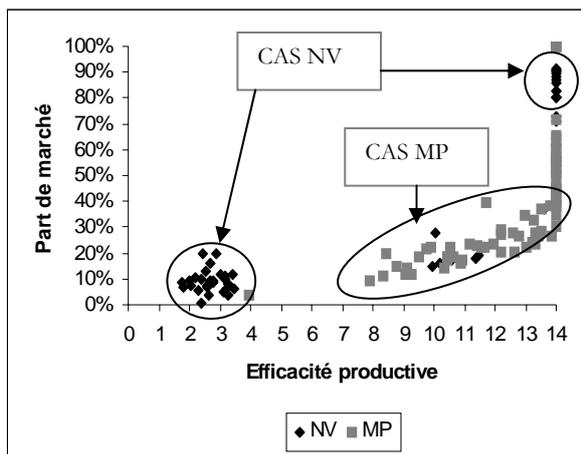
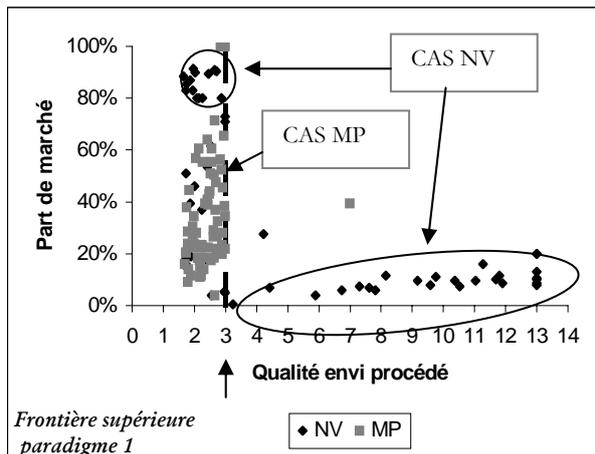


Figure 5 – Qualité environnementale et part de marché

Parts de marché à la dernière période en fonction de la qualité environnementale du procédé (50 simulations)



En fait, l'intensité de la concurrence qui s'exerce entre les firmes leaders sur les caractéristiques les plus demandées tend à conditionner l'émergence et la survie d'une niche de marché verte. En effet, étant donné le faible nombre de clients verts initialement prêts à payer un prix plus élevé pour un produit répondant à des critères environnementaux et la spécificité de la règle d'adaptation des seuils d'exigence minimale, les firmes misant sur l'amélioration de la qualité environnementale sont pénalisées à la fois par la diffusion généralisée à l'ensemble des clients des performances économiques (efficacité productive, performance produit) moyennes de l'industrie et par la faible propagation des exigences de performance environnementale émanant d'un groupe leader de clients verts. La concurrence peut être -comme dans le cas MP- suffisamment rapide et forte entre les firmes de type PROD pour que les performances moyennes de l'industrie sur le prix affectent sensiblement les exigences budgétaires des clients verts. La diminution du prix de réserve qui s'ensuit

¹⁸ Sur une batterie de 50 séries de simulations, nous avons observé quatre cas particuliers caractérisés à long terme par une domination de firmes de type PROD ayant changé de paradigme. La faible fréquence d'apparition de ce type de situation nous conduit à nous focaliser sur l'analyse des deux autres cas plus fréquents.

désavantage les firmes spécialisées sur la qualité environnementale mais moins performantes sur le prix. La formation d'une niche de marché verte nécessite au contraire la capture d'une clientèle prête à payer un prix relativement élevé pour un produit respectant des critères de qualité environnementale. Ainsi, le prix plafond des clients exerçant une forte pression sur les caractéristiques environnementales du produit reste suffisamment élevé pour que la firme spécialisée en environnement bénéficie d'un chiffre d'affaires suffisamment élevé lui permettant d'investir en R&D et de satisfaire les exigences des clients à positionnement environnemental. Néanmoins, la persistance d'un niveau relativement élevé de prix plafond pour le groupe de clients verts et d'un écart de prix entre ces deux groupes sont des conditions nécessaires mais non suffisantes à l'émergence et à la survie d'une niche de marché verte à long terme. Il est également essentiel que se constitue un groupe ayant des exigences de performance environnementale allant au-delà de la mise en conformité, jouant ainsi le rôle de groupe d'utilisateurs pionniers dans l'environnement (cf. figures 6 et 7).

Figure 6 – Les conditions de l'émergence d'une niche de marché verte : le prix

Prix maximum exigé à la dernière période pour les deux groupes de clientèle G1 (clients verts) et G2 (clients traditionnels) (Box plot de 50 simulations)

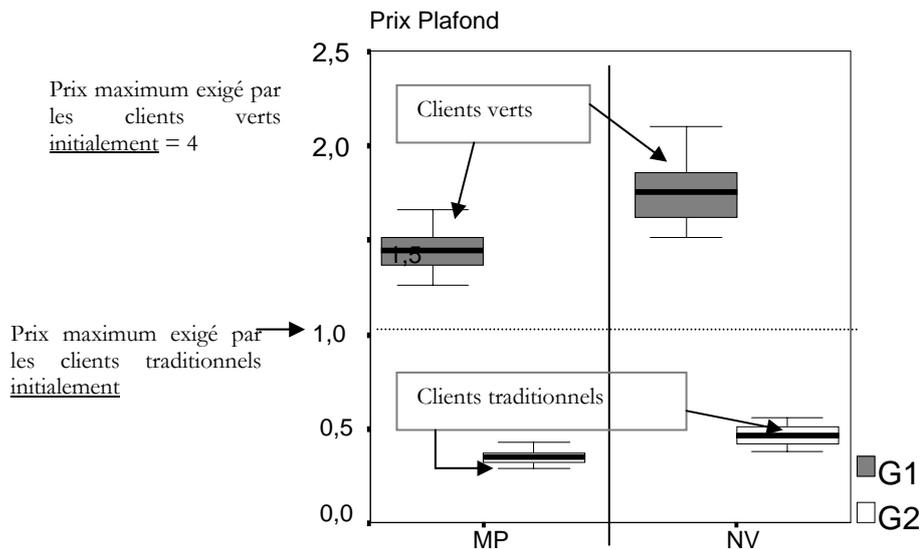
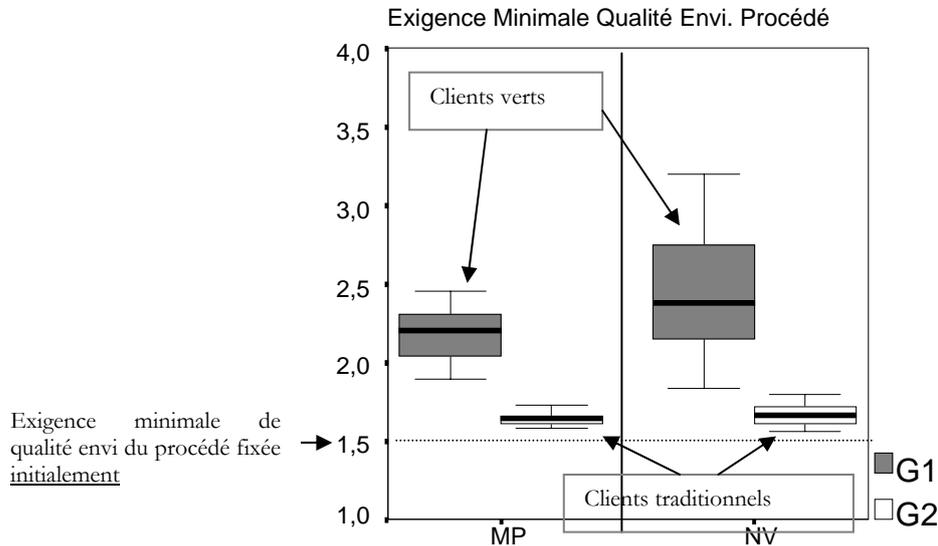


Figure 7 - Les conditions de l'émergence d'une niche de marché verte : la qualité environnementale

Exigence minimale de qualité environnementale du procédé à la dernière période pour les deux groupes de clientèle G1 (clients verts) et G2 (clients traditionnels) (Box plot de 50 simulations)



Finalement, l'émergence et la survie d'une niche de marché verte dépend de la conjonction de deux processus :

- L'intensification de la concurrence qui se joue entre les firmes misant sur la compétitivité-prix concourt à abaisser les exigences en prix de l'ensemble des clients et, en particulier, le consentement à payer initialement élevé du groupe de clients verts. Cet effet réduit la possibilité pour les firmes spécialisées en environnement de bénéficier d'une rente élevée de monopole.
- La pression exercée sur les caractéristiques économiques par les firmes misant sur la compétitivité-prix et la performance du produit ralentit l'alignement vers le haut des exigences de performance environnementale minimale du groupe de clients verts, pourtant en mesure de renforcer la spécialisation des firmes pionnières en environnement et de contribuer aux avancées dans le paradigme à fort potentiel environnemental.

La concurrence en prix tend donc à empêcher la niche de marché verte de capturer un groupe de clients verts ayant des exigences de qualité environnementale devant celles établies par les normes réglementaires. De plus, la comparaison des deux configurations de marché montre qu'il existe **une fenêtre d'opportunité pour le développement de la niche verte** qui nécessite un changement de paradigme suffisamment précoce des firmes pionnières sur l'environnement pour éviter à la fois un désavantage trop important du point de vue de la performance du produit avec les firmes leaders en prix et un décalage trop fort avec les niveaux d'exigence de performance minimale du produit des clients.

Au total, de la comparaison entre les deux scénarios, il ressort que l'intensification de la concurrence entre des firmes spécialisées sur les caractéristiques économiques peut compromettre la survie d'une firme pionnière en environnement capable de capturer un groupe de clients attentifs aux caractéristiques environnementales et en avance sur les exigences fixées par les dispositifs réglementaires. Ce résultat suggère que, si la situation

concurrentielle en amont de la chaîne est oligopolistique et focalisée sur les caractéristiques économiques du produit, le succès de l'effet d'entraînement qui pousse les fournisseurs à entreprendre des démarches environnementales innovantes pourrait être compromis : les fournisseurs pourraient refuser de répondre aux exigences de qualité environnementale des clients industriels, ces derniers ne disposant pas forcément d'alternative pour alimenter leur production.

En outre, la comparaison des deux scénarios montre que l'effet de destruction de compétences et de chute de performance du produit expérimenté lors du changement de paradigme rend déterminant le moment d'entrée dans le paradigme à fort potentiel environnemental des firmes pionnières en environnement. Dans le cadre de notre modèle de coévolution des fournisseurs et des clients industriels, un changement relativement précoce de paradigme concourt à ouvrir une fenêtre d'opportunité pour le développement de la niche de marché verte. L'ensemble de ces résultats suggère que la coordination qualitative qui régule les relations verticales interfirmes est loin d'être suffisante pour favoriser le développement de technologies radicalement nouvelles. Dans ce cas, l'introduction en temps opportun de nouvelles mesures de politique publique peut contribuer à augmenter la survie de firmes pionnières en environnement.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse de nos travaux théoriques et empiriques sur les innovations environnementales et leur rôle dans la dynamique industrielle. Ces travaux s'inscrivent dans une perspective évolutionniste du changement technologique qui nous permet de développer une analyse dynamique des innovations environnementales mettant en exergue leur caractère multidimensionnel et leur évolution le long de trajectoires technologiques enchâssées dans les paradigmes technologiques dominants. La dimension environnementale apparaît comme une nouvelle caractéristique à prendre en compte dans les compromis technologiques que les firmes cherchent à développer dans le cadre de leurs stratégies d'innovation. Dans cette optique, il s'agit de combiner les performances environnementales avec les exigences en termes de coûts, de productivité et de performances du produit. C'est cette combinaison de multiples dimensions qui s'avère particulièrement problématique dans le développement et la diffusion de technologies propres.

L'analyse en termes de trajectoires et de paradigmes permet d'appréhender la question du changement de paradigme technologique. Même s'il est aujourd'hui reconnu qu'une réelle amélioration des performances environnementales à long terme nécessite une remise en cause des paradigmes technologiques dominants, en particulier dans le domaine de l'énergie, de la chimie et des transports, la transition vers de nouveaux "paradigmes verts" soulèvent de nombreux questionnements scientifiques, technologiques et économiques. Encore une fois, c'est le problème de compromis entre les dimensions environnementales et économiques qui est généralement au cœur du débat. Les analyses sectorielles, notamment le cas de la chimie verte et de l'automobile, permettent d'étudier les stratégies d'innovations environnementales des firmes et les sources de blocage, ou de verrouillage technologique, dans le paradigme technologique dominant. Aux sources de verrouillage traditionnelles, telles que les économies d'échelle, les externalités de réseau, les effets d'apprentissage, les rendements informationnels croissants et les interdépendances technologiques (Arthur, 1988), s'ajoutent l'incompatibilité entre certains critères environnementaux et certaines dimensions productives ou caractéristiques du produit¹⁹, les incertitudes et controverses scientifiques quant aux options

¹⁹ Par exemple dans le cas de l'automobile, l'incompatibilité entre la plus grande sévérité des normes d'émissions

technologiques à privilégier, en particulier en termes de sources d'énergie, et la question des effets rebonds qui tend à alimenter ces controverses, et enfin le problème de la compétitivité prix. Ces différents facteurs sont autant de sources de blocage pour le développement de nouveaux paradigmes technologiques verts, tels que la chimie verte ou les véhicules à piles à combustible.

Nos travaux basés sur la modélisation ont en outre mis en évidence le rôle déterminant de la demande dans le changement de paradigme, notamment à travers le rôle d'une masse critique d'utilisateurs ayant des exigences environnementales élevées et un consentement à payer également élevé. Une telle demande conditionne la formation d'une niche de marché verte qui donne la possibilité, sans toutefois en garantir le succès et la pérennité, de progrès technologiques ancrés dans le paradigme vert.

En termes de politiques publiques, il semble donc qu'une réglementation stricte n'est pas suffisante pour favoriser la transition vers de nouveaux paradigmes technologiques. Malgré l'effet incitatif de la réglementation, les innovations environnementales sont principalement développées dans le cadre des paradigmes dominants et le développement de technologies propres radicalement nouvelles est insuffisant. Pour dépasser ces limites, il est nécessaire de mettre en œuvre une réelle politique d'innovation environnementale permettant à la fois de soutenir la recherche publique, indispensable au développement de la base de connaissances scientifiques nécessaires à l'établissement de nouveaux paradigmes, et d'aider les firmes à développer des compromis technologiques efficaces. Outre le soutien à la recherche fondamentale et à l'innovation, les pouvoirs publics ont aussi un rôle à jouer du côté de la demande, en particulier à travers les politiques de commandes publiques. De telles politiques représentent un vecteur essentiel d'informations et d'exigences environnementales en mesure de jouer le rôle de pressions sélectives sur les fournisseurs et d'orienter les critères de performance sur lesquelles doivent reposer les innovations environnementales.

de CO2 et les exigences en termes de sécurité et de fiabilité des véhicules qui entraînent une augmentation de leur poids. Un autre exemple est celui du véhicule électrique dont l'usage, malgré des performances environnementales élevées, est cantonné à des niches de marché en raison de sa faible autonomie et de sa gamme réduite d'utilisation.

Références

- ADEME, 1998, *Les technologies propres, un enjeu pour l'industrie et encore un défi*, Ademe Editions, Paris.
- Adner R., Levinthal D., 2001, Demand heterogeneity and technology evolution : Implications for product and process innovation, *Management Science*, 47 (5): 611-28.
- Ambec S., Barla P., 2000, Productivité et réglementation environnementale : une analyse de l'hypothèse de Porter, *Working Paper*, Université Laval, Canada.
- Arrow K.J., 1962, Economic welfare and the allocation of resources for invention, in R.R. Nelson (ed.), *The rate and direction of inventive activity*, Princeton, Princeton University Press.
- Ashford N.A., Ayres C. and Stone R.F., 1985, « Using regulation to change the market for innovation », *Harvard Environmental Law Review*, 9: 419-66.
- Aversi R., Dosi G., Fagiolo G., Meacci M., Olivetti C., 1999, Demand dynamics with socially evolving preferences, *Industrial and Corporate Change*, 8: 353-99.
- Baudry B., 2004, La question des frontières de la firme: Incitation et coordination dans la firme-réseau, *Revue économique*, 55 (2): 247-73.
- Baudry B., 1995, *L'économie des relations interentreprises*, Collection Repères, La Découverte.
- Beise M., Rennings K., 2003, Lead markets of environmental innovations: a framework for innovation and environmental economics, ZEW Discussion Paper, n° 03-01.
- Belin J., Horbach J. and Oltra V., 2009, « Determinants and specificities of eco-innovations – An econometric analysis for France and Germany based on the Community Innovation Survey », DIME Workshop on *Environmental innovation, industrial dynamics and entrepreneurship*, Utrecht, The Netherlands, 10-12 Mai.
- Bélis-Bergouignan M. C., Oltra V., Saint-Jean M., 2004, Trajectories towards clean technology: the example of volatile organic compound (VOC) emission reductions, *Ecological Economics*, 48 (2): 201-20.
- Brouillat E., 2008, *Dynamique industrielle et innovation environnementale: le cas de la prévention des déchets*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université Bordeaux IV, novembre.
- Brunnermeier S.B., Cohen M.A., 2003, Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries, *Journal of Environmental Economics and Management*, 45: 278-93.
- Chiaromonte F., Dosi G., 1993, "Heterogeneity, competition and macroeconomic dynamics", *Structural Change and Economic Dynamics*, 4: 39-46.
- Cleff T. and Rennings K., 2000, Determinants of environmental products and process innovation – evidence from the Mannheim innovation panel and a follow-up telephone survey, in Hemmelskamp J., Rennings K. and Leone (eds), *Innovation-oriented environmental regulation*, ZEW Economic Studies, Physica Verlag, Heidelberg, New York.
- Cowan R., Cowan W., Swann P., 1997, A Model of Demand with Interactions Among Consumers, *International Journal of Industrial Organisation*, 15: 711-32.
- Dosi G. and Grazzi M., 2006, « Energy, development and the environment: an appraisal three decades after the limits to growth debate », *LEM Working Paper*, n° 2006/15.

- Dosi G., 1982, Technological Paradigms and Technological Trajectories, *Research Policy*, 11: 147-62.
- Dosi G., 1988, The nature of the innovative process, in *Technical change and economic theory*, G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg and L. Soete (eds), Pinter Publishers, London and New York, 221-38.
- Downing P. and White L., 1986, Innovation in pollution control, *Journal of Environmental Economics and Management*, 13: 18-29.
- Faucheux S. and Nicolai I., 1998, Les firmes face au développement soutenable : changement technologique et gouvernance au sein de la dynamique industrielle, *Revue d'Economie Industrielle*, 83, 1^{er} trimestre, 127-145.
- Florida R., 1996, Lean and Green : The move to environmentally Conscious Manufacturing, *California Management Review*, 39, (1): 80-105.
- Freeman C., 1992, *The economics of hope*, Pinter Publishers, London and New York.
- Frenzel Baudisch A., 2007, Consumer heterogeneity evolving from social group dynamics: Latent class analyses of German footwear consumption 1980–1991, *Journal of Business Research*, 60 (8): 836-47.
- Frigant V., 2000, *Coordination des relations verticales et proximité. Une analyse des défaillances interfirmes selon le modèle défection / prise de parole*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université Bordeaux IV.
- Frondel M., Horbach J. and Rennings K., 2007, « End-of-pipe or cleaner production? An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries », in Johnstone N. (ed.), *Environmental Policy and Corporate Behaviour*, Edward Elgar, OECD.
- Frondel M, Horbach J, Rennings K., 2004, What Triggers Environmental Management and Innovation? Empirical Evidence for Germany, *Discussion Paper No. 15*. RWI: Essen.
- Horbach, J., 2008, « Determinants of Environmental Innovation - New Evidence from German Panel Data Sources », *Research Policy*, Vol. 37, Issue 1, 163-173.
- Huber J., 2004, *New Technologies and Environmental Innovation*, Edward Elgar Publishing, UK.
- Jacob K., Beise M., Blazejczak J., Edler D., Haum R., Jänicke M., Löw T., Petschow U. and Rennings K., 2005, *Lead markets for environmental innovations*, Physica-Verlag Heidelberg, Germany.
- Jaffe A.B., Newell R. G. and Stavins R. N., 2002, « Environmental policy and technological change », *Environmental and Resource Economics*, 22 (1-2): 41-69.
- Jaffe A. and Palmer K., 1997, Environmental regulation and innovation: a panel data study, *Review of Economics and Statistics*, 79: 610-19.
- Jaffe A., Peterson S. Portney P. and Stavins R., 1995, Environmental regulation and the competitiveness of U.S. Manufacturing: what does the evidence tell us?, *Journal of Economic Literature*, Vol. XXXIII, 132-63.
- Johnstone N. (ed.), 2007, *Environmental policy and corporate behaviour*, Edward Elgar Publishing, OECD.
- Kemp R., 1997, *Environmental Policy and Technical Change: A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*, Edward Elgar Publishing.

- Kemp R., Olsthoorn X., Oosterhuis and Verbruggen H., 1992, Supply and Demand Factors of Cleaner Technologies: some empirical evidence, *Environment and Resource Economics*, 2: 615-34.
- Kemp R., Rotmans J., 2001, The management of the co-evolution of technical, environmental and social systems, paper for international conference *Towards Environmental Innovation Systems*, 27-29 Sept., Garmisch-Partenkirchen.
- Lanjouw J. and Mody A., 1996, Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology, *Research Policy*, 25: 549-571.
- Lee J., Veloso F., Hounshell D.A. and Rubin E.A., 2004, Innovation in Automotive Emission Control Technologies: Government Actions, and Incentive Activity, *Academy of Management Best Paper Proceedings*, New Orleans.
- Magat W., 1979, The effects of environmental regulation on innovation, *Law and Contemporary Problems*, 43: 4-25.
- Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S., 1999, 'History-friendly' models of industry evolution : the computer industry, *Industrial and Corporate Change*, 8, 3-40.
- Malueg D.A., 1989, Emission credit trading and the incentive to adopt new pollution abatement technology, *Journal of Environmental Economics and Management*, 16, 52-7.
- Markard J., Wirth S., 2008, Public support of environmental innovations in the energy sector: challenges at the interface of sectoral technology policy, energy policy and national innovation systems, DIME Workshop on *Empirical analyses of environmental innovation*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 17-18 January.
- Mazzanti M. and Zoboli R., 2006, Examining the factors influencing environmental innovations, *FEEM Working Paper*, n° 20.2006.
- MEI Report, 2008, Measuring Eco-innovations, European Project (FP6-2005-SSP-5A), Final Report, downloadable on <http://www.merit.unu.edu/MEI/>
- Metcalf J.S., 2001, Consumption, preferences and the evolutionary agenda, *Journal of Evolutionary Economics*, 11 (1): 37-58.
- Milliman S. and Prince R., 1989, Firm incentives to promote technological change in pollution control, *Journal of Environmental Economics and Management*, 17: 247-65.
- Nameroff T.J., Garant R.J., Albert M.B., 2004, Adoption of green chemistry: an analysis based on US patents, *Research Policy*, 33: 959-74.
- Nelson R. et Winter S., 1982, *An evolutionary theory of economic change*, The Belknap Press of Harvard University Press.
- Oltra V., 2008, Environmental innovation and industrial dynamics: the contributions of evolutionary economics, *Working papers of GREThA*, n°2008-28, <http://ideas.repec.org/p/grt/wpegrt/2008-28.html>.
- Oltra V., Saint Jean M., 2005a, Environmental innovation and clean technology: an evolutionary framework, *International Journal of Sustainable Development*, 8 (3): 153-72.
- Oltra V., Saint Jean M., 2005b, The dynamics of environmental innovations: three stylised trajectories of clean technology, *Economics of Innovation and New Technology*, 14 (3): 189-212.
- Palmer K., Oates W.E., Portney P.R., 1995, Tightening environmental standards : the benefit-cost or the no-cost paradigm ?, *Journal of Economic Perspectives*, 9, 119-32.

- Porter M. and van der Linde C., 1995, Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship, *Journal of Economic Perspectives*, 9 (4): 97-118.
- Rehfeld K.M., Rennings K. and Ziegler, A., 2007, « Integrated Product Policy and Environmental Product Innovations: An Empirical Analysis », *Ecological Economics*, 61 (1): 91-100.
- Rennings K., 2000, Redefining innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics, *Ecological Economics*, 32, 319-32.
- Ruprecht W., 2005, The historical development of the consumption of sweeteners - a learning approach, *Journal of Evolutionary Economics*, 15 (3): 247-72.
- Saint Jean M., 2002, *Emergence et diffusion des technologies propres dans le cadre de relations verticales interfirmes*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université Bordeaux IV, décembre.
- Saint Jean M., 2005, Coevolution of suppliers and users through an evolutionary modelling – The case of environmental innovations, *European Journal of Economic and Social Systems*, 18 (2): 255-84.
- SESSI, 1996-2004, *Les investissements anti-pollution*, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, Paris.
- SESSI, 2000, Peintures, vernis et encres, Les couleurs de l'industrie, *Le 4 Pages*, n°141, décembre.
- SESSI, 2005, Traitement et revêtement des métaux, Une sous-traitance de proximité qui s'adapte aux défis environnementaux, *Le 4 Pages*, n°211, septembre.
- Taylor, M.R., Rubin, E.S., Nemet, G.F., 2006, « The Role of Technological Innovation in Meeting California's Greenhouse Gas Emission Targets » Chapter Three in Hanemann, M. and A. Farrell (eds.), *Managing Greenhouse Gases in California*, Report prepared for the Energy Foundation and the Hewlett Foundation. 2006.
- Taylor M.R., Rubin E.S., Hounshell D.A., 2003, Effect of government actions on technological innovation for SO₂ control, *Environmental Science and Technology*, 37: 4527-34.
- Wagner M., 2007, The Link between Environmental Innovation, Patents, and Environmental Management, *DRUID Working Papers*, n° 07-14.
- Windrum P., 2005, Heterogeneous preferences and new innovation cycles in mature industries: the amateur camera industry 1955--1974, *Industrial and Corporate Change*, 14(6): 1043-74.
- Witt U., 2001, Learning to consume - A theory of wants and the growth of demand, *Journal of Evolutionary Economics*, 11: 23-36.

Cahiers du GREThA Working papers of GREThA

GREThA UMR CNRS 5113

Université Montesquieu Bordeaux IV
Avenue Léon Duguit
33608 PESSAC - FRANCE
Tel : +33 (0)5.56.84.25.75
Fax : +33 (0)5.56.84.86.47

www.gretha.fr

Cahiers du GREThA (derniers numéros)

- 2009-02 : CARAYOL Nicolas, LAHATTE Agenor, *Dominance relations and universities ranking*
2009-03 : PETIT Emmanuel, *Emotions et décision économique dans le jeu de l'ultimatum*
2009-04 : BLANCHETON Bertrand, JEGOUREL Yves, *Les fonds souverains : un nouveau mode de régulation du capitalisme financier ?*
2009-05 : OLTRA Vanessa, KEMP René, DE VRIES Frans P., *Patents as a Measure for Eco-Innovation*
2009-06 : MOYES Patrick, *Mesurer les inégalités économiques*
2009-07 : CARAYOL Nicolas, CASSI Lorenzo, *Who's Who in Patents. A Bayesian approach*
2009-08 : FRIGANT Vincent, *La chaîne de valeur de l'industrie automobile est-elle soluble dans des pratiques socialement responsables ?*
2009-09 : ROUILLON Sébastien, *Un nouveau mécanisme décentralisant les équilibres de Lindahl*
2009-10 : PETIT Emmanuel, *Does indignation lead to generosity? An experimental investigation*
2009-11 : KECHIDI Med, TALBOT Damien, *Réseau de proximité et gestion des interactions techniques et organisationnelles : les firmes pivots de l'aéronautique*
2009-12 : DOUAI Ali, MONTALBAN Matthieu, *Institutions and the environment: the case for a historical political economy*
2009-13 : NICET-CHENAF Dalila, ROUGIER Eric, *FDI and growth: A new look at a still puzzling issue*
2009-14 : NICET-CHENAF Dalila, ROUGIER Eric, *Human capital and structural change: how do they interact with each other in growth?*
2009-15 : DOYEN Luc, PERREAU Jean-Christophe, *Sustainable coalitions in the commons*
2009-16 : YILDIZOGLU Murat, *Approche évolutionniste de la dynamique économique*
2009-17 : JULLIEN Bernard, *Approche institutionnaliste de la dynamique industrielle*
2009-18 : BELIS-BERGOIGNAN Marie-Claude, *Analyse évolutionniste de la dynamique sectorielle*
2009-19 : JULLIEN Bernard, *L'analyse sectorielle institutionnaliste : projet et méthodes*
2009-20 : CORIS Marie, FRIGANT Vincent, LAYAN Jean-Bernard, TALBOT Damien, *Les dynamiques spatiales des activités productives*
2009-21 : CARRINCAZEAX Christophe, *Les dynamiques spatiales de l'innovation*
2009-22 : OLTRA Vanessa, SAINT JEAN Maïder, *Innovations environnementales et dynamique industrielle*

La coordination scientifique des Cahiers du GREThA est assurée par Sylvie FERRARI et Vincent FRIGANT. La mise en page est assurée par Dominique REBOLLO.
