

Innovation dans le secteur automobile et réglementation environnementale

(REG – INNOV)

8 Juillet 2015

**Rapport pour le Ministère de l'Ecologie, du développement durable et
de l'énergie, financé dans le cadre du PREDIT (convention n°13-MT-
G06-6-CVS-006)**

Préparé par :

Matthieu Glachant, MINES ParisTech et ARMINES, CERNA – Centre d'économie
industrielle, et Antoine Dechezleprêtre, Grantham Research Institute for Climate Change
and the Environment, London School of Economics



Table des matières

Synthèse non technique.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	3
1 Introduction.....	4
2 Une brève présentation du secteur automobile.....	4
3 Le modèle.....	5
3.1 Hypothèses.....	5
3.2 Analyse de l'équilibre.....	6
3.3 Innovation totale.....	6
4 Données.....	8
4.1 Données sur la régulation des émissions du secteur automobile.....	8
4.2 Données sur les brevets.....	9
4.3 Un coup d'œil aux données : deux exemples.....	9
5 Analyse économétrique.....	10
5.1 Modèle de base : l'effet de la rigueur réglementaire sur l'innovation.....	10
5.2 Technique d'estimation et échantillon.....	10
6 Résultats.....	10
6.1 Résultats principaux.....	10
6.2 Tests de robustesse.....	11
7 Conclusion.....	13
8 Bibliographie.....	14
Annexe 1.....	19

Synthèse non technique

L'industrie automobile est en profonde mutation. Les déterminants les plus importants de ces évolutions sont sans doute l'intensification de la concurrence internationale et l'impact de politiques publiques visant à réduire l'impact environnemental des automobiles. La conjonction de ces deux facteurs conduit de nombreux acteurs à s'interroger sur les liens entre sévérité des politiques environnementales et compétitivité de l'industrie nationale.

L'effet des politiques environnementales sur l'innovation et sur la compétitivité sont des arguments régulièrement avancés pour justifier la mise en place de réglementations parfois décriées par les entreprises en raison des coûts supplémentaires qu'elles font peser, au moins à court terme, sur celles qui y sont soumises. La capacité des réglementations environnementales à orienter l'innovation vers des technologies moins polluantes et à donner aux entreprises innovantes un avantage concurrentiel à moyen terme est en effet perçue comme une clé de leur acceptabilité politique.

L'effet de la réglementation sur l'innovation et son effet sur la compétitivité correspondent en fait aux deux versions de ce qu'il est convenu d'appeler l'hypothèse de Porter (1995). Selon sa version dite "faible", les réglementations environnementales peuvent encourager l'innovation dans des technologies développées précisément pour y répondre. Selon la version "forte", les politiques environnementales ambitieuses peuvent générer des bénéfices économiques à même de compenser leurs coûts immédiats. En particulier, le renforcement de la réglementation dans un pays donnerait aux entreprises qui y sont localisées un "first mover advantage" qui générerait à moyen terme un avantage compétitif sur les entreprises localisées dans les pays moins proactifs selon la séquence suivante : la réglementation du pays pionnier susciterait à court terme le développement de nouvelles technologies plus efficaces qui fournirait dans un second temps un avantage concurrentiel une fois la réglementation adoptée par les autres pays. Dans la version forte, la dimension internationale joue un rôle décisif puisque l'éventuel bénéfice économique naît du leadership réglementaire, c'est-à-dire du fait que le pays dans lequel est localisé l'innovateur est en avance sur les autres en matière de réglementations environnementales.

L'objectif de notre recherche est de vérifier empiriquement si le leadership réglementaire en matière environnementale d'un pays conduit à un leadership technologique des entreprises qui y sont localisées (la version donc « faible » de l'hypothèse de Porter. Nous nous intéresserons plus spécifiquement à l'effet des normes limitant les émissions polluantes des véhicules neufs (du type EURO en Europe) sur l'innovation dans les technologies non-polluantes des entreprises de ce secteur (assembleurs et équipementiers). La réponse à notre question de recherche n'a rien d'évident, notamment parce que l'industrie automobile est partiellement globalisée ; on peut donc supposer que les innovateurs ne réagissent pas seulement aux signaux réglementaires émanant du pays dans lequel ils sont implantés.

Pour atteindre cet objectif, nous développons un modèle économique dont les prédictions sont ensuite testées avec des données mettant en regard le niveau de réglementation sur les polluants automobiles dans 70 pays entre 1992 et 2007 et les dépôts de brevets dans les technologies permettant de se conformer à ces réglementations déposés dans le monde au cours de la même période. Nous identifions clairement un effet positif du leadership réglementaire sur l'innovation verte. Cet effet est même important puisque nous montrons que l'innovation verte des innovateurs locaux augmente quand le pays est un leader en matière de réglementation, alors qu'elle diminue si le renforcement de la norme intervient dans un pays qui adopte une norme précédemment mise en place ailleurs.

Cet impact négatif de la réglementation sur l'innovation dans les pays en rattrapage réglementaire est contre-intuitif. Les analyses existantes prédisent en effet une différence entre pays leaders et suiveurs, mais pas au point de détériorer l'innovation dans le second groupe de pays. L'interprétation la plus probable est que, dans le secteur automobile, l'introduction d'une nouvelle norme environnementale nécessite des technologies qui lui sont spécifiques. Un projet de R&D donné ne réduit donc que le coût de respecter la norme pour laquelle il a été mis en place, il n'aide à respecter ni une norme moins stricte ni une norme plus stricte. L'évolution des normes suscite alors un processus de destruction créatrice puisque la nouvelle norme rend obsolètes les technologies développées pour les normes antérieures. Comme il y a destruction, le changement réglementaire peut diminuer l'innovation en détruisant le stock de connaissances à partir duquel elle est générée.

Ces résultats confirment donc la thèse selon laquelle le leadership réglementaire d'un pays favorise le leadership dans le développement des technologies vertes. Il fournit ainsi un argument selon lequel la réglementation verte peut constituer un outil de politique industrielle. Il est toutefois important de souligner que nous n'avons pas étudié l'impact du leadership technologique sur la compétitivité et la profitabilité des entreprises concernées. Cette évaluation pourra faire l'objet de recherches ultérieures.

Résumé

Il est généralement admis que le renforcement des normes environnementales stimule l'innovation verte. Nous construisons un modèle et présentons des preuves empiriques qui infirment partiellement ce point de vue. Le modèle affirme que les changements de régulation ont des effets contraires sur l'innovation selon que le pays est un précurseur en termes de réglementation ou qu'il adopte une norme précédemment adoptée dans un autre pays. L'analyse d'un panel de données de l'industrie automobile de 1992 à 2007 confirme ces prévisions. Nous montrons que le leadership réglementaire augmente l'innovation tandis que l'innovation baisse lorsque le pays suit des réglementations précédemment adoptées ailleurs.

Abstract

It is commonly believed that strengthening environmental standards increases green innovation. We develop a model and produce empirical evidence which partly disconfirm this view. The model predicts that regulatory change has opposite impacts on innovation when the country is a regulatory leader or a country adopting a standard previously introduced elsewhere. The analysis of panel data from the auto industry from 1992 to 2007 confirms these predictions. We find that regulatory leadership increases innovation whereas innovation falls when the country is a regulatory follower.

1 Introduction

Il est communément admis que le renforcement des réglementations environnementales stimule l'innovation. Ce point de vue repose sur un raisonnement théorique simple : se conformer à une réglementation plus stricte génère des coûts supplémentaires pour la respecter, ce qui incite à innover pour les réduire. Depuis les années 90, de nombreux travaux empiriques ont obtenu des résultats en cohérence avec cet argument (par exemple, Aghion et al. 2014, Jaffe and Palmer 1997; Brunnermeier and Cohen 2003; Newell et al. 1999; Popp 2002; Crabb and Johnson 2010; Johnstone et al. 2010).

Nous développons un modèle dynamique simple de réglementation environnementale dans l'industrie automobile qui contredit partiellement cette affirmation. Il prédit un effet ambigu sur l'innovation et met l'accent sur l'importance du pays dans lequel intervient le changement de réglementation. Plus précisément, l'impact de la réglementation diffère lorsque le pays est un leader en matière de réglementation ou un pays qui adopte une norme précédemment mise en place ailleurs. Les résultats empiriques confirment ces prédictions. En utilisant une base de données de l'industrie automobile qui inclut 72 pays de 1992 à 2007, nous montrons que le leadership réglementaire augmente l'innovation tandis que l'innovation baisse lorsque le pays rattrape en adoptant des réglementations déjà en place dans d'autres pays.

Si le premier résultat est conforme aux attentes, le second est très contre-intuitif : les analyses générales (par exemple, Porter et van der Linde, 1995) prédisent bien un effet moindre du changement réglementaire dans les pays suiveurs par rapport aux leaders. Mais ils ne prédisent pas un effet *néгатif*. Son interprétation repose sur le fait que, dans le secteur automobile, une norme environnementale d'un niveau donné nécessite des technologies qui lui sont spécifiques. Cela signifie qu'un projet de R&D donné ne réduit que le coût de respecter la norme pour laquelle il a été mis en place, il n'aide à respecter ni une norme moins stricte ni une norme plus stricte. L'évolution des normes suscite donc un processus de destruction créatrice puisque la nouvelle norme rend obsolètes les technologies développées pour les normes antérieures. Comme il y a destruction, le changement réglementaire peut diminuer l'innovation en détruisant le stock de connaissances à partir duquel elle est générée.

Pour expliquer ces résultats, il est nécessaire de présenter brièvement le rôle des normes d'émission dans l'industrie automobile. Ces normes imposent des limites aux émissions de gaz d'échappement des nouveaux véhicules. Elles existent dans la plupart des pays (par exemple, l'Union européenne, le Japon, la Corée, la Chine et les Etats-Unis) et elles sont continuellement renforcées. A titre d'illustration, la norme « Euro 1 » a été mise en place dans l'Union européenne en juillet 1992. Elle limitait les émissions de CO à 2,72 g/km. Elle a ensuite été remplacée par la norme « Euro 2 » en janvier 1996 qui a diminué la valeur limite à 1,0g/km, puis par « Euro 3 » en 2000. Des révisions supplémentaires ont été mises en place dans les années 2000 et la norme actuelle est « Euro 6 » qui requiert une émission inférieure à 0,5 g/km depuis 2014.

Il est important de noter que la sévérité réglementaire de ces normes peut être comparée entre les pays car elles ciblent les mêmes polluants (CO, particules fines, NOx...). Il est donc possible de classer les pays en distinguant des leaders réglementaires et des suiveurs. Nos données montrent ainsi que les Etats-Unis ont eu tendance à mener la course à la législation dans les années 90 et à la fin des années 2000 alors que l'Union européenne et le Japon avaient des réglementations plus strictes entre ces deux périodes (voir aussi Dechezleprêtre et al. 2015).

Nous pouvons maintenant expliquer l'intuition sous tendant nos résultats. Le fait que la dynamique de l'innovation soit différente selon que la réglementation est adoptée par un pays précurseur dans la course à la législation ou par des suiveurs est déterminé par deux hypothèses fondamentales qui sont susceptibles d'être valides dans de nombreuses industries et pour beaucoup de réglementations environnementales. La première est qu'une norme d'un niveau donné nécessite des technologies qui lui sont spécifiques (Dronniou, 2014). Cela signifie qu'un projet de R&D donné ne réduit que le coût de respecter la norme pour laquelle il a été mis en place, il n'aide à respecter ni une norme moins stricte ni une norme plus stricte. L'évolution des normes suscite donc un processus de destruction créatrice puisque la nouvelle norme rend obsolètes les technologies développées pour les normes antérieures. Comme il y a destruction, le changement réglementaire peut diminuer l'innovation en détruisant le stock de connaissances à partir duquel elle est générée. La seconde hypothèse est que les véhicules sont l'objet d'un commerce international. Ainsi, les innovateurs ne répondent

pas seulement à des modifications de réglementation intervenant dans leur pays, mais aussi à des évolutions à l'étranger.¹

Ces deux propriétés impliquent des ajustements différents lorsqu'un pays leader met en place une nouvelle norme ou lorsqu'un pays suiveur rattrape son retard. Lorsqu'un leader renforce sa réglementation, les innovateurs commencent à développer un ensemble de nouvelles technologies pour la nouvelle norme, mais ils continuent à améliorer les anciennes puisqu'elles restent en vigueur à l'étranger. Ceci peut induire plus d'innovation pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les innovateurs innovent plus lorsqu'une technologie est nouvelle car l'impact marginal des dépenses de R&D diminuant, commencer avec une nouvelle technologie signifie un bénéfice marginal de l'innovation plus élevé. Ce bénéfice est aussi élevé parce que la durée de vie de la nouvelle norme est supérieure à celles des normes antérieures qui sont toujours en vigueur. L'innovation sera donc rentabilisée plus longtemps. Cependant, au moment où le pays leader adopte la nouvelle norme, les innovateurs diminuent l'innovation liée aux normes précédentes puisque leurs durées de vie résiduelles sont plus courtes et que leur marché diminue. L'effet global sur l'innovation est donc incertain contrairement à la prédiction habituelle de la littérature.

Le fait d'observer des tendances divergentes lors de l'adoption d'une norme par un suiveur n'est pas surprenant puisqu'il correspond au cas symétrique du précédent : les innovateurs cessent d'innover sur l'ancienne technologie et concentrent leurs efforts sur la nouvelle.

Comme souligné ci-dessus, les travaux existants trouvent généralement un impact positif sur l'innovation. Est-il possible de réconcilier ces résultats avec les nôtres ? Certaines de ces études ne sont pas directement comparables puisqu'elles traitent de l'impact des prix de l'énergie sur l'innovation alors que nous analysons les normes réglementaires relatives à des produits (Aghion et al. 2014; Newell et al., 1999; Popp, 2002). D'autres examinent l'impact de réglementations limitant les émissions au stade de la production puisqu'ils utilisent le niveau de réduction de la pollution et les dépenses de contrôle comme une mesure de la rigueur réglementaire (Jaffe and Palmer 1997; Brunnermeier

¹ Les raisonnements que nous allons développer s'applique directement à l'innovation des entreprises, moins à la recherche publique. Cette dernière est toutefois marginale dans le secteur automobile. En 2007, une étude du consortium EAGAR l'estimait à 1,14% des dépenses totales de R&D.

and Cohen 2003). Or notre rapport examine des normes qui régulent des caractéristiques de produits. Enfin, les dernières études comme celle de Johnstone et al. (2010) utilisent des données de plusieurs pays et analysent des réglementations qui concernent les produits, mais ils s'intéressent à l'impact moyen de la réglementation sur l'innovation, sans examiner les différences entre pays leaders et retardataires.

Nos résultats font écho aussi à la littérature qui s'est développée suite à l'article de Porter et van der Linde (1995) sur les liens entre réglementation environnementale et compétitivité. Dans leur papier, la thèse principale est que, bien que le leadership réglementaire d'un pays induise des coûts plus élevés à court-terme pour les entreprises nationales², cela stimule aussi l'innovation verte qui pourrait générer des retombées économiques positives à long-terme en leur donnant un avantage compétitif par rapport aux entreprises étrangères qui seront bientôt contraintes par la même réglementation. Notre analyse donne des résultats conformes à la première partie de cette analyse : le leadership réglementaire induit plus d'innovation. Mais nous ne nous intéressons pas à la seconde partie, qui est de déterminer si l'innovation supplémentaire implique une meilleure performance économique.

La suite de ce rapport est structurée de la façon suivante : dans la prochaine partie, nous présentons le modèle. La partie 3 décrit les données utilisées pour l'analyse empirique. Les résultats économétriques sont présentés dans les parties 4 et 5. La partie 6 résume nos résultats.

2 Une brève présentation du secteur automobile

Le secteur automobile est une industrie d'assemblage multinationale où les composants, les systèmes et les modules sont produits et assemblés dans plusieurs pays (Dicken, 2011). Au sommet de ce que Pavlínekt et Ženka (2009) caractérisent comme un réseau régi par les producteurs se trouvent de grandes entreprises d'assemblage (c.-à-d. des producteurs finaux) qui exercent un pouvoir et un contrôle considérables sur la chaîne logistique. Un nombre relativement faible de producteurs finaux multinationaux

² Il peut exister des cas où le renforcement de la norme diminue les coûts de production si elle induit par exemple des innovations drastiques. Ces cas restent a priori exceptionnels (Dronniou, 2014).

européens, japonais, américains et sud-coréens dominent l'industrie au niveau mondial. Ces entreprises ont l'habitude d'organiser la production au niveau régional afin de fournir de gros marchés – avec une tendance des producteurs à implanter des usines d'assemblage dans des économies en développement ou en transition avec des coûts de production plus faibles (Sturgeon and Van Biesebroeck 2010). La dernière décennie a aussi été le témoin de la croissance phénoménale des constructeurs chinois, beaucoup d'entre eux travaillant avec divers partenaires étrangers, où s'appuyant considérablement sur l'acquisition de technologies étrangères grâce à des licences ou des IDE (Chin 2010). En effet, avec d'autres pays en voie d'industrialisation comme le Brésil, l'Inde et l'Afrique du Sud, la Chine a constitué une part rapidement croissante de la production automobile mondiale depuis les années 1990 (Bailey et al. 2010; Kumaraswamy et al. 2012).

Un autre ensemble crucial d'entreprises dans l'industrie automobile sont les fournisseurs dits « tier 0.5 » et « tier 1 » qui ont assumé un rôle de plus en plus important dans la production et, de plus, dans l'innovation de composants, de modules et de systèmes essentiels pour les producteurs finaux (Cabigiosu et al. 2013). La majorité des fournisseurs principaux sont eux-mêmes des multinationales et « suivent » souvent les producteurs finaux sur les marchés étrangers dans lesquels ils opèrent (Dicken 2011). Les entreprises dites « tier 0.5 » et « tier 1 » jouent également un rôle de coordination avec un grand nombre de fournisseurs dits « tier 2 » et « tier 3 » (souvent plus petits et locaux). Les composants volumineux et/ou spécialisés ont tendance à être produits à proximité des usines d'assemblage final, tandis que les autres sont achetés mondialement, y compris des pièces génériques qui peuvent être transportées rapidement (Sturgeon and Van Biesebroeck 2010).

Si l'on se tourne vers les technologies environnementales, qui concentrent une grande part de l'innovation dans l'industrie automobile (Lee and Berente 2013), le cas est très semblable. Les producteurs finaux comme les fournisseurs principaux inventent (et fabriquent) des véhicules moins polluants. Pour ces derniers, de grandes multinationales comme GM, Toyota, Volkswagen et Renault sont des acteurs majeurs, avec des dépenses de R&D conséquentes servant à réduire les émissions de gaz d'échappement (Mondt 2000; Oltra and Saint Jean 2009; Hašičič and Johnstone 2011b; OECD 2011; Berggren and Magnusson 2012). En effet, dans la mesure où la conformité à des réglementations sur

les émissions plus strictes ne peut être atteinte en installant simplement des technologies de post-combustion, les considérations environnementales sont de plus en plus intégrées aux activités de conception et d'ingénierie des moteurs. Des producteurs nationaux plus petits – y compris ceux dans les pays émergents – ont aussi été actifs sur l'innovation de véhicules moins polluants, bien qu'ils soient plus susceptibles de s'appuyer sur l'acquisition de technologies liées aux émissions venant de fabricants de véhicules multinationaux ou de fournisseurs externes (Perkins 2007; Chin 2010).

La taille des fournisseurs dans le secteur du transport « durable » est un bon indicateur de la tendance accrue des producteurs finaux à sous-traiter la conception (et la production) de pièces, systèmes et modules majeurs à des entreprises externes. Les entreprises « tier 0.5 » et « tier 1 » comme Delphi Automotive qui fournissent une large gamme de produits (c.-à-d. l'électronique de sûreté, des systèmes de contrôle de la température, etc.) sont aussi impliqués dans les technologies de contrôle des émissions. De plus, les fournisseurs externes ont vu leur importance augmenter dans le secteur du transport durable car beaucoup des compétences requises pour améliorer les performances environnementales des véhicules se trouvaient dans un éventail d'autres secteurs tels que la chimie et l'électronique (Geffen and Rothenberg 2000; Lee et al. 2011; Hall and Kerr 2003). Dans le cas des convertisseurs catalytiques, les entreprises du secteur chimique comme Johnson Matthey ont joué un rôle crucial en fournissant une expertise et des aptitudes au monde automobile requises pour respecter des normes d'émissions ambitieuses (Mondt 2000; Tao et al. 2010).

La grande majorité des nouveaux véhicules moins polluants est développée dans une poignée de pays industrialisés (Oltra and Saint Jean 2009; Hašič and Johnstone 2011b). L'Allemagne, le Japon et les Etats-Unis représentent la majorité des innovations, la France et le Royaume-Uni étant aussi des sources importantes. Plusieurs facteurs expliquent cette concentration. Le premier est que les installations de R&D – à la fois celles des producteurs finaux et des fournisseurs impliqués dans l'éco-mobilité et dans les autres technologies automobiles – ont eu tendance à se développer à proximité des pays où se situent les géants traditionnels de l'automobile. De plus, en tirant profit des connaissances accumulées dans des clusters déjà établis et en voulant protéger leurs technologies, les majors de l'automobile et les fournisseurs principaux ont continué à héberger les activités de R&D à ces endroits, bien qu'ils aient considérablement étendu

leurs activités ailleurs (Pavlínek 2012; Sturgeon and Van Biesebroeck 2010; The Economist 2013). Un autre facteur ayant contribué à la domination de certains pays dans les véhicules innovants est la réglementation environnementale. Les Etats-Unis ont historiquement montré la voie dans l'adoption des normes d'émission les plus strictes du monde dans les années 1970 et 1980 (Gerard and Lave 2005; Bauner 2007). Ceci a stimulé l'innovation américaine dans les technologies environnementales – ainsi que l'innovation dans les économies pour lesquelles les Etats-Unis étaient un marché d'exportation majeur, comme l'Allemagne, le Japon, la Suède et le Royaume-Uni (Boehmer-Christiansen and Weidner 1995; Tao et al. 2010). Dans les années 1990 et 2000, ces pays sont eux-mêmes devenus des précurseurs réglementaires, avec une activité innovante dans les technologies environnementales s'appuyant sur des efforts antérieurs pour atteindre la conformité vis-à-vis de la législation.

Cependant, malgré la domination de certains pays développés, il y a une tendance croissante à l'innovation dans l'automobile hors du « cœur » historique – y compris dans de grands pays en voie d'industrialisation à forte croissance. Ceci découle en partie de la décision stratégique des producteurs multinationaux et des principaux fournisseurs d'établir des centres de conception et d'ingénierie proches des marchés d'envergure où ils ont des équipements de production/assemblage conséquents. Cela est aussi le résultat d'efforts de R&D croissants de la part d'entreprises nationales. Cette innovation est principalement incrémentale et vise à améliorer et à ajuster les systèmes de motorisation en travaillant sur les pièces. Elle a pour but de s'adapter aux particularités des marchés intérieurs, comme la qualité de l'essence ou les préférences du consommateur (Chin 2010; Sturgeon and Van Biesebroeck 2010; Pavlínek 2012). Plus récemment, cependant, on constate une activité innovante plus importante en dehors du cœur traditionnel orientée vers le développement de nouveaux produits et designs contribuant à la baisse des émissions (voir par exemple Lema et al. 2012).

Le transfert international de technologies est une caractéristique clé de l'industrie automobile. C'est la conséquence d'un échange « interne », puisque les technologies naviguent d'un bout à l'autre des réseaux régionaux, voire mondiaux, des producteurs et fournisseurs multinationaux, ainsi qu'entre différentes entreprises qui se lancent dans des joint-ventures et des alliances de partage de technologies (Bailey et al. 2013; The Economist, 2013). En fait, à cause de l'importance des économies d'échelle pour la

compétitivité, les fabricants « partagent » typiquement les pièces, les systèmes, les plateformes et les designs sur les différents marchés dans lesquels ils opèrent. De plus, un transfert de technologies a lieu lorsqu'une technologie automobile inventée dans un pays est vendue à des entreprises ou à des consommateurs finaux dans d'autres pays, à la fois sous forme matérielle (à travers l'importation de composants, de véhicules entièrement montés, etc.) et sous forme immatérielle (à travers des licences technologiques, des services de conseil, etc.) (Mikler 2009; Kumaraswamy et al. 2012).

Une part importante de ces transferts concerne les technologies environnementales. De nombreuses technologies ayant pour but de réduire les émissions de gaz d'échappement requièrent beaucoup de R&D, ce qui implique que les innovateurs veuillent amortir les coûts sur un grand nombre d'unités vendues. De plus, dans la mesure où il y a des économies d'échelle considérables dans la fabrication des systèmes, modules et composants de motorisation et de post-traitement, il y a des incitations économiques fortes à utiliser des technologies similaires pour des produits fabriqués et/ou vendus dans différents marchés (Bauner 2007; The Economist 2013). En effet, associées à une compétition intense sur les prix, ces réalités économiques signifient que les producteurs finaux utilisent invariablement la même technologie de motorisation dans plusieurs pays où ils vendent un modèle particulier (Perkins 2007).

Le revers de la médaille de la compétition à laquelle se livrent les principaux constructeurs est que les technologies servant à diminuer les émissions installées dans les véhicules vont souvent être adaptées aux conditions des marchés dans lesquels ils sont vendus. Un facteur critique dans cette optique est la rigueur des réglementations nationales pour les émissions. Une raison importante pour laquelle les fabricants de véhicules multinationaux ne déploient pas simplement la même configuration de motorisation et de technologie post-traitement pour respecter les normes les plus exigeantes au niveau mondial, est que les technologies les plus sophistiquées pour diminuer les émissions sont plus chères. Toutes choses égales par ailleurs, un véhicule capable de respecter des normes d'émission plus strictes va être plus cher à produire et sera alors plus onéreux pour les consommateurs finaux. Ainsi, les fabricants de véhicules conçoivent des véhicules selon les normes locales du marchés dans lesquels ils sont vendus, bien que des variantes du même modèle puissent être vendues dans d'autres

marchés adaptés à des normes d'émission plus faibles/ plus élevées (Bauner 2007; Gallagher 2006; Perkins 2007).

Les différences de normes environnementales ne sont pas les seules causes des variations de technologies automobiles sur les marchés. Les préférences des consommateurs locaux, en termes de caractéristiques telles que l'efficacité énergétique ou l'accélération, en sont une autre, même si des modifications considérables des véhicules pour s'adapter à ces préférences sont seulement viables pour les plus gros marchés (Perkins 2007; Chin 2010; The Economist 2013). Le pouvoir d'achat est un autre facteur : dans certains marchés, les consommateurs ont plus de moyens pour acheter des véhicules chers et sophistiqués que dans d'autres. En outre, la disponibilité locale d'essence de bonne qualité peut aussi avoir une influence sur le choix technologique dans la mesure où les technologies de motorisation et post-traitement avancées exigent une certaine qualité de pétrole/diesel pour bien fonctionner. Les considérations ci-dessus sont un facteur qui soutient la décision stratégique des fabricants de véhicules de poursuivre des stratégies de production régionale, en déployant des variantes spécifiques de modèles dans des marchés similaires (Dicken 2011; Sturgeon and Van Biesebroeck 2010).

Une conséquence de ces stratégies est que les véhicules les moins polluants, dont la plupart ont été développés dans des économies développées où les normes sont strictes, sont destinés à d'autres pays développés dont les normes sont également strictes. Ceci est dû au fait que de telles technologies sont mieux adaptées aux exigences environnementales, aux préférences des consommateurs et à leur pouvoir d'achat. En outre, certains producteurs peuvent se montrer réticents à transférer les dernières technologies environnementales à quelques marchés émergents/pays en développement à cause d'inquiétudes au sujet de la propriété intellectuelle (Gallagher 2006).

Réciproquement, les véhicules récemment inventés dans des pays avec des réglementations plus souples sont plus susceptibles de se retrouver dans d'autres pays avec des réglementations souples. Ces pays innovants avec peu de réglementation sont majoritairement des économies émergentes ou en transition avec des capacités de production de voitures ou de fabrication de pièces importantes. Ici, le gros des efforts d'innovation se fera à travers des améliorations progressives afin d'adapter la

technologie aux exigences locales et à celles d'autres marchés émergents à l'export (Bauner 2007).

Il y a cependant de nombreuses exceptions. Certaines technologies environnementales (par exemple des capteurs pour l'injection d'essence contrôlée électroniquement) développées dans des pays à faible régulation sont destinées à répondre aux standards d'autres pays plus rigoureux. Les systèmes de technologies environnementales les plus avancées sont parfois transférés de pays innovants à forte réglementation à des pays moins stricts où ils sont fabriqués ou assemblés pour être exportés dans des pays à forte réglementation. En outre, les véhicules vendus dans des pays à réglementation souple vont inévitablement incorporer des technologies (par exemple des moteurs) qui furent à l'origine développées dans des pays à forte réglementation, bien que mises à jour au cours du temps. De plus, le transfert de technologies peut se faire de pays à forte réglementation à des pays à faible réglementation où se sont établis des consultants en ingénierie afin d'aider les entreprises à respecter des normes réglementaires (Chin 2010; Sturgeon and Van Biesebroeck 2010). Cependant, il est nécessaire de souligner que la tendance prédominante est le transfert des technologies automobiles environnementales récemment développées entre des pays qui ont des normes d'émission similaires, plutôt qu'entre des pays avec des normes différentes.

Le secteur automobile offre plusieurs avantages analytiques en tant qu'étude de cas pour confirmer nos hypothèses. D'abord, un grand nombre de pays a adopté des normes concernant les émissions de gaz d'échappement, avec des variations significatives selon le pays au cours de notre étude (Beise and Rennings 2005). Le secteur se prête alors bien à la vérification de nos hypothèses en se concentrant sur la dichotomie entre précurseurs et suiveurs réglementaires. Deuxièmement, la mise en conformité avec les normes d'émission de gaz d'échappement est largement atteinte grâce à des technologies de motorisation et de post-traitement, ce qui nous permet d'examiner à quel point la réglementation stimule l'innovation à travers le système de brevets (Haščič et al. 2009; Perkins 2007; Gallagher 2006; Lee and Berente 2013). Une troisième caractéristique proéminente est le rôle clé du brevet dans le secteur automobile. Ceci reflète l'importance de la protection de la propriété intellectuelle vis-à-vis des concurrents ainsi que l'accréditation des technologies (Kumaraswamy et al. 2012) et les

flux denses de technologies entre producteurs finaux et fournisseurs dans différents endroits de leurs réseaux régionaux et/ou mondiaux.

3 Le modèle

3.1 Hypothèses

Nous proposons un modèle dynamique avec deux pays symétriques qui se différencient seulement sur les dates de modification des réglementations nationales. Considérons un instant T . Nous supposons qu'un pays noté L (pour leader) passe d'une norme $s - 1$ à une norme s plus stricte à la date T qui va être maintenue jusqu'à $T + 2$. L'autre pays noté F suit en adoptant la même norme au temps $T+1$ pour deux intervalles de temps. Puis le pays L adopte une nouvelle norme $s+1$ à $T+2$, et ainsi de suite.

Dans chaque pays, une entreprise produit des voitures qui sont vendues dans le pays et à l'étranger. Les indices L et F vont aussi identifier les deux fabricants de voitures. Un véhicule qui respecte la nouvelle norme est plus cher à produire qu'un véhicule respectant l'ancienne. Plus spécifiquement, on suppose que respecter la norme augmente le coût unitaire de fabrication d'une quantité C° . Ce coût peut être réduit avec l'innovation. Plus précisément, le coût de conformité à la norme de la firme L après l'innovation est

$$C_T = C^\circ - \sum_{k=0}^T b(q_{t-k}^s)$$

avec q_t^s qui est une mesure de l'innovation liée à la norme s faite par la firme L à la

période t . Soit \hat{C}_T la même fonction pour la firme F . Dans la partie empirique du

rapport, on utilisera des brevets pour construire une estimation de q_t^s . Nous

reviendrons en détail sur ceci lors de la description de la stratégie empirique. On impose que $b(0) = 0$, $b' > 0$ et que les bénéfices marginaux de l'innovation sont décroissants, $b'' < 0$.

De plus, on suppose que C° est suffisamment grand de façon à ce que C_T soit

toujours positif : l'innovation ne peut pas annuler le coût de conformité même avec de grands efforts d'innovation.

S'appuyant sur Blundell et al. (1995, 2002) et sur d'autres, nous supposons que l'innovation est égale à la quantité de connaissance. Nous prenons l'hypothèse standard que cette quantité est une somme pondérée des dépenses liées à la recherche passées et présentes. Les expressions des innovations des entreprises L et F sont respectivement :

$$q_T^s = \sum_{k=0}^t \mu^k r_{t-k}^s \quad (1)$$

$$\dot{q}_T^s = \sum_{k=0}^t \mu^k \dot{r}_{t-k}^s \quad (2)$$

r_{t-k}^s est le niveau de dépenses de R&D à $t - k$ faites par la firme L. \dot{r}_{t-k}^s représente les dépenses de recherche de la firme F. Le paramètre μ reflète l'obsolescence de la connaissance ($\mu \leq 1$). Ensuite, nous introduisons l'hypothèse cruciale que l'innovation est spécifique à chaque norme. Nous voulons dire ici que \dot{q}_T^s ne fait que diminuer le coût de conformité à la norme s . Ainsi, l'innovation vaut zéro avant T puisque les entreprises n'ont pas de raison de faire de la recherche en avance ($r_t^s = 0$ et alors $\dot{q}_T^s = 0$ si $t < T$). De façon symétrique, une fois que le pays F est passé à la nouvelle norme à $t \geq T + 3$, on a aussi $\dot{r}_t^s = 0$. Ce qui compte est simplement l'innovation faite entre T et $T+2$.

Le fait que l'innovation soit spécifique à la norme s simplifie l'analyse de deux façons. D'abord, les décisions d'innovation pour chaque norme sont totalement indépendantes et peuvent alors être analysées séparément. Ensuite, le processus est stationnaire : ce qui se passe à l'équilibre au temps T lorsque s est en vigueur dans le pays L est exactement ce qui se passera pour la norme $s+1$ à $T+2$; le résultat est le même pour s et $s+1$ à $T+1$ et à $T+3$, et ainsi de suite. Nous pouvons donc centrer l'analyse sur l'intervalle de temps entre T et $T+2$.

Décrivons maintenant le marché automobile. Nous considérons un scénario où le marché est global de telle sorte que chaque firme vende $N/2$ voitures dans son pays d'origine et $N/2$ à l'étranger. Les ventes sont constantes au cours du temps, ce qui signifie que les changements de réglementation n'ont pas d'incidence sur les parts de marché. Ils impactent uniquement les coûts de fabrication à travers les coûts de conformité aux normes. Ceci aura pour conséquence que les profits liés à l'innovation sont proportionnels aux ventes.

Avec ces hypothèses, nous éliminons les effets stratégiques du marché. Comme la valeur de N est qualitativement impertinente, nous supposons à partir de maintenant que $N=1$ pour simplifier les notations. Nous pouvons donner les tailles de marché pour les voitures qui respectent une norme s à plusieurs instants :

- En période T quand la norme a seulement été adoptée dans le pays L , la taille de marché est $\frac{1}{2}$ pour l'entreprise L et pour l'entreprise F .
- En période $T+1$ lorsque la norme est en vigueur dans les deux pays, la taille du marché vaut 1 pour les deux entreprises.
- En période $T+2$ lorsque le pays précurseur est passé à la norme plus stricte $s+1$, la taille du marché est $\frac{1}{2}$ pour L et F .

3.2 Analyse de l'équilibre

Nous pouvons maintenant analyser la décision d'innovation de la firme L par rapport à la norme s . Pour simplifier les notations, nous ignorons l'indice de la norme à ce moment de l'analyse. On choisit les flux de dépenses de recherche r_T , r_{T+1} et r_{T+2} qui maximisent le profit lié à l'innovation restant :

$$\Gamma \equiv \frac{1}{2}b(q_T) + \delta [b(q_T) + b(q_{T+1})] + \frac{1}{2}\delta^2 [b(q_T) + b(q_{T+1}) + b(q_{T+2})] - \sum_{k=0}^2 \delta^k r_{T+k}$$

où δ est le taux d'actualisation ($0 < \delta < 1$). En supposant des solutions intérieures, à l'équilibre les dépenses liées à la recherche satisfont aux trois conditions de premier ordre suivantes :

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial r_T} = \left(\frac{1}{2} + \delta + \frac{1}{2}\delta^2 \right) b'(q_T) + (\delta\mu) \left(\frac{1}{2} + \delta \right) b'(q_{T+1}) + \frac{1}{2}(\delta\mu)^2 b'(q_{T+2}) - 1 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial r_{T+1}} = \left(\frac{1}{2} + \delta\right) b'(q_{T+1}) + \frac{1}{2}(\delta \mu) b'(q_{T+2}) - 1 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial r_{T+2}} = \frac{1}{2} b'(q_{T+2}) - 1 = 0 \quad (5)$$

Il est intéressant de noter que Γ est concave par rapport à toutes ses variables (puisque b est concave et les coûts de recherche sont linéaires). Nous devons juste introduire

l'hypothèse que $\frac{\partial \Gamma}{\partial r_{T+2}} > 0$ dans le cas où $r_{T+2} = 0$, ce qui équivaut à $b'(0)/2 - 1 > 0$,

pour assurer l'existence et de l'unicité des solutions intérieures. Cette hypothèse signifie essentiellement que le profit marginal de l'innovation est toujours assez élevé pour induire des dépenses de recherche strictement positives à l'équilibre.

En remplaçant (5) dans (4) et ensuite dans (3), on obtient

$$b'(q_T) = \frac{1 - \delta\mu}{\frac{1}{2} + \delta + \frac{1}{2}\delta^2} \quad (6)$$

$$b'(q_{T+1}) = \frac{1 - \delta\mu}{\frac{1}{2} + \delta} \quad (7)$$

$$b'(q_{T+2}) = 2 \quad (8)$$

Le niveau d'innovation de la firme F est le même puisque la firme maximise également la fonction Γ . Nous sommes maintenant capables de classer les niveaux d'innovation par période.

Lemme 1 1) $q_T > q_{T+1}$ si $\delta > \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2}$; 2) $q_{T+1} > q_{T+2}$; 3) $q_T > q_{T+2}$.

Démonstration. 1) $q_T > q_{T+1}$ découle directement de la concavité de b et du fait que $b'(q_T)$

$$b'(q_{T+1}) \Leftrightarrow \delta > \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2} . 2) \text{ Parce que } 2 > \frac{1-\delta\mu}{\frac{1}{2}+\delta} ; 3) \text{ Evident car } \frac{1-\delta\mu}{\frac{1}{2}+\delta} + \frac{1}{2}\delta^2 < 2.$$

Ces résultats sont déterminés par plusieurs facteurs. Une première cause évidente est l'actualisation qui crée des incitations à retarder l'innovation. Une autre est l'évolution de la taille de marché en fonction du temps. En particulier, le plus gros marché est observé à l'instant $T+1$ quand les deux pays mettent en place s alors que le marché est plus gros à T qu'à $T+2$ pour le précurseur. Le terme $\delta\mu$ rend visible un troisième facteur : le fait que la recherche simultanée augmente la quantité de connaissance, et donc l'innovation à venir. Ceci incite à faire plus de recherche aux périodes initiales T et $T+1$. A l'inverse, l'incitation disparaît à $T+2$ puisque la quantité future devient inutile à la fin de la période. Un dernier facteur stimule aussi l'innovation antérieure : le fait que les profits liés à l'innovation persistent lors des périodes futures.

Ces facteurs font que q_{T+2} est plus faible que l'innovation aux périodes précédentes parce que le marché pour l'innovation est à sa taille minimale et le profit futur lié à l'innovation vaut zéro. L'ambiguïté du classement entre q_T et q_{T+1} provient du compromis entre l'actualisation – un facteur d'actualisation δ élevé donne plus de poids aux profits futurs et stimule ainsi l'innovation antérieure – et une taille de marché qui est plus grande à $T+2$.

3.3 Innovation totale

Jusqu'à maintenant nous avons seulement caractérisé les innovations à l'équilibre par rapport à la norme s . Mais cette norme coexiste avec une norme $s-1$ à la période T et une norme $s+1$ à $T+2$. Les efforts d'innovation pour être en conformité avec les autres normes à ces deux instants ont donc besoin d'être intégrés au calcul de l'innovation totale. La stationnarité simplifie considérablement cette analyse. Pour commencer, nous avons juste besoin de considérer deux instants : T quand les pays mettent en place deux normes différentes et $T+1$ lorsqu'ils font de même. $T+2$ est équivalent à T hormis le fait qu'il décrit la vague de réglementation suivante.

Soit Q_t l'innovation totale de la firme L au temps t. Nous sommes d'abord intéressés par le signe de $\Delta Q_T = Q_T - Q_{T-1}$. C'est-à-dire, de savoir si l'innovation augmente lorsque le pays

L met en place une norme plus stricte. On a $Q_T = q_T^s + q_T^{s-1}$. La stationnarité implique

alors que $q_T^{s-1} = q_{T+2}^s$ alors que $Q_{T+1} \equiv q_{T+1}$.

Ainsi, nous devons nous intéresser au signe de :

$$\Delta Q_T = q_T + q_{T+2} - q_{T+1}$$

où q_T , q_{T+2} et q_{T+1} sont implicitement définis par (6), (7), (8). D'après le Lemme 1, il est

immédiat que $\Delta Q_T > 0$ si $\delta > \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2}$ puisque nous avons $q_T > q_{T+1}$ dans ce cas.

L'analyse est plus complexe quand $\delta < \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2}$. En fait, on peut avoir $\Delta Q_T < 0$. C'est par

exemple vrai lorsque b est une fonction quadratique et que $b'(0) = 2.3$

Il s'agit alors de chercher à connaître l'influence de la valeur des paramètres sur cette différence. Pour faciliter la comparaison on suppose à partir de maintenant :

Hypothèse : b est une fonction quadratique telle que $b'(q) = b'(0) - aq$ avec $a > 0$.

Sous cette hypothèse, le signe de ΔQ_T est celui de

$$\Omega(\alpha, \delta, \mu) = b'(0) - b'(q_{T+2}) - b'(q_T) + b'(q_{T+1})$$

Dans ce cas, il est immédiat que Ω croît avec $b'(0)$. Il croît aussi avec μ dans le cas où le

signe de Ω est ambigu ($\delta < \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2}$). Nous avons alors

$$\frac{d\Omega}{d\delta} = \frac{\mu}{1-\delta\mu} (b'(q_{T+1}) - b'(q_T)) + (1-\delta\mu) \left((1+\delta)[b'(q_T)]^2 - \frac{1}{2}[b'(q_{T+1})]^2 \right)$$

qui est positif lorsque $\delta < \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2}$. Finalement nous avons :

$$\frac{d\Omega}{d\alpha} = (1 - \delta\mu) \left(\frac{(1 - \delta^2)}{\left(\frac{1}{2} + \delta + \frac{1}{2}\delta^2\right)^2} + \frac{\delta}{\left(\frac{1}{2} + \delta\right)^2} \right) - 4$$

Les simulations montrent alors que cette expression est négative quel que soit δ dans le cas où $\mu = 0$, ce qui est une condition suffisante pour avoir $d\Omega/d\alpha > 0$.

Nous pouvons maintenant écrire une première proposition :

Proposition 1. Lorsque le pays L passe à une norme plus stricte, le signe de la variation d'innovation est ambigu. Il est plus susceptible d'être positif quand le profit lié à l'innovation est élevé ($b'(0)$ élevé), quand le rythme de changement de réglementation est rapide (un facteur d'actualisation δ élevé), et quand l'obsolescence technologique est limitée (un μ élevé).

Il est toujours difficile de qualifier le degré de probabilité que le changement de réglementation augmente effectivement l'innovation. Mais l'analyse suggère qu'il est en

fait élevé. Par exemple, c'est le cas dès que $\delta > \frac{1}{2}\sqrt{5} - \frac{1}{2} \approx 0.62$ quelles que soient les valeurs de μ et de $b'(0)$.

Considérons maintenant le pays F. Le raisonnement est très similaire, mais les résultats sont très différents. Le point le plus important est que le changement de législation se produit à l'instant $T+1$ dans ce pays, ce qui signifie que la variation d'innovation à considérer est maintenant

$$\Delta \dot{Q}_{T+1} = \dot{Q}_{T+1} - \dot{Q}_T$$

Comme $\dot{Q}_T = Q_t$, on a directement :

Proposition 2. Lorsqu'un pays F passe à une norme plus stricte, le signe de la variation de l'innovation est l'opposé de celui de la variation observée quand le pays L renforce sa législation. Par conséquent, il est plus probable d'être positif quand le profit lié à l'innovation est faible (un $b'(0)$ faible), quand le rythme de changement de réglementation est lent (un taux d'actualisation δ faible), et quand l'obsolescence technologique est élevée (un μ faible).

Nous allons maintenant développer une analyse empirique pour tester ces prédictions.

4 Données

4.1 Données sur la régulation des émissions du secteur automobile

Les données pour les normes environnementales régissant les émissions maximales de gaz d'échappement polluants des nouvelles voitures (à essence) sont tirées d'une base de données construite par Perkins et Neumayer (2012) et utilisée par Dechezleprêtre et al. (2014). Notre analyse couvre la période 1992-2009. La rigueur réglementaire des pays est classée sur une échelle de 1 à 5 ; le mode de classification est basé sur les normes d'émission européennes « Euro » qui ont d'abord été implémentées dans les états membres en 1992 (Euro 1) et qui ont ensuite été renforcées par à-coups (Euro 2,3, etc.). Les réglementations régissent les niveaux maximum d'émission de gaz d'échappement pour plusieurs polluants standards (comme le CO et les NOx) des nouveaux véhicules de tourisme. Alors que certains états membres (par exemple l'Allemagne) faisaient du lobby actif pour des réglementations sévères dès le début dans toute l'Union européenne, la Commission européenne a ensuite joué un rôle capital dans la révision à la hausse des normes Euro.

Un nombre non négligeable d'Etats hors de l'Union européenne qui cherchaient à s'attaquer au problème des émissions des véhicules de tourisme ont utilisé les normes Euro comme le fondement de leurs propres normes d'émission, dont de nombreux pays en développement, ce qui rend facile la comparaison des niveaux de rigueur réglementaire à travers différents pays. D'autres pays ont adopté des normes non européennes, notamment le Japon et les Etats-Unis, ainsi qu'un ensemble de pays qui ont adopté des variantes des normes de ces deux constructeurs automobiles majeurs. Dans

ces cas, la rigueur réglementaire est traduite en équivalent-norme Euro, voir Perkins et Neumayer (2012) pour plus de détails.

Pour une année donnée, les pays sont notés 0 s'ils n'ont pas de normes d'émission nationales en vigueur pour les nouveaux véhicules, ou si les normes sont moins strictes que l'équivalent d'Euro 1. Les pays où Euro 1 ou son équivalent s'applique sont notés 1, et ainsi de suite, avec 5 pour les pays ayant implémenté l'équivalent de la norme Euro 5. Comme montré respectivement dans les Figures 1 et 2, notre période d'analyse est caractérisée par un renforcement de la réglementation pour les normes d'émissions à la fois dans les pays développés (OCDE) et les pays en développement (hors OCDE). Comme l'on pouvait s'y attendre, les pays développés ont été des précurseurs en termes de réglementation, alors que les pays en développement ont été en retard.

Si on regarde dans le détail l'adoption des normes à travers le monde entre 1992 et 2009 (Figures 3 et 4), on s'aperçoit que le Japon était le leader réglementaire au début des années 1990, avant que l'Europe joue ce rôle puis les Etats-Unis. En 2006, le Japon était à nouveau le premier pays dans le monde à adopter l'équivalent de la norme Euro 4. On voit donc qu'il y a une variation à la fois dans le temps et dans l'espace dans l'adoption des normes les plus ambitieuses au niveau mondial que l'analyse empirique peut exploiter dans la partie suivante.

Figure 1. Nombre de pays membres de l'OCDE adoptant les normes Euro entre 1992 et 2007

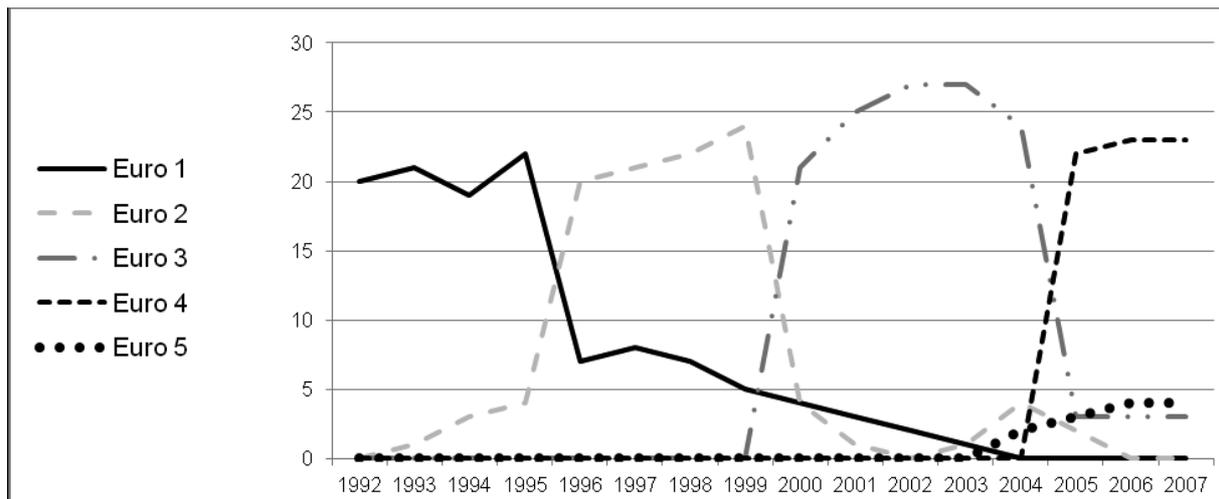


Figure 2. Nombre de pays hors OCDE adoptant les normes Euro entre 1992 et 2007

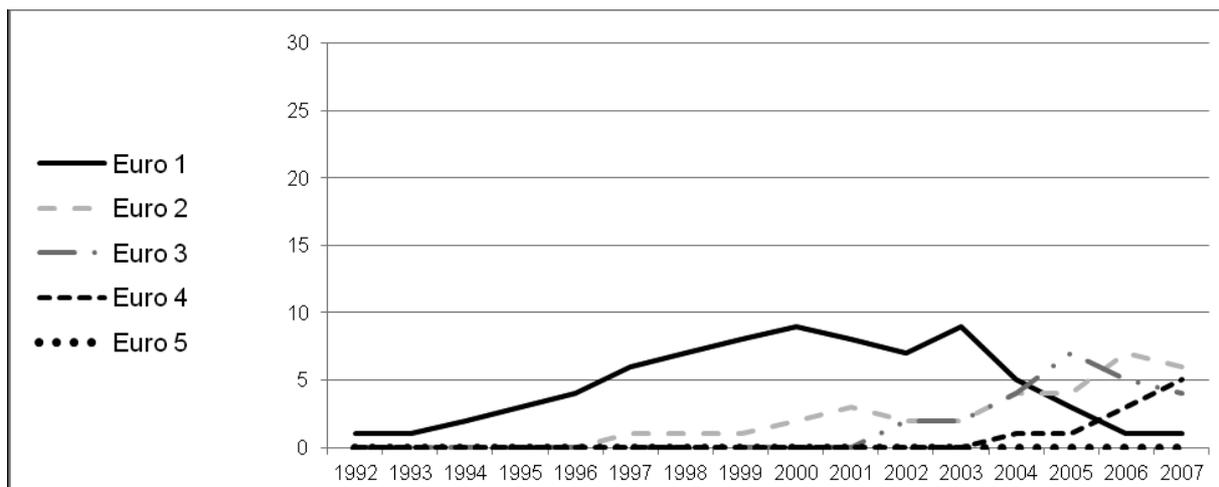


Figure 3. Pays à la pointe de la réglementation environnementale, 1992-2000

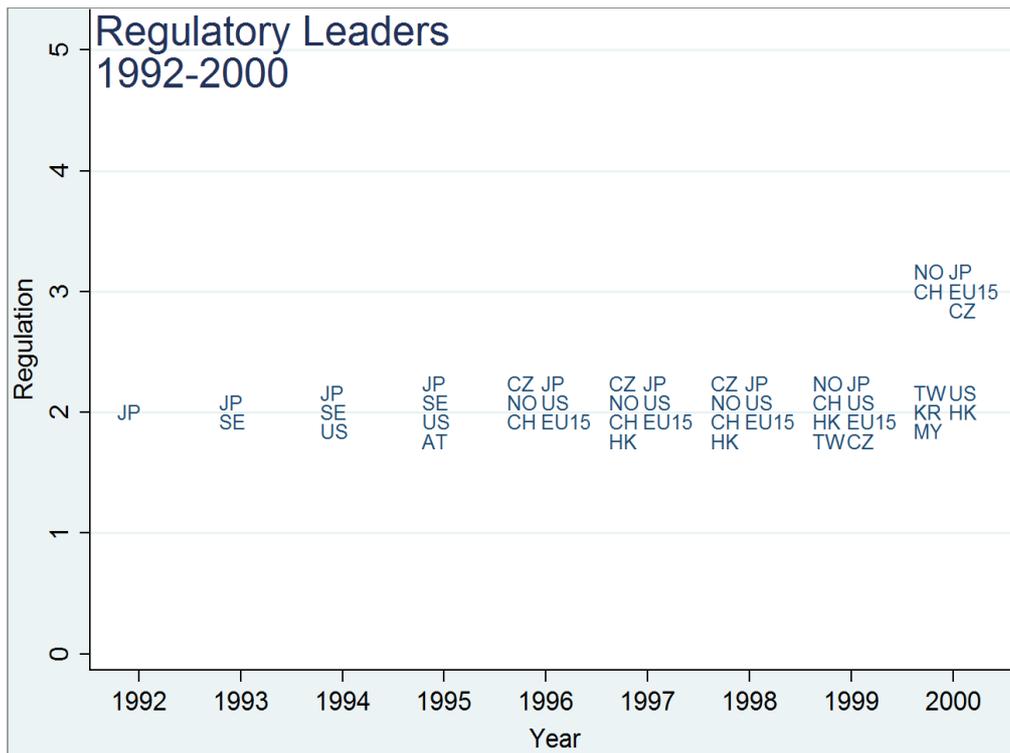
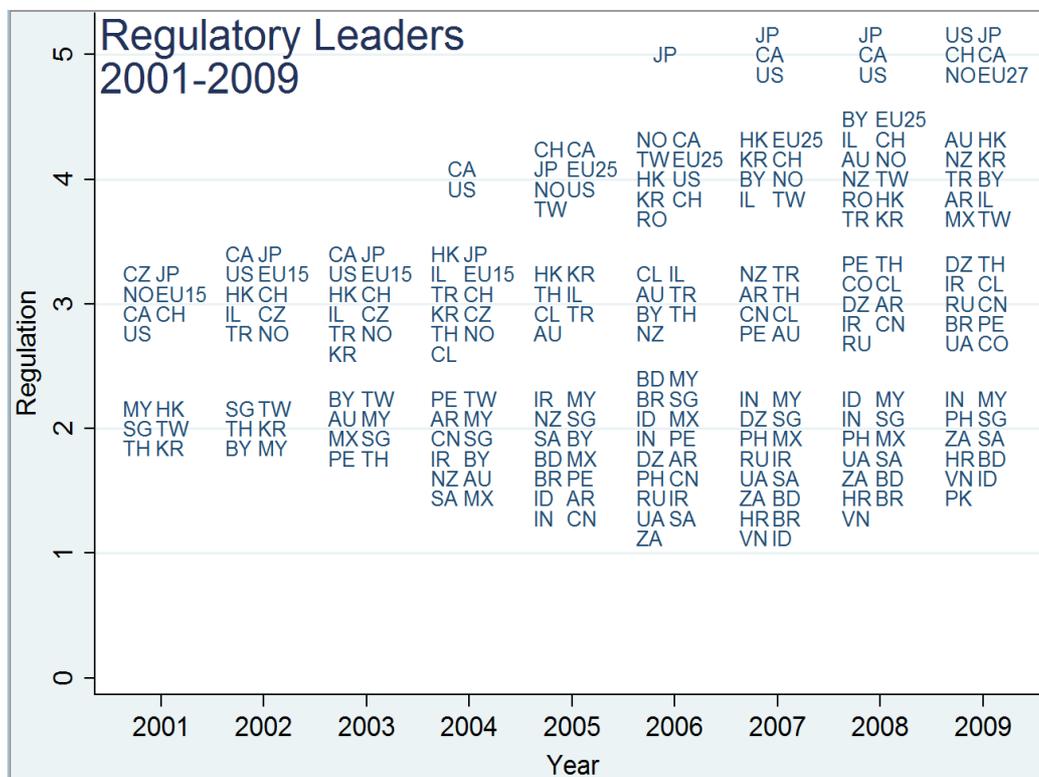


Figure 4. Pays à la pointe de la réglementation environnementale 2001-2009



4.2 Données sur les brevets

Nos données sur les brevets sont tirées de la World Patent Statistical Database, connue sous le nom de PATSAT, développée par l'Office européen des brevets (PATSAT 2013). La base de données PATSAT inclut plus de 70 millions de brevets déposés depuis le début du 19^{ème} siècle dans plus de 80 offices de brevets dans le monde. C'est la base de données sur les brevets la plus exhaustive au monde. Bien que tous les brevets déposés dans le monde n'y soient pas présents, tous les plus grands offices de brevets y apparaissent, et seuls les pays souffrant d'une faible protection de la propriété intellectuelle (et où les dépôts de brevets sont par conséquent rares) ne sont pas dans la base de données. Ainsi, nous pouvons affirmer que notre base de données couvre la plupart des brevets concernant le contrôle des émissions liées à l'automobile déposés dans le monde. L'éventuel biais d'échantillonnage lié à l'absence de quelques offices de brevets marginaux devrait donc être très limité.

Nous avons sélectionné tous les brevets déposés dans sept catégories de technologies de réduction des émissions : les appareils de mélange air-carburant ; les technologies d'injection de carburant ; les convertisseurs catalytiques et autres appareils postcombustion ; les systèmes de récupération des gaz du carter moteur ; les valves de recirculation des gaz d'échappement ; les systèmes de diagnostic embarqués ; et les capteurs d'oxygène, de NO_x et de température. Les dépôts de brevets correspondant à ces technologies ont été déterminés en utilisant les codes de la Classification internationale des brevets (CIB) identifiés par Haščič et al. (2009) et Vollebergh (2010). La liste des codes CIB utilisée dans notre analyse est fournie dans l'Annexe 1. Dans notre analyse principale, nous agrégeons toutes les technologies, mais dans les tests de sensibilité nous analysons certaines technologies individuellement.

Il est important de noter que la même invention peut être brevetée dans plusieurs pays. Ceci pourrait aboutir à un double comptage de certaines inventions. Cependant, une fois qu'une demande de brevet a été faite dans un pays, les brevets suivants relatifs à la même invention dans d'autres pays doivent désigner le brevet d'origine comme « brevet prioritaire ». L'ensemble de brevets relatifs à la même invention dans plusieurs pays est appelé une famille de brevets. Notre mesure de l'innovation est basée sur le comptage des familles de brevets. Ceci nous permet d'éviter les problèmes de double comptage.

Chaque brevet inclut des informations au sujet de l'inventeur, dont son lieu de résidence. Nous utilisons cette information pour savoir où chaque innovation a été développée, indépendamment de l'office de brevets où a été déposé le brevet.³ Par exemple, si un chercheur canadien qui travaille dans un laboratoire basé aux Etats-Unis dépose un brevet, nous considérons que cette invention est américaine.⁴ Les brevets sont pris en compte à partir de l'année de dépôt la plus ancienne au sein de la famille. Notre échantillon comporte 139 434 familles de brevets développées dans 103 pays.

Les données sur les brevets ont été amplement utilisées comme une mesure de l'innovation dans la littérature empirique récente (Popp 2002, 2006; Johnstone et al. 2010; Aghion et al., 2014). Les avantages et les limites de cette mesure sont discutés en détail dans la littérature (voir Griliches 1990, et OECD 2009 pour un aperçu).

Il y a plusieurs avantages à utiliser les brevets comme mesure de l'innovation. Tout d'abord, ils sont disponibles à un niveau très désagrégé d'un point de vue technologique. Nous pouvons repérer les innovations dans l'industrie automobile développées spécifiquement pour réduire la pollution tandis que les investissements de R&D ne peuvent pas être aussi facilement désagrégés. Ensuite, les brevets sont enregistrés pour tous les inventeurs, alors que les dépenses de R&D ne sont en général pas disponibles pour les petites et moyennes entreprises. Enfin, il existe des indications montrant que les brevets sont perçus comme une façon efficace de se protéger contre l'imitation dans l'industrie automobile, ce qui n'est pas vrai dans tous les secteurs (Cohen et al. 2000).⁵

Néanmoins, l'utilisation des brevets comme un indicateur de l'innovation a ses limites. Pour commencer, toutes les inventions ne sont pas brevetées. Une des principales limites

3 Pour 1.4% des candidatures de brevets comprises dans notre base de données, le pays de résidence de l'inventeur n'est pas disponible. Quand cette information est manquante, nous supposons simplement que le pays de l'inventeur correspond au premier office des brevets dans lequel l'invention a été protégée (c.-à-d. l'office prioritaire).

4 Les brevets avec plusieurs inventeurs sont comptés en fractionnant en parts égales. Par exemple, si deux inventeurs sont à l'origine d'une invention, alors chaque pays compte pour un demi.

5 Cohen et al. (2000) ont envoyé un questionnaire d'enquête à 1478 laboratoires de R&D dans le secteur de la fabrication aux Etats-Unis. Ils classent les secteurs selon l'efficacité des brevets pour protéger de l'imitation, et trouvent que les trois meilleurs secteurs selon ce critère sont celui du matériel médical et des médicaments, celui des machines à usage spécifique et l'automobile.

est que la valeur des brevets individuels est très hétérogène. Pour atténuer ce problème notre mesure de résultats se focalise sur les brevets de grande valeur qui ont été déposés dans au moins deux pays, contrairement à la catégorie plus large incluant tous les dépôts de brevets. Dans la littérature, cette méthode est devenue un moyen classique de se débarrasser de la proportion importante de brevets de faible valeur et qui sont souvent protégés dans un seul pays. Une autre limite est que, bien qu'un brevet garantisse le droit exclusif de l'exploitation d'une technologie dans un pays donné, nous ne savons pas si la technologie a véritablement été utilisée ou pas. Cependant le prix élevé du dépôt de brevet dissuade les demandes de protection dans les pays où la technologie a peu de chances d'être déployée. Au milieu des années 2000, déposer un brevet coûtait environ 5 000€ au Japon, 10 000€ aux Etats-Unis et 30 000€ à l'Office européen des brevets (OEB) (Roland Berger 2005). Les inventeurs sont donc peu susceptibles de faire une demande de brevet dans un pays particulier à moins qu'ils soient relativement certains de la valeur potentielle du marché pour la technologie. En effet, les preuves empiriques suggèrent que les inventeurs ne brevètent pas à grande échelle et indifféremment, puisque l'invention moyenne est seulement brevetée dans deux pays (voir Dechezleprêtre et al. 2011).⁶

4.3 Un coup d'œil aux données : deux exemples

L'objectif de notre travail est d'analyser le rôle du leadership technologique dans l'impact de la réglementation environnementale sur l'innovation. Dans la section suivante nous utilisons des méthodes économétriques pour conduire cette analyse de manière rigoureuse, mais nous commençons d'abord par une simple observation des données. Les corrélations que nous constatons dans cette section ne doivent pas être comprises comme traduisant un effet de cause à effet mais comme des indications qui demandent ensuite à être confirmées par l'analyse économétrique.

Les figures 5 et 6 représentent l'effort d'innovation en matière de technologies de contrôle de la pollution automobile dans deux pays qui sont des innovateurs majeurs au niveau mondial : le Japon (Fig. 5) et les Etats-Unis (Fig. 6). L'effort d'innovation est représenté par la *part* de brevets liés aux technologies de contrôle de la pollution dans l'innovation totale des inventeurs du pays. L'utilisation de la part de brevets liés à la

6 75 pour cent des inventions sont seulement brevetées dans un seul pays.

maîtrise de la pollution nous permet de contrôler pour l'augmentation générale de l'innovation constatée dans le plupart des pays au cours des deux dernières décennies. À côté de l'innovation, nous représentons par des lignes verticales les changements de réglementation. Ces changements sont représentés par une ligne verte si le pays adopte la nouvelle réglementation en avance sur le reste du monde, et par une ligne rouge si le pays adopte une réglementation qui a été précédemment adoptée depuis au moins deux par au moins un pays dans le monde.

Comme on le voit sur la Figure 5, le Japon a été un précurseur en matière de normes d'émissions depuis le début des années 1990, et les trois vagues de réglementation ont été suivies par une augmentation de l'effort d'innovation. L'exemple du Japon correspond au modèle classique du lien entre réglementation environnementale et innovation : une augmentation de la sévérité réglementaire est suivie par une augmentation de l'effort d'innovation de la part de l'industrie pour répondre aux nouvelles normes. Si on regarde maintenant le cas des Etats-Unis (Figure 6), on retrouve cette augmentation de l'innovation à la suite des changements réglementaires intervenus en 2004 et 2007 qui ont été précurseurs au niveau mondial. Cependant, il est très intéressant de constater que les deux changements réglementaires précédents intervenus en 1994 et 2002 ont été suivis au contraire d'une *diminution* de l'effort d'innovation. Lors de ces deux changements, les Etats-Unis n'étaient pas leaders en matière de sévérité de la réglementation mais se sont contentés d'adopter des normes déjà en vigueur dans d'autres pays (Japon, Union Européenne) depuis plusieurs années. L'exemple des Etats-Unis illustre bien que l'augmentation de la réglementation peut avoir un effet contraire sur l'innovation suivant que le pays qui adopte la nouvelle norme est un leader ou un « suiveur » en matière de sévérité réglementaire. L'objectif de la section suivante est de confirmer cette relation en utilisant des méthodes économétriques.

Figure 5. Innovation environnementale et réglementation au Japon

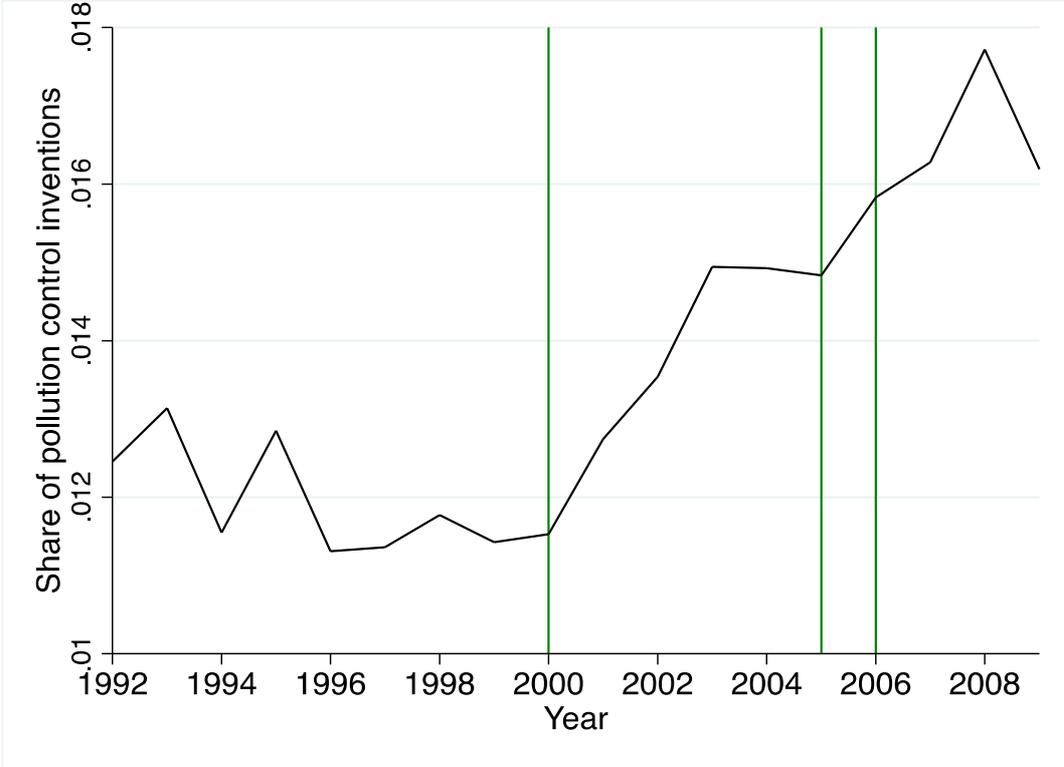


Figure 6. Innovation environnementale et réglementation aux Etats-Unis



5 Analyse économétrique

5.1 Modèle de base : l'effet de la rigueur règlementaire sur l'innovation

Le nombre de nouvelles inventions pour lesquelles les inventeurs demandent un brevet est mesuré par P_{it} , la part de brevets liés aux technologies de contrôle de la pollution déposés par des inventeurs d'un pays i durant l'année t . L'utilisation de la part de brevets liés à la maîtrise de la pollution nous permet de contrôler la propension à breveter variant en fonction du temps ; cette part est donc indépendante de toute modification du niveau de protection de la propriété intellectuelle au cours du temps. Notre modèle empirique est issu de notre modèle théorique présenté précédemment :

$$\ln(P_{it}) = \alpha \text{ CHANGE}_{it} + \beta \text{ LEADER}_{it} + \gamma \text{ CHANGE}_{it} * \text{LEADER}_{it} + X_{it} + \varepsilon_{ijt}$$

Où X_{it} est un vecteur de variables de contrôle, comprenant un ensemble complet d'effets fixes liés à l'année et au pays, et ε_{ijt} est le terme d'erreur.

Nos principaux paramètres d'intérêt sont α et γ . α reflète l'impact d'un changement de rigueur règlementaire sur les dépôts de brevets dans les pays en retard sur la législation,

tandis que γ reflète la différence de l'impact d'un changement de rigueur réglementaire sur les dépôts de brevets entre les pays précurseurs et les retardataires. $\alpha + \gamma$ quant à lui représente l'impact d'un changement de rigueur réglementaire sur les dépôts de brevets dans les pays précurseurs.

On définit $CHANGE_{it}$ comme égal à 1 l'année d'une augmentation de la rigueur réglementaire et l'année suivante pour les tous les pays (précurseurs ou en retard). Il est possible de définir $LEADER_{it}$ de plusieurs façons, mais dans notre spécification de base $LEADER_{it}$ est égal à 1 pour les pays qui ont le plus haut niveau de réglementation au niveau mondial.

Enfin, pour prendre en compte le fait que des niveaux de régulation différents peuvent engendrer des efforts d'innovation différents, nous incluons un ensemble complet d'effets fixes pour chaque niveau de réglementation, de EURO 1 à EURO 5 (la base étant l'absence de réglementation).

5.2 Technique d'estimation et échantillon

Nous estimons notre équation empirique par la méthode des moindres carrés ordinaire avec des erreurs type groupées au niveau national. Le principal avantage de l'utilisation de la méthode des moindres carrés est que cela rend l'interprétation des effets d'interaction directe. Nous ajoutons une constante arbitraire à la variable dépendante avant d'appliquer le logarithme (afin de garder les observations où la variable dépendante vaut zéro), mais estimons aussi directement en niveau, par logarithmes (en mettant de côté les zéros) et utilisons des modèles de type Poisson comme tests de robustesse.

6 Résultats

6.1 Résultats principaux

Les résultats de notre estimation principale sont présentés dans le tableau 1. La colonne 1 montre les résultats pour toutes les demandes de brevets et la colonne 2 utilise seulement les brevets de haute qualité comme défini ci-dessus. En accord avec notre

modèle, nous trouvons que les précurseurs et les retardataires réglementaires réagissent différemment à un changement de réglementation. Cette différence est représentée par le coefficient γ sur la variable d'interaction $CHANGE_{it} \times LEADER_{it}$ qui est positive et statistiquement significative. Plus précisément, nous trouvons que l'effet d'un changement du niveau de réglementation dans les pays en retard, identifié par le coefficient α , est négatif. Nous trouvons qu'un changement de rigueur réglementaire dans un pays en retard se traduit par une diminution de 8 à 11% de l'invention. Cet effet, qui va à l'encontre de la plupart des idées dans la littérature, est statistiquement significatif au seuil de 1%.

L'effet d'un changement du niveau de réglementation dans les pays précurseurs est donné par la somme des coefficients α et γ , qui vaut 0.135 pour le modèle (1) et 0.089 pour le modèle (2). En d'autres termes, un changement de rigueur réglementaire dans un pays précurseur induit une augmentation des efforts d'innovation comprise entre 9 et 13%. Il est important de noter que cet effet est aussi hautement statistiquement significatif ($p=0.0232$).

Pour résumer, notre modèle empirique apporte la confirmation de nos prédictions théoriques. La réaction des précurseurs et des retardataires à un changement de réglementation domestique est statistiquement différente et va dans des directions opposées. Tandis que les inventeurs dans les pays champions en termes de réglementation réagissent en augmentant leurs efforts d'innovation - ce qui est cohérent avec les résultats précédents trouvés dans la littérature -, les inventeurs dans les pays en retard réagissent en diminuant leurs efforts d'innovation - un résultat complètement inédit dans la littérature académique.

Table 1 — Résultats principaux

Model	(1)	(2)
$CHANGE_{it}$	-0.0821** (0.0334)	-0.1118*** (0.0362)
$LEADER_{it}$	-0.1181**	-0.0986

	(0.0550)	(0.0606)
$CHANGE_{it} * LEADER_{it}$	0.2173***	0.2010**
	(0.0698)	(0.0789)
Effets fixes niveau de la norme	oui	oui
Effets fixes pays	oui	oui
Effets fixes année	oui	oui
Nb observations	2825	2618
Nb pays	190	189

Note: *=significatif au seuil de 10%, **= significatif au seuil de 5%, ***= significatif au seuil de 1%. La variable dépendante est le logarithme de la part des brevets couvrant des technologies de contrôle de la pollution déposés par des inventeurs du pays i dans l'année t . Le modèle est estimé par la méthode des moindres carrés et incluent des effets fixes au niveau des pays, des années et des niveaux de réglementation (non reportés). Erreurs-types groupées au niveau des pays entre parenthèses.

6.2 Tests de robustesse

Les résultats d'une série de tests de robustesse sont rapportés dans le tableau 2. Dans la colonne 1, nous utilisons la part de technologies de maîtrise de la pollution dans les demandes de brevets pour l'industrie automobile (au lieu de considérer tous les secteurs) comme une variable dépendante alternative. Sans surprise, les résultats changent légèrement en termes d'amplitude mais notre résultat principal reste inchangé. L'impact d'un changement de rigueur réglementaire a des signes opposés et des amplitudes similaires pour les pays précurseurs et suiveurs. Dans la colonne 2 nous examinons la sensibilité de notre résultat au mode de définition des changements de réglementation. Nous définissons maintenant $CHANGE_{it}$ comme étant égal à 1 pendant 3 ans à partir de l'année de l'augmentation de la rigueur réglementaire. Nos résultats restent inchangés qualitativement, bien que les erreurs type aient tendance à augmenter légèrement, ce qui suggère que l'impact se fait majoritairement durant l'année de changement réglementaire et l'année suivante. Dans la colonne 3 nous utilisons de la même façon une définition alternative du leadership réglementaire. Nous définissons

empiriquement $LEADER_{it}$, en sélectionnant les pays qui semblent en avance sur les autres. Notre résultat principal demeure inchangé.

Dans la colonne 4 nous vérifions la robustesse de nos résultats en excluant de petits pays qui ne sont peut-être pas représentatifs de l'échantillon. Nous restreignons l'échantillon à des pays qui ont conçu plus de 500 inventions sur la période d'échantillonnage, ce qui nous conduit à diviser quasiment la taille de l'échantillon par trois. De nouveau, notre résultat principal demeure inchangé, et il est rassurant de constater que les résultats ne découlent pas des pays qui contribuent très peu à l'innovation mondialement. Enfin dans la colonne 5 nous vérifions que nos résultats ne sont pas dus à la différence entre les valeurs positives et nulles de la variable. Nous retirons toutes les observations de la variable dépendante qui prennent une valeur nulle, en appliquant directement le logarithme et ré-estimons notre modèle principal. Les résultats sont totalement robustes à cette modification. Il est intéressant de voir que l'amplitude du coefficient sur la variable d'interaction est maintenant trois fois plus élevée que celle du coefficient sur la variable $CHANGE_{it}$, ce qui suggère que l'impact du changement de réglementation sur l'innovation dans les pays leaders peut être plus important en amplitude absolue que l'impact négatif du même changement sur un pays retardataire, ce qui est confirmé par un test statistique ($p=0.0859$).

Table 2 — Tests de robustesse

Model	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$CHANGE_{it}$	-0.3037*** (0.1073)	-0.0617** (0.0317)	-0.0683** (0.0374)	-0.0474** (0.0191)	-0.1638** (0.0791)
$LEADER_{it}$	-0.3606** (0.1471)	-0.0805 (0.0691)	-0.0292 (0.0422)	-0.1023* (0.0539)	-0.2946** (0.1284)
$CHANGE_{it} * LEADER_{it}$	0.6175*** (0.1965)	0.1330* (0.0803)	0.0865* (0.0440)	0.1421** (0.0601)	0.4506*** (0.1654)
Effets fixes niveau de	oui	oui	oui	oui	oui

la norme					
Effets fixes pays	oui	oui	oui	oui	oui
Effets fixes année	oui	oui	oui	oui	oui
Observations	1528	2825	2825	1325	882
Nb pays	145	190	190	74	103

Note: *=significatif au seuil de 10%, **= significatif au seuil de 5%, ***= significatif au seuil de 1%. La variable dépendante est le logarithme de la part des brevets couvrant des technologies de contrôle de la pollution déposés par des inventeurs du pays *i* dans l'année *t*. Le modèle est estimé par la méthode des moindres carrés et incluent des effets fixes au niveau des pays, des années et des niveaux de réglementation (non reportés). Erreurs-types groupées au niveau des pays entre parenthèses.

7 Conclusion

Dans ce papier nous combinons des données sur les normes d'émission dans le secteur automobile et des données sur le brevetage de technologies liées à la mise en conformité par rapport à ces normes afin d'étudier la relation entre la réglementation environnementale et l'innovation. Nos données couvrent les années 1992 à 2009. Pendant cette période, cinq différentes vagues de normes furent adoptées et près de 140.000 innovations liées à la maîtrise de la pollution furent brevetées dans le monde. Nous utilisons le fait que les normes évoluent différemment en fonction du temps dans les pays de notre base de données et que les entreprises sont exposées différemment à ces changements de normes à cause de l'influence historique des normes locales sur les entreprises de l'industrie automobile.

En accord avec notre modèle théorique, notre résultat principal est que la réaction des inventeurs à un changement du niveau de réglementation diffère fortement entre les « leaders » réglementaires, qui sont les premiers dans le monde à adopter une législation plus stricte, et les « suiveurs » réglementaires, qui l'adoptent plus tard. Tandis que les inventeurs dans les pays leaders réglementaires réagissent à un renforcement des normes d'émission en augmentant leurs efforts d'innovation, les inventeurs dans les pays suiveurs réagissent en *diminuant* leurs efforts d'innovation. Ce dernier résultat est nouveau dans la littérature et contre-intuitif, dans laquelle une relation positive claire entre renforcement de la réglementation et innovation était communément admise.

Nos résultats ont plusieurs conséquences plus larges. La première est qu'ils suggèrent que le lien entre la réglementation environnementale et les activités d'innovation doit être compris comme un processus intrinsèquement relationnel entre les pays. Par conséquent, il faut s'attacher à la comparaison de la rigueur réglementaire relative entre les pays, plutôt qu'à la rigueur réglementaire absolue. Du côté des politiques publiques, les résultats de l'étude suggèrent que le développement de nouvelles technologies vertes des grands pays innovants peut être accéléré par un renforcement de la réglementation nationale, mais seulement dans les pays qui sont des précurseurs en termes de rigueur réglementaire. Les pays qui sont à la traîne sont susceptibles de voir leur innovation diminuer en renforçant leur réglementation. Cependant, ces pays en retard – qui

comprennent en général des pays en développement dont les normes sont moins exigeantes que celles des pays développés – sont susceptibles de voir augmenter le flux de technologies venant d'inventeurs basés dans les pays leaders réglementaires, comme montré par Dechezleprêtre et al. (2014). Ces éléments suggèrent d'ailleurs que le lien de causalité entre sévérité réglementaire et leadership technologique n'est pas totalement claire. Il est parfaitement envisageable que le renforcement de la réglementation dans les pays leaders résulte de l'identification par les autorités publiques d'un avantage technologique préexistant à même de renforcer la compétitivité des entreprises locales (Jullien et Pardi, 2011).

Notre analyse pourrait se poursuivre dans plusieurs directions. Tout d'abord, nous n'avons pas analysé l'impact des marchés étrangers sur l'innovation d'un pays, comme cela a été fait par Dechezleprêtre et Glachant (2014). Ensuite, nous n'avons pas pris en compte l'impact des flux de connaissances entre les pays sur l'innovation. Enfin, une limite importante de notre analyse est que nos résultats s'appliquent aux normes environnementales des produits du secteur automobile. Une tâche importante serait alors de déterminer si nos résultats s'appliquent à d'autres secteurs et à des réglementations axées sur les procédés.

8 Bibliographie

- Aghion P, Dechezleprêtre A, Hemous D, Martin R, Van Reenen J, 2014. Carbon taxes, path dependency and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, forthcoming.
- Bailey, D. A. de Ruyter, J. Michie and P. Tyler. 2010. Global restructuring and the auto industry. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society* 3: 311-318.
- Bauner, D. 2007. *Towards a Sustainable Automotive Industry – Experiences from the Development of Emission Control Systems*. Ph.D.Dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Beise, M. and K. Rennings. 2005. Lead markets and regulation: A framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations. *Ecological Economics* 52: 5-17.
- Berggren, C. and T. Magnusson. 2012. Reducing automotive emissions – The potentials of combustion engine technologies and the power of policy. *Energy Policy*, 41: 636-643.
- Bergquist, A-K, K. Söderholm, H. Kinnery, M. Lindmark and P. Söderholm. 2013. Command-and-control revisited: Environmental compliance and technological change in Swedish industry 1970–1990. *Ecological Economics* 85: 6-19.
- Bettencourt, L.M.A., J.E. Trancik and J. Kaur. 2013. Determinants of the pace of global innovation in energy technologies. *PLoS ONE* 8: e67864.
- Beyer, P. and J. Urpelainen. 2013. External sources of clean technology: Evidence from the Clean Development Mechanism. *Review of International Organizations* 8: 81-109.
- Blundell, R., Griffith, R., and J. Van Reenen, 1995. Dynamic count data models of technological innovation, *The Economic Journal*, 105:333-344.
- Blundell, R., Griffith, R., and F. Windmeijer, 2002. Individual effects and dynamics in count data models, *Journal of Econometrics*, 108: 113-131.
- Boehmer-Christiansen, S. and H. Weidner. 1995. *The Politics of Reducing Vehicle Emissions in Britain and Germany*. London: Pinter.
- Brandt, U.S. and G.T. Svendsen. 2006. Climate change negotiations and first-mover advantages: the case of the wind turbine industry. *Energy Policy* 34: 1175-1184.
- Branstetter L.G., R. Fisman and C.F. Foley. 2006. Do stricter intellectual property rights increase international technology transfers? Empirical evidence from U.S. firm-level panel data. *The Quarterly Journal of Economics* 121: 321-349.

Brunnermeier, S.B. and M.A. Cohen. 2003. Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries. *Journal of Environmental Economics and Management* 45: 278-293.

Cameron, A.C. and P.K. Trivedi. 2009. *Microeconometrics using Stata*. College Station: Stata Press.

Cabigiosu, A., F. Zirpoli, and A. Camuffo. 2013. Modularity, interfaces definition and the integration of external sources of innovation in the automotive industry. *Research Policy* 42: 662-675.

Chan, H.P. 2010. The determinants of international patenting for nine agricultural biotechnology firms. *The Journal of Industrial Economics* 58: 247-278.

Chin, G. 2010. *China's automotive modernization: The party-state and multinational corporations*. Basingstoke, Palgrave.

Cohen, W. M., Nelson, R. R., and Walsh, J. P. (2000). Protecting their intellectual assets: Appropriability conditions and why U.S. manufacturing firms patent (or not). National Bureau of Economic Research Working Paper No. 7552.

Costantini, V. and M. Mazzanti. 2012. On the green and innovative side of trade competitiveness? The impact of environmental policies and innovation on EU exports. *Research Policy* 41: 132-153.

Crabb J, Johnson D, 2010. Fueling Innovation: The Impact of Oil Prices and CAFE Standards on Energy-Efficient Automotive Technology, *The Energy Journal*, 31(1):199-216

Dechezleprêtre Antoine, Matthieu Glachant (2014) Does foreign environmental policy influence domestic innovation? Evidence from the wind industry. *Environmental and Resource Economics*. 58(3), pp 391-413.

Dechezleprêtre Antoine, Eric Neumayer, Richard Perkins, 2015. Environmental regulation and the cross-border diffusion of new technology: Evidence from automobile patents, *Research Policy*, 44(1): 244-257.

Dekker, T., H.R.J. Vollebergh, F.P. de Vries and C.A. Withagen. 2012. Inciting protocols. *Journal of Environmental Economics and Management* 64: 45-67.

Dicken, P. 2011. *Global shift: Mapping the changing contours of the world economy*. London: Sage.

Dronniou N 2014. Entretien téléphonique avec Nicolas Dronniou, IFP Energies Nouvelles, 15 septembre 2014.

Dronniou N., Tilagone, R. (2014) Transport : les normes anti-pollution dopent la concurrence et l'innovation, *La Tribune*. 21/01/2014.

<http://www.latribune.fr/opinions/tribunes/20140121trib000811005/transport-les-normes-anti-pollution-dopent-la-concurrence-et-l-innovation.html>

EAGAR (2009) Benchmarking Analysis Report. <http://www.eagar.eu/publications.html>.

Eaton, J. and S. Kortum. 1999. International technology diffusion: Theory and measurement. *International Economic Review* 40: 537-570.

Eaton, J. and S. Kortum. 2002. Technology, geography, and trade. *Econometrica* 70: 1741-1779.

Gallagher, K.S. 2006. Limits to leapfrogging in energy technologies? Evidence from the Chinese automobile industry. *Energy Policy* 34: 383-394.

Geffen, C.A. and S. Rothenberg. 2000. Suppliers and environmental innovation: The automotive paint process. *International Journal of Operations and Production Management* 20: 166-186

Gerard, D. and L.B. Lave. 2005. Implementing technology-forcing policies: The 1970 Clean Air Act Amendments and the introduction of advanced automotive emissions controls in the United States. *Technological Forecasting and Social Change* 72: 761-778.

Hall, J. and R. Kerr. 2003. Innovation dynamics and environmental technologies: The emergence of fuel cell technology. *Journal of Cleaner Production* 11: 459-471.

Hall, B.H. and R.H. Ziedonis. 2001. The patent paradox revisited: An empirical study of patenting in the U.S. semiconductor industry, 1979-1995. *The RAND Journal of Economics* 32: 101-128.

Hall, B. and Helmers, C. 2010. The role of patent protection in (clean/green) technology transfer, *Santa Clara High Technology Law Journal* 26: 487-532.

Harhoff, D., F.M. Scherer and K. Vopel. 2003. Citations, family size, opposition and the value of patent rights. *Research Policy* 32: 1343-1363.

Haščič, I., F. de Vries, N. Johnstone and N. Medhi. 2009. Effects of environmental policy on the type of innovation: The case of automotive emission-control technologies. *OECD Journal: Economic Studies* 2009: 49-66.

Haščič, I. and N. Johnstone. 2009. The Kyoto Protocol and international technology transfer: An empirical analysis using patent data. Unpublished working paper.

Haščič, I., N. Johnstone, F. Watson and C. Kaminker. 2010. Climate policy and technological innovation and transfer: An overview of trends and recent empirical results. OECD Environment Working Paper No. 30.

Haščič, I. and N. Johnstone. 2011a. CDM and international technology transfer: empirical evidence on wind power. *Climate Policy* 11: 1303-1314.

Hašič, I. and N. Johnstone. 2011b. Innovation in electric and hybrid vehicle technologies: The role of prices, standards and R&D. In OECD Publishing, *Invention and Transfer of Environmental Technologies*. Paris: OECD, pp.85-125.

Horbach, J. 2008. Determinants of environmental innovation—New evidence from German panel data sources. *Research Policy* 37: 163–173.

Hu, A.G. and G.H. Jefferson. 2009. A great wall of patents: What is behind China's recent patent explosion? *Journal of Development Economics* 90: 57-68.

Huber, J. 2008. Pioneer countries and the global diffusion of environmental innovations: Theses from the viewpoint of ecological modernisation theory. *Global Environmental Change* 18: 360-367.

IPCC. 2007. *Climate change 2007: Mitigation of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Jaffe, A.B. and K. Palmer. 1997. Environmental regulation and innovation: A panel data study. *The Review of Economics and Statistics* 79: 610-619.

Johnstone, N., I. Hašič and M. Kalamova. 2010. Environmental policy characteristics and technological innovation. *Economia Politica* 27: 275-299.

Johnstone N, Hašič I, Popp P (2010) Renewable Energy Policies And Technological Innovation: Evidence Based On Patent Counts. *Environmental and Resource Economics*, 45(1):133-155

Jullien B. et Pardi T., 2011. In the name of consumer: The social construction of innovation in the European automobile industry and its political consequences, *European Review of Industrial Economics and Policy*, 3.

Keller, W. 2004. International technology diffusion. *Journal of Economic Literature* 42: 752-782.

Kellenberg, D.K. 2009. An empirical investigation of the pollution haven effect with strategic environment and trade. *Journal of International Economics* 78: 242-255.

Kumaraswamy, A., R. Mudambi, H. Saranga and A. Tripathy. 2012. Catch-up strategies in the Indian auto components industry: Domestic firms' responses to market liberalization. *Journal of International Business Studies* 43: 368-395.

Lanjouw, J.O. and A. Mody. 1996. Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology. *Research Policy* 25: 549-571.

Lanoie, P., J. Laurent-Lucchetti, N. Johnstone and S. Ambec. 2011. Environment policy, innovation and performance: New insights on the Porter hypothesis. *Journal of Economics & Management Strategy*, 20: 803–842.

- Lee, J., F.M. Veloso and D.A. Hounshell. 2011. Linking induced technological change, and environmental regulation: Evidence from patenting in the U.S. auto industry. *Research Policy* 40: 1240-1252.
- Lee, J. and N. Berente. 2013. The era of incremental change in the technology innovation life cycle: An analysis of the automotive emission control industry. *Research Policy* 42: 1469-1481.
- Lema, R., R. Quadros and H. Schmitz. 2012. Shifts in innovation power to Brazil and India: Insights from the auto and software industries. IDS Research Report #73.
- Lerner, J. 2009. The empirical impact of intellectual property rights on innovation: Puzzles and clues. *American Economic Review* 99: 343-348.
- Mikler, J. 2009. *Greening the car industry: Varieties of capitalism and climate change*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Mondt, R. 2000. *Cleaner cars: The history and technology of emissions control since the 1960s*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Newell RG Jaffe AB Stavins RN, 1999. The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change. *Quarterly Journal of Economics*, 114: 941-75.
- Ockwell, D.G.; R. Haum; A. Mallett; and J. Watson. 2011. Intellectual property rights and low carbon technology transfer: Conflicting discourses of diffusion and development. *Global Environmental Change* 20: 729-738.
- OECD. 2009. *OECD Patent Statistics Manual*. Technical report, Paris: OECD.
- OECD. 2011. *Invention and Transfer of Environmental Technologies*. Paris: OECD.
- Oltra , V. and M. Saint Jean. 2009. Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change* 76: 567-583.
- Park, W.G. 2008. International patent protection: 1960–2005. *Research Policy* 37: 761-766.
- PATSTAT. 2013. Worldwide patent statistical database (PATSTAT), European Patent Office.
- Pavlínekt , P. 2012. The internationalization of corporate R&D and the automotive industry R&D of East-Central Europe. *Economic Geography* 88: 279–310.
- Pavlínekt , P. and J. Ženka. 2009. Upgrading in the automotive industry: Firm-level evidence from Central Europe. *Journal of Economic Geography* 11: 559-586.
- Peri, G. 2005. Determinants of knowledge flows and their effect on innovation. *Review of Economics and Statistics* 87: 308-322.

- Perkins, R. 2007. Globalizing corporate environmentalism? Convergence and heterogeneity in Indian industry. *Studies in Comparative International Development (SCID)* 42: 279-309.
- Perkins, R. and E. Neumayer. 2011. Transnational spatial dependencies in the geography of non-resident patent filings. *Journal of Economic Geography* 11: 37-60.
- Perkins, R. and E. Neumayer. 2012. Does the “California effect” operate across borders? Trading- and investing-up in automobile emission standards. *Journal of European Public Policy* 19: 217-237.
- Peters, M., M. Schneider, T. Griesshaber and V.H. Hoffmann. 2012. The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change – Does the locus of policies matter? *Research Policy* 41: 1296-1308
- Popp D (2002) Induced innovation and energy prices. *Am Econ Rev* 92(1):160-180
- Popp, D. 2006. International innovation and diffusion of air pollution control technologies: The effects of NO_x and SO₂ regulation in the US, Japan, and Germany. *Journal of Environmental Economics and Management* 51: 46-71.
- Popp, D. 2011. International technology transfer, climate change, and the clean development mechanism. *Review of Environmental Economics and Policy* 5: 131-152.
- Popp, D., T. Hafner and N. Johnstone. 2011. Policy vs. consumer pressure: Innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry. *Research Policy* 40: 1253-1268.
- Porter, M.E. and C. van der Linde. 1995. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives* 9: 97-118.
- Roland Berger. 2005. The cost of a sample European patent - new estimates. Munich: Roland Berger Market Research.
- Saggi, K. 2002. Trade, foreign direct investment, and international technology transfer: A survey. *The World Bank Research Observer* 17: 191-235.
- Schmid, G. 2012. Technology transfer in the Clean Development Mechanism: the role of host country characteristics. *Climate Policy* 12: 722-740.
- Smith, P. J.. 2001. How do foreign patent rights affect U.S. exports, affiliate sales, and licenses? *Journal of International Economics* 55: 411-439.
- Sturgeon, T. J. and J. Van Biesebroeck. 2010. Effects of the crisis on the automotive industry in developing countries: A global value chain perspective. World Bank Policy Research Working Paper #5530, June.

Tao, L., E. Garnsey, D. Probert and T. Ridgman. 2010. Innovation as response to emissions legislation: revisiting the automotive catalytic converter at Johnson Matthey. *R&D Management* 40: 154-168.

Taylor, M.R., E.S. Rubin and D. A. Hounshell. 2003. Effect of government actions on technological innovation for SO₂ control *Environmental Science and Technology* 37: 4527-4534.

Tébar Less, C. and S. McMillan. 2005. Achieving the successful transfer of environmentally sound technologies: Trade-related aspects. OECD Trade and Environment Working Paper No. 2005-02. Paris: OECD.

The Economist. 2013. *Special Report: Cars*. April 20th.

UN. 2013. Commodity trade statistics database (COMTRADE). New York: United Nations Statistics Division.

Verdolini, E. and M. Galeotti. 2011. At home and abroad: An empirical analysis of innovation and diffusion in energy technologies. *Journal of Environmental Economics and Management* 61: 119-134.

Veugelers, R. 2012. Which policy instruments to induce clean innovating? *Research Policy* 41: 1770-1778.

Vollebergh, H. 2010. Fuel taxes, motor vehicle emission standards and patents related to the fuel-efficiency and emissions of motor vehicles. Paris: OECD, Environment Directorate, Centre for Tax Policy and Administration.

WCED. 1987. *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.

World Bank. 2010. World development indicators on CD-ROM. Washington, D.C.: IBRD.

Yang, C.-H. and N.-F. Kuo. 2007. Trade-related influences, foreign intellectual property rights and outbound international patenting. *Research Policy* 37: 446-459.

Annexe 1

Définition des codes IPC utilisés pour sélectionner les technologies environnementales
(d'après Haščíč et al. 2009 and Vollebergh 2010)

Air-fuel ratios

F01N3/05	Exhaust or silencing apparatus having means for purifying, rendering innocuous, or otherwise treating exhaust by means of air e.g. by mixing exhaust with air.
F02M67	Apparatus in which fuel-injection is effected by means of high-pressure gas, the gas carrying the fuel into working cylinders of the engine, e.g. air-injection type.
F02M23	Apparatus for adding secondary air to fuel-air mixture.
F02M25	Engine-pertinent apparatus for adding non-fuel substances or small quantities of secondary fuel to combustion-air, main fuel, or fuel-air mixture.
F02M3	Idling devices

Oxygen, NOX and temperature sensors

F01N11	Monitoring or diagnostic devices for exhaust-gas treatment apparatus
F02D41/14	Electrical control of supply of combustible mixture or its constituents (introducing closed-loop corrections).

Fuel injection systems

F02M39	Arrangements of fuel-injection apparatus with respect to engines; Pump drives adapted top such arrangements
F02M41	Fuel-injection apparatus with two or more injectors fed from a common pressure-source sequentially by means of a distributor
F02M43	Fuel-injection apparatus operating simultaneously on two or more fuels or on a liquid fuel and another liquid, e.g. the other liquid being an anti-knock additive
F02M45	Fuel-injection apparatus characterized by having a cyclic delivery of

specific time/pressure or time/quantity relationship

F02M47	Fuel-injection apparatus operated cyclically with fuel-injection valves actuated by fluid pressure
F02M49	Fuel-injection apparatus in which injection pumps are driven, or injectors are actuated, by the pressure in engine working cylinders, or by impact of engine working piston
F02M51	Fuel injection apparatus characterized by being operated electrically.
F02M53	Fuel-injection apparatus characterized by having heating, cooling, or thermally- insulating means
F02M55	Fuel-injection apparatus characterized by their fuel conduits or their venting means
F02M57	Fuel injectors combined or associated with other devices
F02M59	Pumps specially adapted for fuel-injection and not provided for in groups F02M 39/00 to F02M 57/00
F02M61	Fuel injection not provided for in groups F02M 39/00 to F02M 57/00
F02M63	Other fuel-injection apparatus, parts, or accessories having pertinent characteristics not provided for
F02M69	Low-pressure fuel-injection apparatus
F02M71	Combinations of carburetors and low-pressure fuel-injection apparatus

Exhaust Gas Recirculation (EGR) valves

F01N5	Exhaust or silencing apparatus combined or associated with devices profiting by exhaust energy
-------	--

On-board diagnosis systems

F02D41	Electrical control of combustion engines; Electrical control of supply of combustible mixture or its constituents
F02D43	Conjoint electrical control of two or more functions, e.g. ignition, fuel-air mixture, recirculation, supercharging, exhaust-gas treatment
F02D45	Electrical control not provided for in groups F02D 41/00 to F02D 43/00
F02M51	Fuel injection apparatus characterized by being operated electrically
F01N9	Electrical control of exhaust gas treating apparatus

Crankcase emissions and control

F01M13/04	Crankcase ventilating or breathing: having means of purifying air before
-----------	--

leaving crankcase, e.g. removing oil

Catalytic converters

- F01N3/08-34 Exhaust or silencing apparatus having means for purifying, rendering innocuous, or otherwise treating exhaust; for rendering innocuous by thermal or catalytic conversion of noxious components of exhaust
- B01D53/92-96 Separation of gases or vapors; Recovering vapors of volatile solvents from gases; Chemical or biological purification of engine exhaust gases; Regeneration, reactivation or recycling of reactants.
- B01J23/40-46 Catalysts comprising metals or metal oxides or hydroxides; of the platinum group metals
-