



HAL
open science

Eco-innovation dans le secteur automobile : vers un nouveau sentier de dépendance ? : une lecture évolutoniste

Charles Benezra

► **To cite this version:**

Charles Benezra. Eco-innovation dans le secteur automobile : vers un nouveau sentier de dépendance ? : une lecture évolutoniste. Economies et finances. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENE013 . tel-00993653

HAL Id: tel-00993653

<https://theses.hal.science/tel-00993653>

Submitted on 20 May 2014

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Sciences Économiques**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Charles BENEZRA

Thèse dirigée par Catherine FIGUIERE

préparée au sein du **Centre de Recherche en Économie de Grenoble**
dans l'**École Doctorale Sciences Économiques**

**ECO-INNOVATION DANS LE SECTEUR
AUTOMOBILE : VERS UN NOUVEAU
SENTIER DE DEPENDANCE ?
UNE LECTURE EVOLUTIONNISTE.**

Thèse soutenue publiquement le **16 décembre 2013**
devant le jury composé de :

M. Jean-Jacques CHANARON (Rapporteur)

Directeur de Recherche CNRS

M. Hakim BEN HAMMOUDA (Rapporteur)

Conseiller Spécial du Président de la Banque Africaine du Développement, HDR en
Economie

M. Redouane TAOUIL (Président du Jury)

Professeur des Universités à l'Université Grenoble II

Mme Catherine FIGUIERE (Directrice de thèse)

Maître de Conférences HDR à l'Université Grenoble II



*La Faculté d'Économie et l'Université
Pierre Mendès France n'entendent donner
aucune approbation ou improbation aux
opinions émises dans les thèses. Ces
opinions doivent être considérées comme
propres à leurs auteurs.*

REMERCIEMENTS

Cette thèse prend ses racines dans ma passion pour l'automobile et dans mon passé professionnel, ayant travaillé pendant plus de quinze ans pour les constructeurs automobiles Porsche, Mercedes Benz, Mitsubishi, Seat, Chrysler et collaboré avec l'INRIA Rocquencourt (78) sur un programme de déploiement de véhicules électriques en libre-service (Praxitèle, Dédale).

Ces lignes signent la dernière étape dans la rédaction d'une thèse. Elles ne me suffiront pas pour vous exprimer ma reconnaissance, à vous tous qui m'avez aidé dans cette entreprise, que ce soit par votre collaboration scientifique ou votre soutien moral... mais sans qui ce travail n'aurait pu aboutir. En écrivant ces lignes, j'ai une pensée particulière pour Michel Vigezzi alors Directeur de l'École Doctorale d'Économie de Grenoble, aujourd'hui à la retraite, qui m'a « mis le pied à l'étrier » en me permettant d'entamer cette thèse.

Je souhaiterais remercier tout d'abord Jean-Jacques Chanaron et Hakim Ben Hammouda qui ont accepté d'être les Rapporteurs de cette thèse ainsi que Redouane Taouil pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail. Je voudrais témoigner ici toute ma gratitude et adresser mes plus chaleureux remerciements à Catherine Figuière qui m'a permis, sous sa direction, de conduire cette thèse à son terme. Ses conseils éclairés et sa rigueur méthodologique ont constitué un atout décisif à de nombreux points de vue.

Je tiens à remercier tout particulièrement Michel Rocca (ancien Doyen de la Faculté d'Économie, Vice-Président CEVU) et Pierre Bailly (Responsable Licence – Enseignement à Distance) pour m'avoir accueilli au sein du Département d'Enseignement à Distance (EAD) et pour la confiance qu'ils m'ont témoignée ainsi que Jacqueline Jourdan, Responsable Administrative pour sa bienveillante présence.

Ce travail a bénéficié du soutien de la Faculté d'Économie de Grenoble (anciennement UFR ESE), de celui d'Alain Laurent - Directeur de la Faculté d'Économie et de Catherine Figuière - Directrice du Centre de Recherche en Économie de Grenoble (CREG), qui ont tous deux veillé à ce que je puisse travailler dans les meilleures conditions. Je leur sais gré de leurs attentions.

Mes remerciements vont également à Pauline Lacour pour ses conseils, à Laëtitia Guilhot pour ses encouragements, à Laure Bergeret et Catherine Cisela qui ont su trouver les articles ou les ouvrages ... introuvables, à Christine Capoccioni pour les ressources informatiques, à Nathalie Denos pour m'avoir aidé à régler les bugs inévitables, à Julien Mottet pour ses conseils en infographie, à Fabienne pour sa patiente relecture et à de nombreux autres collègues et amis pour leur soutien moral, leur patience et leur disponibilité à toute épreuve.

Pour leur aimable collaboration et leur disponibilité, je souhaite adresser mes plus vifs remerciements au Professeur Horst Hanusch de l'International Schumpeter Society, à Marie Claude Buraux de la Société des Ingénieurs en Automobile (SIA), à Monique Buntic de l'Observatoire du Véhicule Électrique (OVE), à Hélène Kraepiel de la Filière Française des Huiles et Protéines Végétales (PROLEA), à Madame Riehl du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) ainsi qu'à Émilie Binois et à Florence Lagarde d'autoactu.com, et à tous ceux qui m'ont procuré à de nombreuses reprises les informations dont j'avais besoin. Je n'oublie pas non plus les personnes travaillant chez des constructeurs automobiles et qu'il ne m'est pas possible de nommer ici pour des raisons de confidentialité.

Que ma famille, tout particulièrement ma tante Allegra et mes amis sachent combien leur affection, leur soutien et leur confiance m'ont été précieux, surtout dans ces moments où le stress nous rend insupportables.

Enfin, je tiens à remercier Françoise qui dès le début m'a soutenu et encouragé dans ce projet que d'aucuns n'ont pas hésité à qualifier de folie. En toutes circonstances, tu as été présente. Je n'ai pas de mots pour te dire « MERCI ».

Réaliser cette thèse était un projet muri de longue date que je souhaitais mener à bien. La poursuite de ce doctorat a constitué une expérience particulièrement enrichissante.

*Une personne qui n'a jamais commis
d'erreurs n'a jamais tenté d'innover.*

A. Einstein

SOMMAIRE

Remerciements	5
Sommaire	9
Liste des Acronymes et Abréviations	11
Liste des Figures, Tableaux et Graphiques	13
Introduction Générale	19
Chapitre 1 L'innovation : de Schumpeter aux Évolutionnistes - Un processus incrémental	31
Section 1 : La vision Schumpétérienne : fondement de la pensée contemporaine de l'innovation	35
1.1 L'innovation selon Schumpeter : éléments de cadrage	37
1.2 La destruction créatrice	40
1.3 Innovations incrémentales et grappes d'innovations.....	43
1.4 Les innovations de rupture	48
Propos d'étape – Chapitre 1 – Section 1	54
Section 2 : La vision évolutionniste de l'innovation : prolongement des propositions schumpétériennes..	56
2.1 Régime technologique : un concept cadre.....	58
2.2 « <i>Path dependence</i> » (Sentiers de dépendance) et « <i>lock-in</i> » (verrouillage) : des concepts à la pratique	62
2.3 Modèles de diffusion technologique et rendements croissants d'adoption	71
Propos d'étape – Chapitre 1 – Section 2	80
Conclusion du Chapitre 1	82
Chapitre 2 Innovation et Environnement : Eco-innovations incrémentales, éco-innovations de rupture	85
Section 1 De la fin annoncée du pétrole à la prise en compte de l'environnement	87
1.1 Un pétrole plus rare et plus cher	87
1.2 La prise en compte des considérations environnementales dans l'innovation	89
1.3 Innovation et environnement : un processus contraint	106
Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 1	118

Section 2	Les accélérateurs de l'innovation	120
2.1	Politiques publiques et éco-innovations	121
2.2	Les moteurs de l'éco-innovation	136
2.3	Les éco-innovations : un prolongement des concepts schumpétériens et évolutionnistes	141
2.4	Eco-innovation : élément constitutif du développement durable	145
Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 2		148
Conclusion du Chapitre 2		149
Chapitre 3	Eco-Innovation et Automobile : amorce d'un nouveau sentier	153
Section 1	Environnement : L'automobile face à une double contrainte	155
1.1	L'automobile dans l'économie française : un secteur incontournable	155
1.2	Un secteur sous contraintes	161
Section 2	Un phénomène de « lock-in » jusqu'à la fin du 20 ^e siècle	166
2.1	Motorisation : résistance de la combustion interne	167
2.2	Carburants : le lock-in de la motorisation	174
Section 3	Des éco-innovations de rupture à l'origine d'un nouveau sentier de dépendance	187
3.1	De l'éco-innovation à l'éco-conception	187
3.2	L'éco-conception dans l'automobile	188
3.3	Les enjeux liés aux motorisations alternatives, hybrides, électriques, à hydrogène, à air comprimé. Vers le Zero Emission Vehicle ers le Zero Emission Vehicle	192
Conclusion du Chapitre 3		214
Conclusion Générale		217
Bibliographie		223
Table des matières		247

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes
CASI	Changement d'affectation des sols indirect
CCFA	Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
CO2	Dioxyde de carbone
DOS	Disk Operating System
ETI	Entreprise de Taille Intermédiaire
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GM	General Motors
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié -
IARC	International Agency for Research Cancer
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
INPI	Institut National de la Propriété Industrielle
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
ISS	International Schumpeter Society
JORF	Journal Officiel de la République Française
LED	Light Emitting Diode
LEV	Low Emission Vehicle
LMP	Lithium métal polymère
MEDDTL	Ministère de l'Économie, du Développement Durable des Transports et du Logement
NOx	Oxyde d'azote
OEB	Office Européen des Brevets
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONU	Organisation des Nations Unies
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
OST	Organisation Scientifique du Travail
PAC	Pile à Combustible

PIPAME	Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Économiques
PSA	Groupe Peugeot Citroën
REP	Responsabilité Élargie du Producteur
SESSI	Service des Études et des Statistiques Industrielles
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SNI	Système National d'Innovation
SO ₂	Dioxyde de soufre
SPAA	Syndicat national des producteurs d'alcool agricole
SNI	Système National d'Innovation
SSI	Sectoral System of Innovation / Système sectoriel d'innovation
VCR	Video Cassette Recorder
VHS	Video Home System

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET GRAPHIQUES

FIGURES

Figure 0-1 – Architecture de la thèse.....	29
Figure 1-1 Les 3 phases du changement technologique	37
Figure 1-2 - Vision du progrès technique selon Schumpeter.....	43
Figure 1-3 - Le rasage "humide" : un exemple de grappe d'innovations	46
Figure 1-4-Impact des types d'innovation sur les « cas de l'innovation »	53
Figure 1-5 Synthèse de l'analyse schumpétérienne de l'innovation.....	55
Figure 1-6 Positive feedback in the VCR market	69
Figure 1-7 – Interprétation évolutionniste de l'innovation.....	81
Figure 2-1 – Les trois pôles du Développement Durable	91
Figure 2-2- Le développement durable : quelques dates clés	100
Figure 2-3 - Mécanisme sous-jacent à l'hypothèse de Porter	110
Figure 2-4 - Technologies " <i>End of Pipe</i> "	111
Figure 2-5 – La Symbiose de Kalundborg.....	113
Figure 2-6 – Principe de fonctionnement de la Technologie du Cycle Organique de Rankine (ORC)	115
Figure 2-7 - Mise en œuvre de technologies propres.....	116
Figure 2-8 - Relation entre production plus propre et les autres concepts de management de l'environnement.....	117
Figure 2-9 - De l'innovation à l'éco-innovation	119
Figure 2-10- Les déterminants de l'éco-innovation	124

Figure 2-11 – Three dimensions of the social system with their three interactions terms	126
Figure 2-12 – Actors and linkages in the innovation system.....	127
Figure 2-13 - Principaux éléments constitutifs d'un système sectoriel.....	133
Figure 2-14 - Dynamiques Industrielles	133
Figure 2-15 - Typologie de l'innovation	142
Figure 3-1- Les emplois liés à l'automobile en France (1981).....	157
Figure 3-2 - Vue « éclatée » d'un turbocompresseur.....	170
Figure 3-3 - Part de marché du diesel dans les immatriculations de nouvelles voitures particulières 1er trimestre 2012, en %	177
Figure 3-4 - Nouvelle ligne d'échappement pour les véhicules diesel développée par PSA afin de satisfaire à la Norme Euro 6	181
Figure 3-5 – Les ressources des micro-algues	184
Figure 3-6 – Sévérisation des limites d'émissions diesel en convergence avec celles de l'essence.....	186
Figure 3-7 – Les quatre dimensions de l'éco-conception.....	188
Figure 3-8- l'éco-conception	189
Figure 3-9 – Potentiel de recyclage des emballages acier et aluminium	190
Figure 3-10 - Le cycle circulaire du recyclage des cannettes (acier – aluminium)	191
Figure 3-11 - Michelin "Active Wheel".....	205
Figure 3-12 – Seuls l'hydrogène et les piles à combustible peuvent permettre de respecter les niveaux d'émissions de GES imposés pour des véhicules respectueux de l'environnement	207
Figure 3-13 - Le système DaimlerChrysler de pile à combustible alimenté au méthanol	208

Figure 3-14 – Automobile : Eco-innovation de rupture à l’origine d’un nouveau sentier de dépendance.....	213
--	-----

TABLEAUX

Tableau 1-1 Synthèse des distinctions entre innovation incrémentale et innovation de rupture.....	52
Tableau 1-2 - Adoption Payoffs.....	76
Tableau 1-3 Rendements associés à l’adoption des technologies selon le modèle d’Arthur (1988a, 1988b, 1989).....	78
Tableau 2-1 - Les principaux GES visés par le protocole de Kyoto :	98
Tableau 2-2 - Comparatif du coût d’utilisation entre les différents types d’ampoules.	105
Tableau 2-3 - Évolution du Malus Automobile, 2013 calculé en fonction du taux d’émission de CO2.....	122
Tableau 2-4 - Évolutions de la définition de Système National d’Innovation.....	129
Tableau 2-5 - Évolutions de la définition d’un Système Sectoriel d’Innovation.....	135
Tableau 3-1 - Emplois induits par l'automobile en 2010 (milliers de personnes)	158
Tableau 3-2 - 2011 Patent Activity : Automotive.....	193
Tableau 3-3 - Motorisations alternatives - Classement par pays 2011	194
Tableau 3-4 - Classement des constructeurs de motorisations alternatives en 2011	195
Tableau 3-5 - Comparaison entre les différentes motorisations	198
Tableau 3-6 - Impact du mix de production d’électricité sur les émissions de CO2....	204

GRAPHIQUES

Graphique 0-1 Évolution du parc de voitures particulières et commerciales	21
Graphique 0-2 Taux d’équipement et de multiéquipement des ménages français métropolitains en automobile.....	21
Graphique 0-3 Parc Mondial de véhicules en milliards d'unités (IEEJ)	22

Graphique 1-2 Évolution du marché Français des abonnés au téléphone mobile entre 2000 et 2005.....	65
Graphique 1-3 Increasing returns adoption : a random walk with absorbing barriers ...	78
Graphique 2-1 - Évolutions du cours du baril de pétrole entre 1947 et 2011.....	88
Graphique 2-2 - Émissions mondiales de gaz à effet de serre depuis 1970.....	92
Graphique 2-3 - Coût des dommages assurés entre 1970 et 2011	94
Graphique 2-4 - Nombre de victimes entre 1970 et 2011.....	95
Graphique 2-5 - Nombre d'évènements entre 1970 et 2011	95
Graphique 2-6 - Part des émissions de CO ₂ en France selon le mode de transport.....	99
Graphique 2-7 - Green Innovation Drivers.....	136
Graphique 2-8 - Évolution de l'innovation dans les technologies d'atténuation du changement climatique, comparaison avec tous les secteurs	140
Graphique 2-9 - The Disruptive Innovation Model	143
Graphique 3-1 - Évolution comparée de la production automobile mondiale et de la concentration en CO ₂ dans l'atmosphère.....	160
Graphique 3-2 - Évolution du cours du pétrole et prévision, 1996 - 2020	162
Graphique 3-3 - Contexte et objectifs envisagés pour la réduction des émissions de GES	163
Graphique 3-4 - Courbes théoriques de l'évolution des émissions de CO ₂	164
Graphique 3-5 - Évolution constatée des émissions de CO ₂	165
Graphique 3-6 - Évolution de la masse surfacique des véhicules.....	171
Graphique 3-7 - Évolution de la puissance, du poids du véhicule particulier	172
Graphique 3-8 - Évolution des immatriculations de voitures particulières essence et diesel entre 1972 et 2010	178

Graphique 3-9 - Évolution du nombre de brevets déposés par l'échantillon de constructeurs automobiles 1990/2005	179
Graphique 3-10 - Répartition des dépôts de brevets par les constructeurs de motorisations alternatives	196
Graphique 3-11 - Les hydrocarbures liquides : une compacité énergétique inégalée ..	209
Graphique 3-12 - Objectifs de réduction des émissions de CO2 / 2050 – Europe – USA - Chine.....	211

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie automobile tient une place à part dans les économies capitalistes comme en atteste la dénomination par les économistes des deux dernières phases de l'histoire du capitalisme : le « fordisme » et le post-« fordisme ». C'est bien sûr *ex post*, et sur la base des innovations de rupture dans le domaine de l'organisation de la production de la Ford T initiées par Henry Ford dans les années 1920 aux États-Unis, que cette appellation va venir qualifier une période longue de l'histoire du capitalisme.

« C'est au sortir de la Seconde Guerre mondiale que fut lancé, en France, le projet de la démocratisation de l'automobile qui avait été initié Outre Atlantique par Ford et General Motors dans les années 1920. La généralisation progressive de la 'motorisation des ménages' s'est accompagnée d'un développement de l'infrastructure

routière »¹. L'automobile a non seulement représenté un secteur clé dans le développement des économies capitalistes mais a également constitué un « lieu » d'innovation permanent autant que déterminant. De plus, ce secteur étant intimement lié à l'évolution du secteur énergétique, il constitue un objet d'étude particulièrement pertinent dans une période largement caractérisée par le débat sur la transition énergétique comme en atteste la déclaration du Président de la République en date du 20 septembre 2013, mais également le dernier programme de travail des chercheurs du Gerpisa² sur « Transition énergétique, nouvelles mobilités et services de l'automobile ».

Perroux (1963 :164) avait déjà perçu cet effet de structuration, ce lien particulier qui unit parfois deux « *industries de croissance* » comme l'automobile et l'énergie : « *une industrie ou une subdivision d'industrie A offre un produit nouveau à une industrie ou une subdivision d'industrie B dans le sens vertical (de l'énergie – électricité, pétrole, vers le matériel de transport – avion, automobile), et lui 'permet' d'innover ou 'l'oblige' à innover* ».

Toujours à propos de l'automobile, Perroux (1963 :168) écrivait : cette industrie a « *transformé la structure de tout l'ensemble industriel* ». Elle représente aujourd'hui 12 millions d'emplois en Europe, contribue à hauteur de 92 milliards d'euros à la balance commerciale de l'Union européenne et ses investissements en R&D sont de 30 milliards d'euros³. Pour toutes ces raisons elle est toujours considérée comme un secteur clé au sein de l'économie européenne.

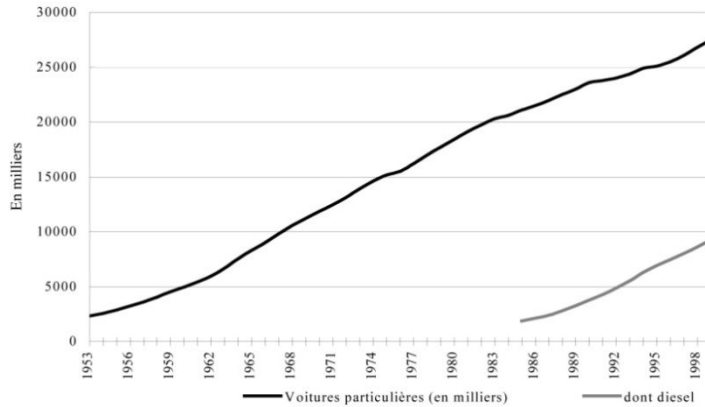
Comme le montre le Graphique 0-1ci-dessous, le nombre de véhicules a crû de manière régulière sur la période 1953-1998 pour passer de 2,7 millions de véhicules en 1954 à environ 29 millions en 2003, selon l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE). Il est à noter sur ce graphique, à partir du milieu des années 1980, une augmentation du nombre de véhicules utilisant une motorisation diesel.

¹ Futuribles, 2003 : 297.

² Le Gerpisa (Groupe d'Étude et de Recherche Permanent sur l'Industrie et les Salariés de l'Automobile, EHESS), désormais Réseau international de l'automobile, produit des recherches sur ce secteur dans le domaine des sciences sociales depuis 1993.

³ Cars 21, 6 juin 2012.

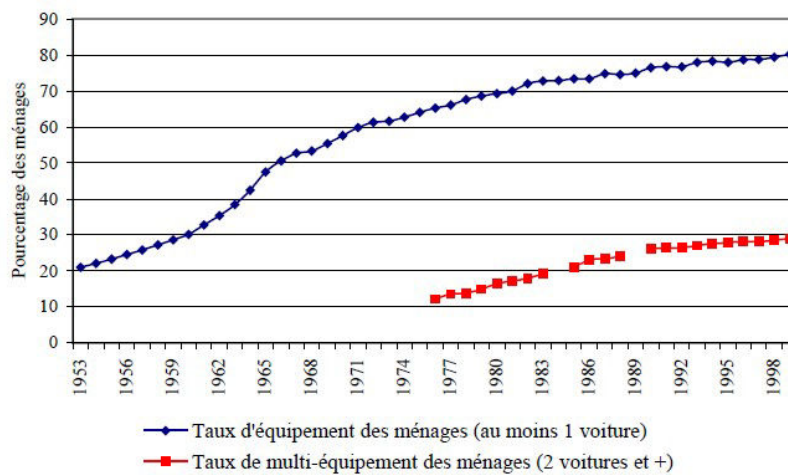
Graphique 0-1 Évolution du parc de voitures particulières et commerciales



Source : INSEE, (2003 : 305)

Toujours selon l’INSEE, le taux d’équipement des ménages français, de 20% en 1953 a atteint 78% en 1999 puis 81% en 2010. A partir des années 1970, le phénomène est entretenu par l’acquisition d’une seconde voiture (multimotorisation) par les ménages, comme le montre le Graphique 0-2 ci-dessous. Le parc à l’usage des ménages, selon les « enquêtes nationales transport » des années 1982, 1994 et 2008 réalisées par l’INSEE est passé de 18 884 000 véhicules pour l’année 1982 à 26 183 000 en 1994 puis à 32 718 000 en 2008, soit une hausse de plus de 73% sur la période 1982 – 2008.

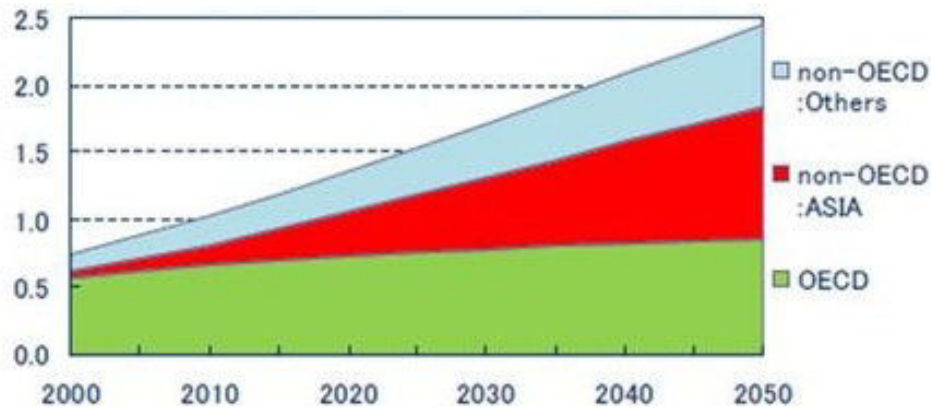
Graphique 0-2 Taux d’équipement et de multiéquipement des ménages français métropolitains en automobile



Source : INSEE, (2003 : 304)

Certains scénarios prévoient 2,5 milliards de véhicules (automobiles) en 2050, la croissance des grands émergents étant pour une grande part responsable de cette augmentation.

Graphique 0-3 Parc Mondial de véhicules en milliards d'unités (IEEJ)



Source : Institute of Energy Economics, Japon.

Longtemps vécue comme synonyme de progrès, symbole d'indépendance ou de richesse, l'automobile voit cependant son image se ternir avec la prise en compte croissante de la contrainte environnementale d'une part, et la menace du « peak oil », d'autre part. Le milliard de voitures actuellement en circulation dans le monde est le plus grand consommateur de pétrole. Le secteur des transports représente à lui seul la moitié de la consommation mondiale de pétrole - les transports routiers consommant à eux seuls près de 80% de cette moitié. « *L'automobile est pointée du doigt comme étant l'un des principaux contributeurs au réchauffement de la planète engendré par les gaz à effet de serre (GES). En particulier par le CO₂ d'origine fossile envoyé dans l'atmosphère par les pots d'échappement de 700 millions de voitures en circulation dans le monde, chiffre qui devrait atteindre 1,2 milliards en 2020 et qui pourrait quadrupler d'ici à 2050 [...]* » (J.J. Cornaert, 2010 : 7-8).

La recherche des facteurs les plus polluants classe en effet le transport (automobile) au premier rang des secteurs contribuant au réchauffement climatique au travers des émissions de gaz à effets de serre (GES) dont le dioxyde de carbone (CO₂). Le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) dans ses différentes études (2008, 2009, 2010) révèle que les émissions de CO₂ contribuent à

hauteur de 70% au « *Pouvoir de Réchauffement Global parmi les gaz à effet de serre direct pris en compte dans le protocole de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆)* » (CITEPA, 2009). Le CITEPA rappelle que les émissions liées au secteur du transport en général et plus particulièrement du transport de personnes (automobiles) ont augmenté de 490% entre 1960 et 2007 et sont liées à l'augmentation du trafic qui a crû de 513% sur la même période. Au niveau mondial, le secteur des transports représente 21% du total des émissions de CO₂ et arrive au second rang derrière l'industrie. Le transport étant une source mobile et dispersée de gaz à effet de serre, les pollutions qu'il génère sont d'autant plus difficiles à combattre.

Les enjeux liés à la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES) sont devenus un objectif important tant au niveau des États qu'au niveau mondial. De plus, la majorité des chercheurs s'accordent pour établir une corrélation entre ces émissions et le réchauffement climatique⁴, lequel engendre des coûts importants tant financiers qu'humains. Enfin, aux gaz à effet de serre viennent encore s'ajouter les microparticules dont l'impact sur la santé, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'International Agency for Research Cancer (IARC) se traduit par de nombreux décès liés à des cancers. Les coûts socio-économiques qui en découlent sont de nature à renforcer les actions en faveur de mesures environnementales. Le rapport Stern (2007) soulignait que ces émissions étaient liées à l'activité économique, et principalement à la combustion des énergies fossiles qui induisaient un changement climatique non pas au niveau d'une région mais de la planète et attirait l'attention sur la nécessité de mettre en place des politiques ciblées. La France, en ratifiant le Protocole de Kyoto visant à la mise en œuvre de la Convention Climat sur le Changement Climatique de l'Organisation des Nations Unies, en 1997, a montré sa volonté d'agir en faveur de l'environnement. Mais son engagement est allé plus loin que les engagements qu'elle avait pris par sa signature. Son premier engagement a été le maintien des émissions de gaz à effet de serre au niveau de l'année 1990 et ce jusqu'en 2010 avant de prendre la

⁴ Le débat autour de cette corrélation, bien que largement représenté en France ne sera pas abordé ici. Si certains constructeurs automobiles ont eu la tentation de remettre en cause les effets néfastes des émissions de GES sur le climat (Lefèvre, 2004), ils manifestent désormais largement leur intérêt pour une « voiture propre » ; en attestent les sites des grands constructeurs. Lefèvre M. (2004).

décision de réduire ces émissions de 20% d'ici à 2020 et de les diviser par quatre (facteur 4) en 2050⁵.

En raison des dégâts causés par la pollution générée par la combustion des carburants et de la fin annoncée du pétrole comme énergie abondante, l'automobile, telle qu'elle existe depuis un siècle, voit donc son avenir largement questionné. Les jours du moteur thermique semblent aujourd'hui comptés compte tenu des contraintes qui pèsent sur les motorisations, qu'elles soient essence ou diesel. Les constructeurs se voient imposer des normes de plus en plus contraignantes à la fois sur les taux d'émission de CO₂ et sur les consommations. « *Transport accounts for around a third of all final energy consumption in the EEA member countries and for more than a fifth of greenhouse gas emissions. It is also responsible for a large share of urban air pollution as well as noise nuisance. Furthermore, transport has a serious impact on the landscape because it divides natural areas into small patches with serious consequences for animals and plants* »⁶.

L'industrie automobile est donc confrontée à un double défi : d'une part, la fin annoncée des réserves de pétrole⁷ et, d'autre part la réduction des rejets de gaz à effet de serre, principalement le CO₂. A ces deux contraintes vient s'ajouter le spectre d'une possible interdiction du diesel en Europe et plus particulièrement en France, sans qu'une échéance n'ait encore été fixée. Cette éventualité est liée à la publication par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) d'un rapport de l'International Agency for Research Cancer⁸ (06/2012) reconnaissant que « *les particules dues au diesel étaient cancérigènes* ».

⁵ JORF n°163 du 14 juillet 2005 page 11570 texte n° 2. LOI n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique

⁶ European Environment Agency, le 21 décembre 2012.

⁷ Le débat sur la date d'un éventuel « *peak oil* » trop éloigné du cœur de l'analyse, ne sera pas développé ici. Il convient néanmoins de rappeler qu'aucun consensus n'émerge à ce jour. La récente autonomie énergétique des Etats-Unis grâce à l'exploitation des gaz de schiste tend à renforcer encore le débat sur sa pertinence. "The term Peak Oil refers to the maximum rate of the production of oil in any area under consideration, recognizing that it is a finite natural resource, subject to depletion." (Colin Campbell, Association for the Study of Peak Oil&Gas, <http://www.peakoil.net/about-peak-oil>).

⁸ http://press.iarc.fr/pr213_E.pdf

Les constructeurs automobiles ne contestent pas ce fait, néanmoins le Groupe Peugeot Citroën (PSA) impute ces émissions nocives aux véhicules anciens non équipés de filtres à particules, ce qui soulève la question du vieillissement du parc automobile. Selon les statistiques du Comité Français des Constructeurs Automobiles (CCFA), depuis une dizaine d'années, un net vieillissement du parc a été constaté. En effet, alors que son âge moyen était de 6,2 ans en 1975, il est passé à 7,5 ans en 2000 et à 8,7 ans en 2008. Cet état de fait est dû en grande partie d'une part à une plus grande durée de vie des voitures et d'autre part à la « diésélisation » du parc automobile en raison d'une fiabilité et d'une longévité réputées plus importantes et du coût du carburant bénéficiant d'une taxation plus favorable que celle de l'essence. A ce phénomène se rajoutent deux facteurs aggravants, la multi-motorisation (les foyers disposent de plusieurs voitures) et l'accroissement du poids des véhicules lié à un équipement de plus en plus complet : climatisation, ABS, airbags, et autres systèmes de sécurité.

La publication anticipée du texte du « *projet de réglementation européenne fixant les futurs objectifs d'émissions de CO₂ des véhicules particuliers* » (The Guardian, Juin 2012) semble venir renforcer l'hypothèse d'un durcissement de la législation. En effet, le nouvel objectif est fixé à 95g de CO₂/km, « *ce qui représente une baisse de 45% des émissions de CO₂ des véhicules, par rapport à 2007* ». Dans l'industrie automobile, cette contrainte constitue une tendance lourde qui ne peut être ignorée. La Commission Européenne, dans le texte législatif, précise sa « *vision des éco-innovations que les constructeurs pourront utiliser pour atteindre leur objectif européen de réduction des émissions de CO₂* ».

Il convient dès ici d'apporter deux précisions. La première est d'ordre sémantique, le terme « d'éco-innovation » sera mobilisé dans ce travail, bien que d'autres termes comme innovation verte ou environnementale soient parfois utilisés pour décrire la même réalité. La seconde porte précisément sur cette réalité : le terme « éco-innovation » qualifie toute innovation dont le but est de réduire les impacts négatifs sur l'environnement. Cette posture est en cohérence avec le texte de la Commission Européenne qui qualifie « *d'éco-innovations potentielles* » les dispositifs permettant de recharger les batteries grâce à des panneaux solaires incorporés au toit des véhicules, les éclairages de type LED (diodes électro-luminescentes), les générateurs

thermoélectriques ainsi que les systèmes permettant de stocker la chaleur produite par le moteur.

Les transports en général et l'automobile en particulier font donc désormais l'objet d'une attention à tous les niveaux (politique, réglementaire) qui contraint les acteurs du secteur à innover pour tenter de faire face à ces pressions de différentes natures. L'automobile se voit désormais « dans l'obligation » d'innover pour intégrer une double contrainte « exogène » au secteur : la pression en faveur de l'environnement et l'épuisement annoncé de la ressource nécessaire à son utilisation. **Ce sont précisément les impacts de ces pressions sur le processus d'innovation dans le secteur de l'automobile qui constituent l'objet de ce travail.**

Afin d'analyser la nature du processus, les éléments théoriques proposés par Schumpeter et prolongés par les auteurs évolutionnistes seront mobilisés. Ils permettent en effet d'établir une distinction fondatrice entre innovation incrémentale et innovation de rupture. Ils permettent également de qualifier le moment clé auquel se situe l'automobile aujourd'hui. C'est bien ici l'automobile en général, en tant qu'activité caractéristique du capitalisme contemporain qui retient l'attention, l'exemple français étant souvent mobilisé pour illustrer le propos. Néanmoins, la production de véhicules individuels constituant désormais une activité mondialisée et un marché oligopolistique dominé par une poignée de constructeurs, les comparaisons internationales s'avèreront parfois nécessaires. Le timing de l'innovation dans l'automobile révèle en effet des positionnements bien différenciés avec des constructeurs japonais proactifs dans le domaine de l'hybride dès la fin du 20^{ème} siècle, et des constructeurs américains contraints par la crise des *subprimes* à se tourner vers l'État pour financer leur transition technologique.

Il convient de préciser encore que les termes « industries » et « secteurs » sont mobilisés indifféremment dans la littérature, et si certains appliquent le concept de « systèmes sectoriels d'innovation », d'autres analysent l'avenir de l'industrie de l'automobile. Cette indétermination ne sera pas levée dans la thèse.

La mobilisation de cet appareillage conceptuel pour analyser les évolutions de l'innovation dans le secteur automobile permet de montrer que les constructeurs, sous la pression d'une double contrainte (environnementale et énergétique), s'engagent dans un processus d'éco-innovations à partir de la fin des années 1990. En cherchant à s'émanciper des carburants fossiles et des pollutions qu'ils engendrent, les constructeurs vont initier ce qui est qualifié dans la thèse d'éco-innovations de rupture. Il est ensuite montré que ces dernières sont en train de provoquer un changement de régime technologique dans le secteur, lui-même porteur potentiellement d'un nouveau sentier de dépendance fondé sur une automobile décarbonée.

La démonstration s'organise en trois temps.

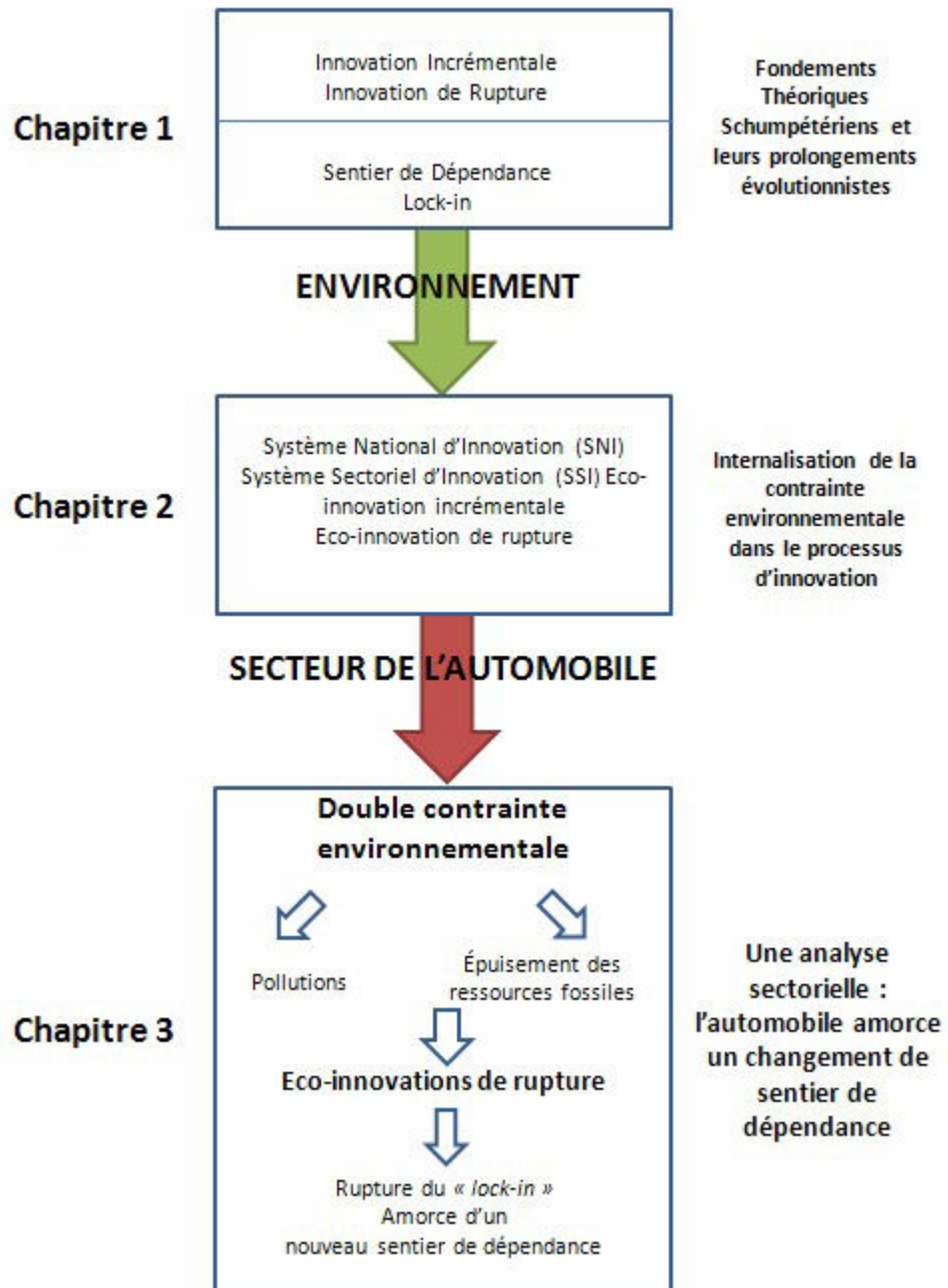
Le **premier chapitre** poursuit un triple objectif. Il permet tout d'abord de préciser les bases de l'analyse schumpétérienne de l'innovation en définissant les différents concepts théorisés par l'auteur puis d'établir clairement la distinction existant entre « *innovation incrémentale* » et « *innovation de rupture* », deux concepts fondamentaux pour l'analyse menée ici. Ce chapitre montre ensuite en quoi les concepts évolutionnistes nécessaires à l'analyse constituent des prolongements de l'analyse schumpétérienne. La cohérence épistémologique entre les concepts théorisés par Schumpeter et certains des concepts développés par les « économistes évolutionnistes » est ainsi établie, ce qui autorise par la suite leur mobilisation conjointe. Trois des concepts évolutionnistes « *path dependence* » (sentier de dépendance), « *lock-in* » (verrouillage) et « *régime technologique* » sont présentés comme complémentaires des deux catégories d'innovations déclinées par Schumpeter.

Le **second chapitre** cherche ensuite à caractériser la phase actuelle du secteur de l'automobile en intégrant la préoccupation environnementale aux propositions théoriques déjà présentées. Il montre que de la même façon, la distinction peut être faite des éco-innovations de rupture et des innovations incrémentales. Le contexte institutionnel de l'innovation, tant au niveau international (Protocole de Kyoto), que national (Système national d'innovation) ou sectoriel (Système sectoriel d'innovation, conditionne en effet largement l'évolution observée dans le secteur de l'automobile.

Par suite, le **troisième chapitre** réalise une analyse des innovations dans le secteur automobile et montre que la double contrainte pesant sur les constructeurs conduit ces derniers à intégrer ces considérations tout au long du cycle de vie du véhicule. Si le renouvellement du principe de motorisation constitue le cœur de ce bouleversement, les recherches d'innovation portent désormais jusqu'au questionnement sur la fin de vie de leurs produits.

Les résultats de ce chapitre permettent de conclure que, d'une part le processus d'innovation dans l'automobile est désormais dominé par les éco-innovations et que, d'autre part, en autorisant l'émancipation vis-à-vis des carburants d'origine fossile, ces dernières constituent bien des éco-innovations de rupture. Elles sont ici lues comme le point de départ d'un nouveau sentier de dépendance appelé à se substituer au précédent, fondé sur l'utilisation des énergies fossiles, dans lequel les constructeurs étaient « verrouillés » (« *lock-in* ») jusqu'à présent.

Figure 0-1 – Architecture de la thèse



CHAPITRE 1

L’INNOVATION : DE SCHUMPETER AUX ÉVOLUTIONNISTES - UN PROCESSUS INCREMENTAL

«Joseph Schumpeter stands, without question, as one of the great social scientists of the twentieth century, an intellectual giant whose work not only inspired research in the role of innovation in the development of capitalist economies, but also provided the foundations for renewed interest in the economic sociology of creative destruction and economic development. His contribution to these themes also inspired the development of a specific evolutionary approach to the role of enterprise and innovation in the functioning of modern capitalism [...] ». Stanley Metcalfe, 2009 : 53

Adam Smith fut le premier à envisager explicitement l’innovation dans son ouvrage « *Recherches sur la Nature et la Cause de la La Richesse des Nations* » (1776). Se référant à la manufacture d’épingles dont la production avait été scindée en dix-huit opérations - ce qui permettait une production deux cent quarante fois supérieure, Smith écrit (1776, livre I : 18)) « *cette grande augmentation dans la quantité d’ouvrage qu’un*

même nombre de bras est en état de fournir, en conséquence de la division du travail, est due à trois circonstances différentes : premièrement, à un accroissement d’habileté dans chaque ouvrier individuellement ; deuxièmement, à l’épargne du temps qui se perd ordinairement lorsqu’on passe d’un ouvrage à un autre ; et troisièmement, à l’invention d’un grand nombre de machines qui facilitent et abrègent le travail, et permettent à un homme de remplir la tâche de plusieurs » Il détaille l’organisation mise en place ainsi que chacune des opérations issues de la division du travail. Bien qu’il s’agisse d’un procédé inédit, il n’utilise pas le terme innovation.

« Le procédé utilisé à L’Aigle en Normandie a été décrit en détail par les encyclopédistes. Il innove par les outils adaptés à chaque étape de la fabrication. Ces outils ont été décrits avec l’ouvrier les manipulant. Les observateurs du 18e siècle ont ainsi inventé le concept d’« opération », qu’on nommerait aujourd’hui « poste de travail. La description des 14 (ou 18) opérations fait croire à une spécialisation des ouvriers comme s’ils travaillaient à la chaîne » (Peaucelle, 2007).

Par cette opération qui consistait à diviser le travail en une suite d’opérations, Smith introduisait alors la notion d’innovation modifiant l’organisation du travail, sans pour autant la nommer. Il fera également le constat qu’en raison d’une division du travail accrue, « *l’innovation* » était passée aux mains d’une nouvelle catégorie professionnelle chargée d’une part, de maximiser l’efficacité des ouvriers en matière de production et d’autre part d’épargner du temps au travail. Il les qualifiera de « *savants* ».

Alors que Smith considère que les machines ne sont pas un obstacle à l’innovation : « *Chaque individu acquiert beaucoup plus d’expérience et d’aptitude dans la branche particulière qu’il a adoptée ; il y a au total plus de travail accompli, et la somme des connaissances en est considérablement augmentée* » (1995 : 77) et sont un bienfait pour les ouvriers : « *tout le monde sent combien l’emploi des machines propres à un ouvrage abrège et facilite le travail* » (Smith, 1813 :13), Ricardo s’inquiètera du sort des ouvriers : « *Mais je suis désormais convaincu que la substitution des machines au travail porte souvent atteinte aux intérêts de la classe des travailleurs* » (Ricardo : 1821 : 401). Il anticipe la réduction de la demande de main-d’œuvre à laquelle sera substitué l’usage de machines – substitution capital-travail, et le chômage qui pourra en découler. La réduction de la demande de travail, en induisant du chômage, sera

préjudiciable à la « *classe laborieuse* » et sera à l’origine de la détresse et de la pauvreté des ouvriers privés de leurs revenus.

Marx sera encore plus critique, considérant que loin de libérer l’ouvrier, la machine le rend esclave des cadences imposées par les responsables de production « *La machine est innocente des misères qu’elle entraîne, ce n’est pas sa faute si, dans notre milieu social, elle sépare l’ouvrier de ses vivres. Là où elle est introduite elle rend le produit meilleur marché et plus abondant* » (Marx, 1872 : 379). Les machines auraient dû contribuer au mieux-être des ouvriers, mais c’est l’usage qui en est fait par les « *capitalistes* » qui est critiqué. Marx considère que la division du travail est une forme d’aliénation que subissent les ouvriers dans le cadre de leur travail : « *dans son travail, l’ouvrier ne s’affirme pas, il se nie ; il ne s’y sent pas satisfait mais malheureux, il n’y déploie pas une libre énergie, mais mortifie son corps et ruine son esprit* » (Marx, 1872 : 396). La même analyse critique sera faite à propos du taylorisme en raison du manque de respect pour l’humain (Antonio Negri, 1978 ; Mario Tronti⁹, Benjamin Coriat, 1979 ; Bergeron et Maiullari-Pontois 2000).

Keynes avait noté l’impact négatif de l’utilisation de ces nouvelles techniques, représentées par les machines : « *Nous sommes affligés d’une maladie nouvelle dont certains lecteurs peuvent bien ignorer le nom mais dont ils entendront parler dans les années à venir, et qui est le chômage technologique* » (Keynes, 1930 : 364). Cette situation avait été perçue par Ricardo. « *L’innovation est en effet l’application d’une idée conduite jusqu’à son exploitation effective dans la société. L’innovation est donc le résultat concret d’une idée qui atteint son objectif parce qu’elle correspond à deux champs de possibilités : scientifiques et techniques d’une part, sociétales d’autre part* » (Portnoff, 2004 : 22). Les débuts ratés du téléphone « portable » constituent un exemple révélateur de la nécessité de correspondre aux deux champs faute de quoi l’innovation ne fera pas l’objet d’une appropriation et d’une adoption par le public visé. En effet, cette innovation ne rencontra pas le succès escompté en raison de multiples facteurs : prix du téléphone, poids élevé, volumineux, coût des communications le réservant à un public restreint, etc.

⁹ Antonio Negri a été influencé par Mario Tronti. Tous deux faisaient partie de l’extrême gauche italienne. Les idées de Tronti ont été diffusées au travers de la revue « *Quaderni Rossi* ».

Comme il est possible de le noter à la lecture d'auteurs tels que Smith ou Ricardo, l'innovation constitue un champ d'analyse quasiment aussi ancien que l'économie, en tant que discipline. Le fait que les grands auteurs – Smith, Ricardo, Marx, Keynes, s'en préoccupent montrent son caractère central. Néanmoins, avant Schumpeter, il n'existait pas de théories économiques centrées sur l'innovation en tant que telle. Le progrès technique, était tout au plus étudié afin de mettre en lumière ses effets, positifs ou négatifs. Il faut attendre Schumpeter (1954) pour avoir une théorie de l'innovation.

La **première section** de ce chapitre s'attachera à approfondir les fondements de la vision schumpétérienne. En effet, Schumpeter a posé les bases de l'étude de l'innovation et peut être considéré comme le fondateur de l'économie de l'innovation et du progrès technique. Thomas McCraw(2009) n'hésite pas à intituler son ouvrage traitant de la « *création destructrice* » « *Prophet of Innovation : Joseph Schumpeter and Creative Destruction* », soulignant ainsi le caractère pionnier de l'analyse schumpétérienne de l'innovation.

La **deuxième section** sera consacrée à l'approche évolutionniste de l'innovation - courant de pensée largement initié par Nelson et Winter (1982) - afin de montrer qu'elle peut être lue comme un prolongement des travaux de Schumpeter. En les approfondissant et en apportant de nouveaux éléments d'analyse, elle constitue ainsi une « *innovation incrémentale* » par rapport aux propositions schumpétériennes.

SECTION 1 : LA VISION SCHUMPETERIENNE : FONDEMENT DE LA PENSEE CONTEMPORAINE DE L'INNOVATION

« *It is appropriate to begin with Schumpeter and the central role of innovation* » (Metcalfe, 2009 : 54). Comme le souligne Metcalfe à propos de Schumpeter, sa vision du capitalisme en tant que système dynamique a été développée dans ses œuvres : *the Theory of Economic Development* (1912), puis *Business Cycles* (1939). Elle évoluera avec *Capitalism, Socialism and Democracy* (1943) mettant en lumière le rôle de la compétition entre firmes dans un capitalisme concurrentiel.

Selon Schumpeter, les innovations ne peuvent apparaître par continuité ou de manière endogène à partir des techniques existantes. Il qualifie les innovations apportant des améliorations (à des produits, des techniques existantes) d'incrémentales. Pour l'auteur, il s'agit de « *petits déplacements* ». Il n'en tient pas compte dans son analyse et n'inclut pas les processus cumulatifs. Sa vision de l'innovation est celle d'un processus linéaire comportant trois phases distinctes, invention, innovation, imitation.

Caccommo souligne le fait que « *les imitateurs d'aujourd'hui deviennent progressivement les innovateurs de demain* » (Caccommo, 2005 : 26) et rappelle que l'histoire technologique du Japon a commencé par l'étude et la reproduction des technologies développées sur d'autres continents. Rosenberg (1974, 1982) et Caccommo (2005) ont mis en lumière le fait que toute innovation est en rapport avec d'une part une « *connaissance tacite* » et, d'autre part était liée à un savoir-faire et/ou une expérience, voire une information, un process protégé par un brevet, par exemple. La « *valeur économique d'une innovation* » serait donc, selon ces auteurs, liée à ces facteurs. C'est en étudiant les biens à fort contenu technologique produits à l'ouest et en comprenant de quelle manière ils avaient été construits que le Japon a progressivement acquis une expérience et un savoir-faire qui lui ont permis par la suite de devenir fortement innovateur.

« *La propension à innover et la propension à inventer relèvent de deux logiques différentes* » (Caccommo, 2005 : 27). Cette distinction a été faite par Schumpeter qui distingue l'inventeur de l'innovateur, à savoir l'entrepreneur qui prend le risque de faire passer une invention au stade de l'innovation en la produisant en vue de son

introduction sur le marché. « *L’entrepreneur n’est pas pour lui (Schumpeter) l’inventeur qui fait une découverte, mais l’individu qui saura l’introduire dans l’industrie* » (Perroux, 1994 : 146), lui faisant ainsi acquérir le statut d’innovation. C’est là le point le plus important car, toute invention, si elle n’est pas exploitée industriellement ne peut acquérir le statut d’innovation. « *Ce dernier peut innover à partir de connaissances existantes ou totalement nouvelles. Il peut innover à partir de sa propre recherche ou grâce à celle des autres* » (Cacomo, 2005 : 27). L’auteur montre ainsi que l’innovation peut avoir de multiples sources puisque l’entrepreneur peut être à l’origine d’innovations à partir de ses propres travaux ou de ceux d’autres entrepreneurs. Ainsi, il est possible d’imaginer que les fabricants de rasoirs électriques ont pu s’inspirer des rasoirs mécaniques multi-lames pour créer leurs nouveaux modèles (Braun, séries 3, 5 et 7).

Schumpeter, dans le prolongement de son étude du progrès technique et plus particulièrement de l’innovation, a analysé la fonction de l’entrepreneur et construit une théorie selon laquelle celui-ci est à la fois une fonction et l’agent qui exerce cette fonction. Cette approche est novatrice et se démarque de celle des auteurs classiques - Adam Smith ou David Ricardo, qui n’avaient pas pris en compte le « *rôle de l’entrepreneur* » en tant que tel. Karl Marx n’avait pas non plus analysé la fonction d’entrepreneur. L’explication semble résider en grande partie d’une part, dans le fait qu’à l’époque où les auteurs ont développé leurs théories économiques, les entreprises étaient de plus petite taille - elles seraient classées aujourd’hui dans la catégorie PME/PMI¹⁰, et d’autre part, dans le fait que le propriétaire et le dirigeant de l’entreprise étaient une seule et même personne.

Schumpeter l’avait déjà noté, l’entrepreneur innovateur est un personnage doté de qualités particulières - dont la clairvoyance - qui le différencient des autres entrepreneurs. L’image du trapéziste volant illustre le niveau de risque encouru. En effet, si le trapéziste peut bénéficier d’un filet de sécurité, ce n’est pas le cas de l’entrepreneur. Si ce dernier ne « court pas le risque » d’innover, certes il ne s’expose pas à une erreur éventuelle, mais il prend un risque plus élevé encore, celui de voir un concurrent être plus réactif que lui et qui en innovant pourra s’assurer non seulement une position dominante sur le marché et voir ses parts de marché augmenter, mais

¹⁰ Petites et Moyennes Entreprises (PME), Petites et Moyennes Industries (PMI)

également s’assurer des profits plus importants. Ainsi, si innover c’est courir un risque, ne pas innover revient à courir un risque plus grand.

Schumpeter a effectué un travail fondateur sur l’innovation. D’une part, il a analysé et mis en lumière les « *cas* » - en d’autres termes les situations, dans lesquelles l’innovation peut se produire (1.1) et, d’autre part développé des concepts fondamentaux pour l’étude de l’innovation, à savoir la destruction créatrice (1.2), les grappes d’innovation et les innovations incrémentales (1.3) et les innovations de rupture (1.4).

1.1 L’innovation selon Schumpeter : éléments de cadrage

Schumpeter, comme le souligne Stoneman (2007 : 377) est considéré comme le « *Père de l’analyse moderne du changement technologique* ». Schumpeter (1911, 1934) avait défini que le changement technologique s’opérait selon trois phases : l’invention, puis l’innovation et enfin la diffusion (Figure 1-1).

Figure 1-1 Les 3 phases du changement technologique



Source : Réalisé par l’auteur d’après Schumpeter (1911, 1934)

Dans la Figure 1-1 , il est à noter que chaque phase se situe à un niveau supérieur à la précédente. Ces phases ne sont pas déconnectées les unes des autres car, par exemple le développement d’une idée nouvelle (phase 2) pourra générer de nouvelles idées qui alors se retrouveront en phase 1. Le passage de la phase 1 (invention) à la phase 2 (innovation) illustre la conception de l’innovation selon Schumpeter selon laquelle une invention n’acquiert le statut d’innovation qu’à partir du moment où elle est destinée à être produite et à apparaître sur le marché. La phase 3 est le moment où cette nouvelle technologie se diffuse et se propage à l’ensemble du marché. Stoneman (2007 : 377) indique que l’étroite relation existant entre ces trois phases est plus prise en compte que par le passé.

L'objectif de ce point est double. Il permet d'une part, de préciser les hypothèses de l'analyse schumpétérienne de l'innovation et d'autre part, d'identifier les cas dans lesquels elle apparaît.

En considérant que les innovations ne peuvent apparaître par continuité ou de manière endogène à partir des techniques existantes, Schumpeter exclut l'apprentissage par la pratique, « *learning by doing* » et écarte l'idée selon laquelle, « *les vieilles combinaisons, en se transformant deviennent automatiquement de nouvelles* » (Schumpeter, 1911 : 94). Pour l'auteur, c'est par de nouvelles combinaisons des facteurs de production qu'il est possible de passer de la notion de « *circuit* » à celle de « *l'évolution* », c'est-à-dire d'une phase statique à une phase dynamique.

C'est à partir de cette transition qu'il identifie les cinq « *cas* » dans lesquels il considère que l'innovation peut se produire :

1. « *Fabrication d'un bien nouveau, c'est-à-dire encore non familier au cercle des consommateurs, ou d'une qualité nouvelle d'un bien* ».

La fabrication d'un bien nouveau peut être assimilée à l'introduction d'une innovation de produit. Le Post-It développé par la Société 3M constitua non seulement une innovation de produit mais également une rupture par rapport à la production de l'entreprise qui avait acquis une solide réputation en matière de performances de collage.

2. « *Introduction d'une méthode de production nouvelle, c'est-à-dire pratiquement inconnue de la branche intéressée de l'industrie; il n'est nullement nécessaire qu'elle repose sur une découverte scientifiquement nouvelle et elle peut aussi résider dans de nouveaux procédés commerciaux pour une marchandise* ».

Ici, il s'agit d'une innovation de procédé ou de process caractérisée par de nouvelles techniques ou de nouveaux modes de production. Le passage du moulin en pierre actionné manuellement ou par des animaux au moulin à vent actionnant une meule a permis outre une plus grande efficacité, un meilleur rendement. De même, la machine à vapeur transforma radicalement l'économie. Caccomo (2005 : 37) rappelle « *qu'en 1870, les machines à vapeur avaient une force de 46 millions de chevaux-vapeur : cela signifie qu'il aurait fallu 400 millions de chevaux vivants pour accomplir le même travail* ». Les chiffres parlent d'eux-mêmes pour justifier la substitution de la machine à la force animale. Sans compter le fait que les déjections chevalines étaient à l'origine de pollutions tant visuelles qu'olfactives et de problèmes d'hygiène.

3. « *Ouverture d'un débouché nouveau, c'est-à-dire d'un marché où jusqu'à présent la branche intéressée de l'industrie du pays intéressé n'a pas encore été introduite, que ce marché ait existé avant ou non* ».

Internet a permis le développement de nouvelles formes de vente à distance, jusque-là inédites.

4. « *Conquête d'une source nouvelle de matières premières ou de produits semi-ouvrés; à nouveau, peu importe qu'il faille créer cette source ou qu'elle ait existé antérieurement, qu'on ne l'ait pas prise en considération ou qu'elle ait été tenue pour inaccessible* ».

L'utilisation de l'atome à des fins civiles – les centrales nucléaires, pour produire de l'électricité constitue un exemple révélateur.

5. « *Réalisation d'une nouvelle organisation, comme la création d'une situation de monopole (par exemple la trustification) ou l'apparition brusque d'un monopole* » (Schumpeter, 1911 : 78-79).

Le taylorisme, le fordisme, le toyotisme et ses différentes composantes (Kanban, Kaizen¹¹, ...) en sont des illustrations. Ces trois types d'organisation du travail s'inscrivent dans une démarche qui dépasse la division du travail vue par Adam Smith et chacune constitue une innovation.

Le taylorisme avait pour objectif principal l'augmentation de la productivité. Le fordisme, prolongeant les principes de l'OST visera les gains de productivité et à son tour introduira des innovations : les convoyeurs apportant les pièces devant les ouvriers, la standardisation, le « *five dollar a day* ». Le toyotisme, bien que considéré comme une amélioration de l'OST, est classé comme une Nouvelle Forme d'Organisation du Travail -NFOT (Shimizu, 1999). En effet, dans un contexte devenu plus concurrentiel, le toyotisme permet de répondre à la demande par une plus grande flexibilité de la production. De nombreux principes tels que le Kanban, le Kaizen ou les Cinq Zéros sous-tendent cette forme d'organisation du travail qui a été adoptée par de nombreuses industries.

À partir de ce que Schumpeter appelle des « *cas* », il devient par suite, possible d'identifier les objets de l'innovation : **créer un bien, mettre en place une méthode de production, trouver un débouché, découvrir une source de matières premières, déployer une organisation.**

¹¹ Masaaki Imai, 1986

Ces innovations ont plusieurs finalités : une modification organisationnelle ou dans l’outil de production peut permettre à une entreprise de nouvelles productions qu’elle n’aurait pas été en mesure de réaliser dans l’ancienne configuration.

Le Service des Études et des Statistiques Industrielles¹² (SESSI) relevait en 2006 que 50% des entreprises mettant en place des innovations organisationnelles aboutissaient à une meilleure qualité de production. S’il s’agit de produits existants, le rendement de la production peut être amélioré. Dans tous les cas, une meilleure organisation et/ou un nouvel outil de production sont susceptibles de réduire les coûts de production et de permettre une plus grande souplesse dans le cycle de production.

Il est intéressant de noter que Ricardo dans son ouvrage « *Des Principes de l’Économie Politique et de l’Impôt* » (1847) distinguait déjà plusieurs « configurations » dans lesquelles l’innovation pouvait se produire et examinait l’impact produit par leur introduction. Schumpeter reprendra cette catégorisation dans son étude.

Les « cas » mentionnés précédemment seront mobilisés dans le chapitre 3. En effet, dans le cadre des mutations qui traversent l’industrie automobile, des biens nouveaux sont (seront) produits (hybrides, électriques) ouvrant des marchés nouveaux, avec des situations provisoires de monopole ainsi que de nouveaux modes de production. Dès lors, en suivant les hypothèses schumpétériennes, le « nouveau » sera appelé à remplacer progressivement l’« ancien » jusqu’à le faire disparaître avant d’être à son tour remplacé.

1.2 La destruction créatrice

Schumpeter appelle ce mouvement cyclique la « destruction créatrice ». En combinant de nouvelles ressources à de nouvelles idées, l’entrepreneur ouvre la voie à de nouvelles phases de développement économique. La « *destruction créatrice* » peut se définir au travers de ses deux phases. En effet, la création d’un bien nouveau par exemple, va entraîner progressivement la disparition de celui qu’il remplace. Si d’un côté la production d’un bien nouveau va créer de l’emploi et voir prospérer l’entreprise qui le produit, de l’autre côté celles qui produisaient le bien remplacé vont voir leurs parts de

¹² Les missions du SESSI depuis le 1^{er} janvier 2009 relèvent de l’INSEE

marché se réduire ainsi que leurs profits. Elles pourront être ainsi amenées à cesser leur activité et à licencier leur personnel.

Pour Schumpeter, « *en règle générale, le nouveau ne sort pas de l'ancien mais apparaît à côté de l'ancien, lui fait concurrence jusqu'à le ruiner et modifie toutes les situations de sorte qu'un processus de mise en ordre est nécessaire* » (Schumpeter, 1954 : 626).

Telle que décrite par l'auteur, la « *destruction créatrice* » induirait deux type d'effets : le premier, négatif, fait référence aux entreprises vieilles et aux productions rendues obsolètes par « *le nouveau* ». Il s'agit essentiellement d'une réduction des investissements et de restructurations conduisant au chômage. Le second effet, positif, vient des entreprises innovantes : investissements en forte croissance induisant la création d'emplois et par voie de conséquence le développement économique. La destruction créatrice, en éliminant les entreprises vieillissantes (faute d'avoir innové), décrit un processus comparable à celui de la sélection naturelle de Darwin.

Fréry (2010 : 5) résume ainsi la position de l'entreprise et de son dirigeant face à l'innovation : « *L'innovation passe forcément par une destruction créatrice. On peut en avoir peur mais c'est un cycle naturel. [...]. Pour le dirigeant d'entreprise, la démarche n'a rien de confortable ni de rassurant. Face à la nécessité d'innover, il lui faut jouer au trapéziste volant qui lâche sa barre avant d'attraper la suivante et se jette momentanément dans le vide. S'il ne prend pas l'initiative, un concurrent le fera à sa place et redéfinira les conditions du marché à son avantage* ».

L'image selon laquelle, « *l'innovation n'est pas la multiplication des diligences produites de façon moderne mais leur élimination par l'avènement du chemin de fer !* » (Schumpeter, 1954) illustre le concept de destruction créatrice mais ne montre pas la rupture que constitue le passage de la diligence au chemin de fer. Il souligne l'idée que, quel que soit le domaine, l'innovation est l'aboutissement d'une idée qui correspond tant à une nécessité technique qu'à un besoin ressenti ou exprimé. Il s'agit donc, comme le rappelle Perrin (2001), de faire correspondre un besoin réel ou potentiel à des solutions réalisables. C'est le marché qui sanctionnera, le cas échéant, l'absence d'adéquation.

En innovant, une entreprise peut-elle profiter d'une mutation qui aurait pu (dû) la détruire ? À chaque vague de nouveaux choix techniques, le problème est de « parier » au bon moment sur la bonne technologie et la bonne application, sans néanmoins ignorer le facteur temps qui sera nécessaire à leur adoption. Les débuts difficiles du concept « Nespresso » en est un exemple. En effet, le prix élevé des cafetières conjugué à la difficulté de trouver les « dosettes » (disponibles au départ sur commande dans les kiosques à journaux) vendues à des prix jugés trop élevés par les clients a freiné sa diffusion. Un ajustement des prix et l'ouverture de boutiques « Nespresso » ont contribué à lever ces freins.

L'entrepreneur-innovateur, tel que défini par Schumpeter, doit à chaque instant prendre des décisions. Il sait que ses choix stratégiques engageront l'entreprise toute entière et qu'une erreur pourrait hypothéquer l'avenir de son entreprise ou, pire encore la livrer, alors qu'elle sera vulnérable, à l'un de ses concurrents. L'application des innovations modifie l'équilibre économique entre les facteurs, les risques d'échec augmentent. La difficulté de prévoir les coûts et les recettes décourage de nouvelles innovations : « [...] ici tout dépend du 'coup d'œil', de la capacité de voir les choses d'une manière que l'expérience confirme ensuite, même si elle ne saisit pas l'essentiel et pas du tout l'accessoire, même et surtout si on ne peut se rendre compte des principes d'après lesquels on agit » (Schumpeter, 1911 : 122). L'auteur met en avant les qualités de perception et d'anticipation de l'entrepreneur ainsi que sa capacité à prendre et à assumer les risques inhérents à ses décisions. « Mais quels risques sommes-nous prêts à prendre sans filet de sécurité ? N'est-ce pas bien souvent la peur d'échouer ou l'incertitude du lendemain qui conduisent les individus à un excès de prudence et découragent les investissements innovants ? » (Aghion, Roulet, 2011 : 48).

À l'époque actuelle, l'entrepreneur doit également, avant toute décision, mesurer les impacts possibles sur le cours de l'action de sa firme. Les actionnaires attendent des dividendes et par là même que l'entreprise fasse des profits. Cette approche peut apparaître en contradiction avec la nécessité de développer la R&D interne. En effet, il s'agit d'investissements qui, certes dans un premier temps, vont impacter négativement le niveau des profits de l'entreprise et donc le montant des dividendes. Mais, ces investissements – s'ils aboutissent à la mise sur le marché de nouveaux produits ou sur de nouveaux process de fabrication ; vont représenter une nouvelle source de profits tant pour l'entreprise et ses actionnaires que pour ses salariés et en augmenter la valeur.

Les innovations sont groupées dans le temps, elles le sont aussi dans l'espace ; elles « *apparaissent dans la même branche industrielle parce que justement la réussite d'un entrepreneur facilite celle des autres* » (Schumpeter, 1939 : 100-101). Après une innovation de rupture, l'économie entre dans une phase de croissance (créatrice d'emplois), suivie d'une phase de dépression, où les innovations chassent les entreprises « dépassées » et provoquent une destruction d'emplois. D'où l'expression de « *destruction créatrice* » employée par Schumpeter.

Ce processus va se développer selon deux axes : qualitatif (nouveaux modes de production) et quantitatif (nouveaux produits donnant lieu à de nouveaux modes de consommation générant ainsi une demande créatrice de nouveaux marchés).

Les nouveaux modes de production et de consommation, les nouveaux produits qui vont se développer à la suite d'une innovation constituent autant d'innovations. Découlant d'une innovation « originelle » également appelée « innovation ancêtre » (Lachat et Lachat, 1987), elles constituent d'une part des grappes d'innovations et, d'autre part des innovations incrémentales en raison des modifications apportées à l'innovation dont elles sont issues.

1.3 Innovations incrémentales et grappes d'innovations

Schumpeter place le progrès technique au cœur de l'économie. Il distingue les innovations incrémentales qu'il considère comme « *de petits déplacements* », des innovations de rupture. Il n'en tient pas compte dans son analyse et n'inclut pas les processus cumulatifs, livrant une vision d'un processus linéaire découpé selon trois temps distincts : l'invention, l'innovation, l'imitation (Figure 1-2).

Figure 1-2 - Vision du progrès technique selon Schumpeter



Source : réalisé par l'auteur d'après Schumpeter

Les innovations incrémentales ne constituent pas un changement majeur dans les conditions d’usage, par opposition aux innovations de rupture qui entraînent une modification profonde des conditions d’usage et peuvent s’accompagner de bouleversements technologiques. Il convient de préciser que les innovations de rupture qui seront abordées au point 1.4 peuvent également comme toute innovation, être à l’origine de « grappes d’innovations ».

L’apparition progressive d’imitateurs va entraîner un renforcement de la concurrence et dans le même temps une forme de banalisation de l’innovation par une plus grande présence sur le marché.

L’innovation incrémentale qu’il qualifie également de « mineure », « *constitue un changement progressif découlant de l’innovation majeure¹³ qui permet d’améliorer et de transformer la technologie maîtresse afin de l’adapter aux spécificités des secteurs et des marchés qui vont l’adopter* » (Cacomo 2005 : 35). Selon Rothwell et Gardiner (1988), il existerait un fort lien entre les innovations incrémentales et le niveau (élevé) de changement technologique. Les auteurs soutiennent la thèse selon laquelle, au cours des périodes présentant un fort taux de changement technologique, le niveau des innovations radicales apparaissant serait relativement faible.

Les innovations incrémentales en tant qu’outil heuristique sont indispensables. En effet, la distinction existant avec les innovations de rupture ne tient que parce qu’il en existe qui ne le sont pas. De même, il est important de noter que les grappes d’innovation – qu’elles soient issues d’une innovation incrémentale ou bien de rupture – peuvent donner « naissance » à leur tour à des innovations de rupture.

Dans l’industrie automobile par exemple, l’innovation que constitue le modèle Nano développé par Tata - un très petit véhicule à bas coût - ne peut être diffusée à l’échelle mondiale. En effet, les normes de sécurité et les attentes des clients sont spécifiques à des continents, à des régions, voire à des pays. Ainsi le modèle vendu en Inde ne sera pas le même que celui qui sera distribué sur le marché européen. Selon le constructeur indien, le modèle européen devrait être plus long de 10 cm, adopter un hayon arrière et

¹³ Dans ce travail, le terme d’innovation de rupture a été préféré au terme d’innovation majeure afin d’éviter toute ambiguïté.

surtout répondre aux standards EuroNCap¹⁴ en matière de sécurité et de crash test. Le prix annoncé diffèrerait également : l'équivalent de 1 500 euros pour le modèle indien contre environ 5 000 euros pour le modèle européen.

Les grappes d'innovations se traduisent par l'apparition dans un temps relativement court, d'un ensemble d'innovations complémentaires, qui exerceront un effet d'entraînement sur l'économie. Le moteur à explosion à la fin du XIXe siècle a eu un effet sur le développement de l'industrie pétrolière, des pneumatiques, du macadam, ...

Dans le cadre des innovations incrémentales technologiques, il s'agit le plus souvent d'améliorations apportées au produit. Si l'avènement de l'ampoule à incandescence a marqué une rupture avec la lampe à pétrole et les becs de gaz, le passage de l'ampoule à incandescence à l'ampoule basse consommation constitue une innovation incrémentale.

Pour S. Lachat et D. Lachat (1997 : 10), « *les innovations apparaissent comme en grappes, suspendues à l'existence d'une première innovation que l'on appellera l'innovation 'ancêtre' d'une grappe d'innovations* ». Les auteurs (1997 : 31) considèrent que « *l'innovation 'ancêtre' d'une grappe d'innovation est l'innovation qui est nécessaire à d'autres innovations pour exister sans elle, et qui procèdent de la même idée inventive* ». Ainsi, le moteur à explosion qui équipe les automobiles est un exemple révélateur : au fil du temps de nombreuses innovations tant dans sa structure (du carburateur à l'injection, moteur en ligne, en V, refroidi par air, par eau, ...) que dans sa position dans le véhicule (à l'avant, à l'arrière, dans l'axe, en position centrale, transversale ou en porte à faux) ont jalonné son évolution.

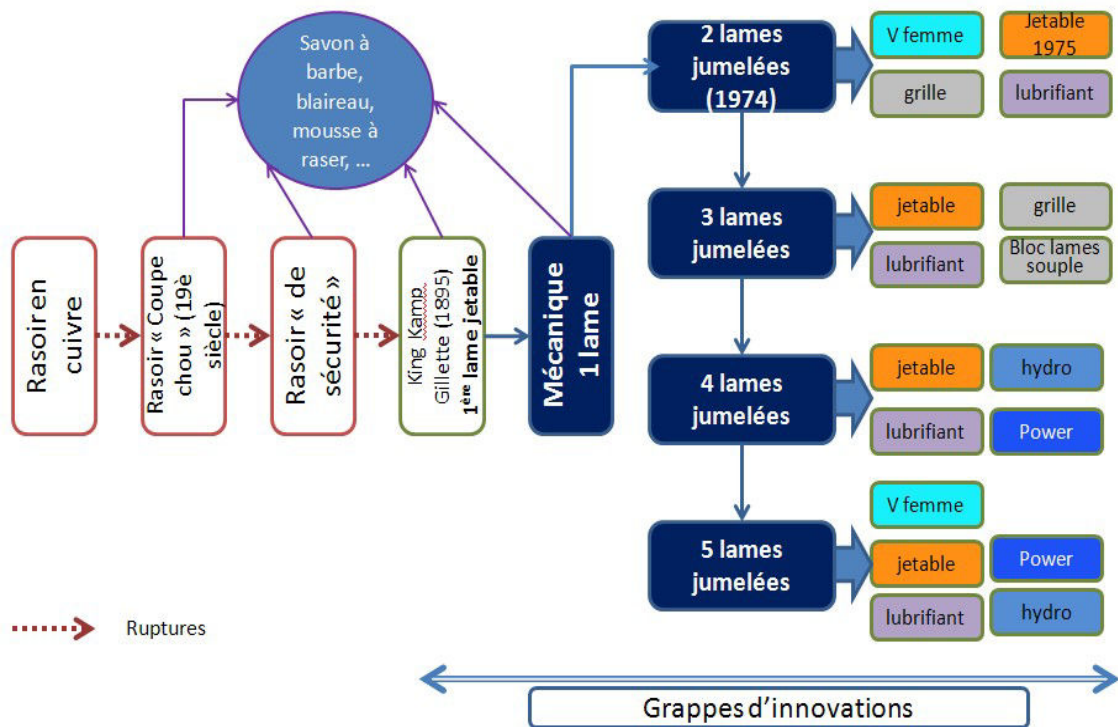
Par l'utilisation du terme grappes, il est entendu que les innovations trouvent leur origine dans d'autres innovations et donc qu'elles sont issues les unes des autres. Pour ces auteurs, les grappes d'innovations ont caractérisé la révolution industrielle du XIXe siècle. Ils rejoignent l'idée de Schumpeter selon laquelle, « *à partir d'innovations majeures, dont le nombre va croissant depuis le XVIIe siècle, il se produit un effet d'entraînement qui bouleverse les structures existantes et annonce la croissance économique* » (Lachat et Lachat, 1997 : 10). Les innovations se succédant influent sur l'économie en permettant au cycle des affaires de se développer. Rosenberg (1982 : 5)

¹⁴ Euro NCAP fournit aux consommateurs du monde automobile – tant aux utilisateurs qu'à l'industrie automobile – une évaluation indépendante et réaliste des performances de sécurité de voitures parmi les plus vendues en Europe. (http://fr.euroncap.com/home_fr.aspx)

rappelle que « *Joseph Schumpeter a défendu, tout au long de sa vie, l’hypothèse selon laquelle le progrès technique jouait un rôle central dans l’explication de la dynamique de la croissance capitaliste* ».

De nombreux cas peuvent illustrer la notion de grappes d’innovation. Ainsi l’histoire de l’évolution du rasoir mécanique et de son utilisation, appelée « rasage humide » (Figure 1-3) tout comme celle de la machine à écrire sont révélatrices d’innovations qui ont découlé d’une l’innovation « ancêtre ».

Figure 1-3 - Le rasage "humide" : un exemple de grappe d'innovations



Source : Réalisé par l’auteur à partir des données des différents fabricants

« *L’innovation incrémentale se caractérise par une amélioration qui porte sur des produits ou des processus existants. C’est une avance par ‘petits pas’* » (Devalan, 2006 : 20). Rentrent dans cette catégorie les innovations apportées à un produit afin de maintenir sa place sur un marché : par exemple, les rasoirs mécaniques qui ont vu progressivement le nombre de lames augmenter, les souris d’ordinateur qui sont devenues « *optiques* », les encres de stylos à bille qui ont adopté une texture gel. Tidd (2006 : 12) considère que l’innovation « *intervient la plupart du temps sous forme d’améliorations successives [et que] l’innovation de processus est avant tout une optimisation et la correction des erreurs qui existent dans un système* ».

Le cas de la machine à écrire montre l'existence d'un sentier de dépendance, à savoir le clavier QWERTY (AZERTY pour la France) qui s'est poursuivi lors de la rupture constituée par les ordinateurs et leurs logiciels de traitement de texte. La rupture due à l'arrivée des ordinateurs, sonnait le glas de la machine à écrire par le phénomène de la destruction créatrice, aurait pu, en même temps introduire une rupture du sentier de dépendance liée au clavier. Force est de constater que les claviers QWERTY et AZERTY sont toujours d'actualité.

Rothwell et Gardiner (1988) mettent en lumière, dans le changement technologique, la part d'innovations considérées comme incrémentales (90%) et celle correspondant à des ruptures (10%). Ils notent que les innovations incrémentales apparaissent plus profitables économiquement que la mise sur le marché d'un nouveau produit totalement innovant. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une innovation incrémentale constitue une amélioration d'un produit existant et nécessite en conséquence un investissement de R&D plus faible. Ettlé (2006) parvenait aux mêmes conclusions en soulignant que la part des innovations disruptives ou totalement nouvelles se situait entre 6 et 10% de la totalité des innovations.

Les innovations apparaissent en « *grappes ou essaims* » : après une innovation, de rupture due à un progrès technique (le chemin de fer qui remplace les diligences), voire scientifique (la vapeur, les circuits intégrés, l'informatique, l'Internet, les nanotechnologies, ...) d'autres innovations sont portées par ces découvertes. Perroux (1964 : 488) définit ce phénomène comme un « *ensemble d'innovations techniques complémentaires qui se succèdent* ».

Les grappes d'innovations sont également considérées comme une « *vague d'innovations mineures provoquée par une innovation fondamentale* » Perroux (1964 : 488). Les grappes d'innovations correspondent à l'apparition dans un temps relativement court d'un ensemble d'innovations complémentaires qui vont produire un « effet d'entraînement » sur l'économie. Certaines entreprises ou branches vont être amenées à disparaître en raison de leur obsolescence et d'autres à émerger conduisant ainsi à une restructuration de l'économie. Ce fut, par exemple le cas des fabricants de machines à écrire qui ne purent résister face aux ordinateurs.

Néanmoins, « *l'intérêt d'une innovation dépend de sa position intermédiaire entre la grappe des innovation qui la précède et la grappe des innovations qui lui succède* » (Lachat et Lachat, 1997 : 114).

Tout se passe comme si l'économie était contaminée par l'innovation qui agirait comme un virus se répandant. Lors de leur apparition, les innovations ne concernent qu'un domaine d'activité. Au fur et à mesure elles vont se diffuser à une industrie puis à toute l'économie.

1.4 Les innovations de rupture

Au-delà des innovations incrémentales qui ne constituent que « *de petits déplacements* » selon Schumpeter, d'autres innovations, plus importantes en raison de leur nature et de leur impact peuvent intervenir ; les innovations de rupture qui peuvent être illustrées par le passage de la diligence au chemin de fer. Elles induisent une modification importante au niveau de la société et provoquent un profond changement dans les habitudes des consommateurs. L'innovation donne lieu à de multiples innovations « secondaires » qualifiées d'incrémentales.

Les particularités de l'analyse schumpétérienne apparaissent dans l'identification du changement et de l'évolution au travers des innovations de rupture qui peuvent être introduites par l'entrepreneur. Celles-ci peuvent revêtir différentes formes : techniques, organisationnelles, commerciales. Ainsi, pour Rosenberg (1976), l'innovation demeure un événement exogène déconnecté de l'évolution socio-économique sur laquelle il influe.

Pour Uwe Canter (2009), Schumpeter a mis en lumière la notion de compétition en matière d'innovation en soulignant qu'en introduisant dans l'économie de nouvelles combinaisons (Schumpeter, 1912), il y avait « *destruction* » des anciennes structures. Le concept de « *création destructrice* » (Schumpeter, 1942) décrit clairement les relations de compétition pouvant exister entre l'« *ancien* » et le « *nouveau* ». Ainsi, si le marché produit correctement ses effets, les firmes affichant les meilleures performances prospéreront alors que celles qui seront moins performantes disparaîtront progressivement. Ce processus est qualifié de « *création destructrice* » par Schumpeter.

Fagerberg (2002), considère que le but poursuivi par Schumpeter était de développer une théorie de l'évolution économique qui compléterait, sans s'y substituer, la théorie de l'équilibre de Walras. Schumpeter, en utilisant le terme « évolution » se référait à un changement qualitatif de l'économie impulsé par l'innovation : « *the changes in economic process brought about by innovation, together with all their effects, and the response to them by the economic system, we shall designate by the term Economic Evolution* » (Schumpeter, 1939, vol. 1: 86).

Fagerberg (2002) souligne également le fait que Schumpeter a été influencé par les travaux de Marx en reprenant l'idée selon laquelle l'évolution capitaliste était dirigée par la compétition technologique entre les firmes. En effet, dans le *Capital* (1872), Marx suggérait que le principal moyen pour les firmes de conserver leur compétitivité était de l'améliorer en introduisant des machines. Cela peut sembler paradoxal compte tenu de la vision critique des machines par l'auteur. Marx poursuivait son analyse en rappelant que les firmes qui parviendraient à introduire des technologies nouvelles et plus efficaces verraient leur position s'affermir et retireraient de plus grands profits.

Les innovations et plus particulièrement les innovations de rupture s'inscrivent dans un choix stratégique de l'entreprise pour tenter d'obtenir un avantage concurrentiel et pense ainsi, pouvoir dominer fût-ce provisoirement le marché. Pour l'entreprise, une innovation de rupture par la situation de monopole qu'elle crée, offrira à cette entreprise la possibilité de rentabiliser ses investissements en R&D, en attendant que ses concurrents réagissent ou adoptent l'innovation nouvellement créée. De nombreux exemples d'innovations de rupture existent tels que la carte à puce développée par Roland Moreno ou plus récemment l'iPhone de Macintosh. En bouleversant les habitudes, les modes de consommation et les usages, elles justifient leur statut d'innovation de rupture.

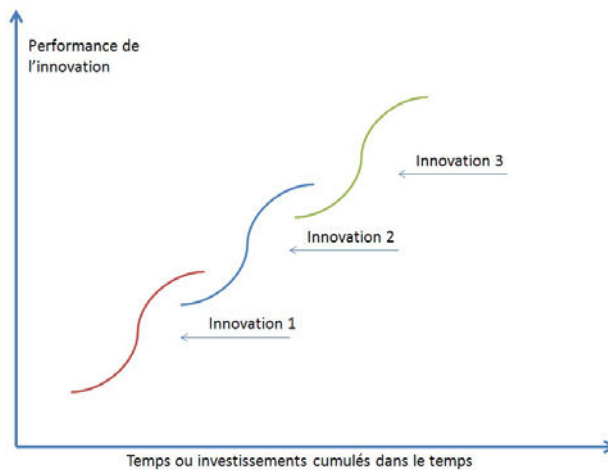
Une innovation, même de rupture, n'apparaît pas de manière isolée. Elle sera suivie d'autres innovations générées par la même idée et pouvant satisfaire les mêmes besoins (d'autres constructeurs ont développé des hybrides sans recourir à la technologie Toyota).

Lachat et Lachat (1997 : 114) rappellent « *qu'il a été récemment reconnu que la relation entre les efforts cumulés consacrés à l'amélioration de la technique attestée par une grappe d'innovation et les résultats obtenus par cet investissement, conduit*

généralement à une courbe en S » (Graphique 1-1).

Devalan (2006) précise qu'il est possible d'illustrer la différence entre une innovation incrémentale et une innovation de rupture par la « courbe en S ». Selon Hall et Khan (2002 : 5), cette forme caractéristique trouverait son explication dans les trois temps qui marquent l'adoption d'une innovation de rupture. « Dans le premier temps, l'adoption de la nouvelle technologie s'effectue lentement alors que dans le second temps l'adoption s'accélère en même temps que sa diffusion auprès des adoptants potentiels, avant de se ralentir au cours du troisième temps traduisant ainsi la saturation du marché, ce phénomène se reproduisant à chaque nouvelle innovation ». Les auteurs partent du fait que l'information est imparfaite ; tous les consommateurs n'ont pas connaissance de l'arrivée d'une nouvelle technologie au même moment. Ils considèrent également que chaque nouveau client sera initié à cette technologie par un consommateur qui l'aura adoptée avant lui. Ainsi, plus le temps passe, plus les relais d'information que sont les adoptants conduiront par un effet d'entraînement, à l'adoption de cette technologie. Ce n'est qu'à partir du moment où le marché commencera à être saturé que la courbe en S s'infléchira.

Graphique 1-1 Courbe en S et cycle de vie de l'innovation



Source : P. Devalan, (2006 : 21)

L'innovation de rupture, dans le Graphique 1-1 se traduit par une nouvelle courbe en S de performance supérieure. Celle-ci permet de visualiser la performance de l'innovation et comment elle évolue dans le temps ou par rapport aux investissements cumulés. Le

Graphique 1-1, fait apparaître une plus grande performance de l’innovation liée aux facteurs temps et/ou investissements cumulés.

Au niveau organisationnel, de nombreuses innovations de rupture ont été introduites dans les industries et plus particulièrement dans l’automobile. Les convoyeurs (principe emprunté aux abattoirs de Chicago) mis en place par Henry Ford afin de limiter les déplacements des ouvriers et d’obtenir de meilleurs rendements, le Kaizen, les Cinq Zéros chez Toyota, etc., sont révélateurs des ruptures introduites dans l’organisation de l’entreprise.

Un des exemples les plus marquants sur le plan technologique est, dans l’aéronautique, le passage de l’avion à hélice aux turbines puis aux turbopropulseurs pour aboutir aux réacteurs. De même, dans l’automobile, l’introduction du moteur diesel puis des turbocompresseurs ont marqué des ruptures par rapport aux modèles précédents.

L’arrivée sur le marché des voitures hybrides peut également être considérée comme une rupture. Il convient de préciser que des recherches sur les motorisations hybrides avaient abouti en 1900 avec l’étude faite par Porsche pour le compte de la Lohner Co, alors carrossier à la Cour Impériale et Royale de Vienne. Le véhicule combinait déjà des moteurs électriques et un moteur thermique. Cette innovation ne répondant pas aux attentes du moment, elle ne rencontra pas le succès attendu (Portnoff, 2004). Il faudra attendre 1997 pour que soit commercialisé en grande série le premier véhicule hybride, la Toyota Prius. Bien que ne correspondant pas exactement à une demande exprimée, ce modèle offrant des performances comparables à celles de ses concurrents utilisant des moteurs thermiques traditionnels, mais avec des taux d’émission de CO₂ inférieurs, fut très rapidement adopté par les vedettes d’Hollywood¹⁵ qui s’étaient vues confier un véhicule Toyota Prius. Leur notoriété en fit des prescripteurs crédibles et leurs critiques positives eurent une influence, par l’effet de réseau sur l’adoption de cette nouvelle technologie.

Le développement d’un tel véhicule s’inscrivait dans l’esprit du Protocole de Kyoto (1997) visant « *la réduction des émissions de gaz à effet de serre* » et annonçait les « *innovations vertes* » ou environnementales (« *eco friendly* ») dans la littérature anglo-

¹⁵ Nathalie Portman, Kate Hudson, Sarah Michelle Gellar, Claudia Schiffer, Cameron Diaz, Leonardo di Caprio, ...

saxonne) définies par Boutillier et al. (2012 : 16) comme « *l’ensemble des procédures, services, méthodes, etc., permettant de réduire l’impact de l’activité générale ou particulière sur l’environnement* ». Ce concept sera développé au chapitre 2.

L’étude de l’innovation a permis de mettre en lumière que celle-ci pouvait être de nature incrémentale ou constituer une rupture. Afin de pouvoir déterminer la nature d’une innovation, les différentes caractéristiques permettant cette différenciation ont fait l’objet d’une synthèse résumée dans le Tableau 1-1.

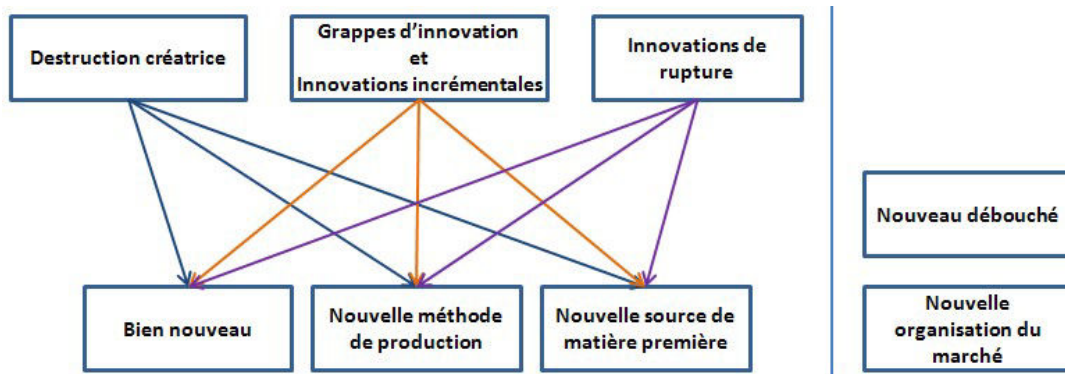
Tableau 1-1 Synthèse des distinctions entre innovation incrémentale et innovation de rupture

	INNOVATION INCREMENTALE	INNOVATION DE RUPTURE
TECHNOLOGIES MOBILISEES	Technologies existantes	Nouvelles technologies (innovations technologiques)
NIVEAU DE RISQUE	Peu important	Risque élevé
MOYENS MIS EN ŒUVRE	Savoirs et compétences internes	Nouvelles compétences
RESULTATS OBTENUS	Amélioration de la compétitivité Avantage concurrentiel limité	Transforme les marchés actuels ou en crée de nouveaux Avantage concurrentiel important (possibilité de monopole)
ACTEURS CLES	Équipes fonctionnelles	Mobilisation de l’ensemble des équipes

Source : Réalisé par l’auteur

Comme le montre la Figure 1-4, la destruction créatrice, les grappes d’innovation et les innovations incrémentales ainsi que les innovations de rupture peuvent impacter les « cas » de l’innovation définis par Schumpeter.

Figure 1-4-Impact des types d’innovation sur les « cas de l’innovation »



Source : Réalisé par l’auteur

Il apparaît, au terme de cette section consacrée à Schumpeter et à son approche de l’innovation que celle-ci peut être soit incrémentale soit de rupture, mais que le phénomène de destruction créatrice et l’émergence des grappes d’innovation peuvent s’appliquer indifféremment à l’une ou l’autre des formes d’innovation. De plus, dans l’analyse schumpétérienne, l’innovation est de type « *push* » dans la mesure où l’entrepreneur innove et dans la mesure où cette innovation technologique sera adoptée, elle sera à l’origine de la création de nouveaux marchés. Cette vision s’oppose à l’innovation « *pull* » dans laquelle c’est le besoin des utilisateurs qui sera à la source de l’innovation.

L’œuvre de Schumpeter et ses recherches sur l’innovation constituent le socle encore en vigueur pour les recherches qui ont suivi. L’entrepreneur innovateur tel qu’il l’a décrit, en introduisant des innovations, bouleverse les comportements routiniers et introduit une dynamique d’évolution. L’innovation engage les entreprises qui s’engagent sur ce sentier sur des trajectoires technologiques d’évolution qui à terme deviendront irréversibles. Ceci n’est pas sans rappeler la théorie de Darwin en matière de sélection et d’évolution. Au début des années 1980, comme le soulignent Pyka et al. (2009 : 2) de nombreux économistes commencèrent à prendre en compte les théories de Schumpeter. La situation de ces années-là était propice à de nouvelles approches alors que les théories traditionnelles faisaient de plus en plus l’objet de critiques. Cela offrit de nombreuses opportunités pour des analyses schumpétériennes et néo-schumpétériennes.

La section 2 va se focaliser sur l’approche évolutionniste de l’innovation, pour montrer qu’elle constitue bien un prolongement des propositions schumpétériennes

Propos d’étape – Chapitre 1 – Section 1

L’innovation, selon Schumpeter apparaît dans un premier temps comme impulsée par l’entrepreneur, acteur central de son analyse. En effet, c’est ce personnage décrit par l’auteur comme « *porteur de qualités particulières* » qui va faire passer l’invention au stade de l’innovation en la produisant et en assumant les risques. Il apparaît dans un second temps que cette innovation peut recouvrir deux formes, à savoir être « *incrémentale* », c'est-à-dire constituer une amélioration mineure par rapport à l’innovation dont elle est issue ou bien être de « *rupture* », en apportant un changement aussi radical dans les habitudes que celui constitué par la transition entre les diligences et le chemin de fer. Schumpeter poursuit son analyse en identifiant cinq « cas », ou en d’autres termes, cinq moments où l’innovation apparaît : la **production d’un bien nouveau**, une **nouvelle méthode de production**, une **nouvelle source de matières premières**, un **nouveau débouché**, une **nouvelle organisation du marché**. Enfin, il note que les innovations sont à l’origine d’une part de la « *destruction créatrice* » au cours de laquelle le « nouveau » va concurrencer « l’ancien » jusqu’à le remplacer (avant d’être remplacé à son tour par l’innovation suivante) et génératrices de « *grappes d’innovations* », à savoir des innovations qui vont trouver leur origine dans l’innovation « ancêtre ». Ces innovations « secondaires » pourront être de deux types, incrémentales ou de rupture. A partir d’une innovation de rupture une nouvelle grappe pourra se développer. L’ensemble de ce processus est synthétisé dans la Figure 1-5. Cette classification permettra de caractériser l’objet d’étude de la thèse, l’industrie automobile, considérée au niveau des constructeurs.

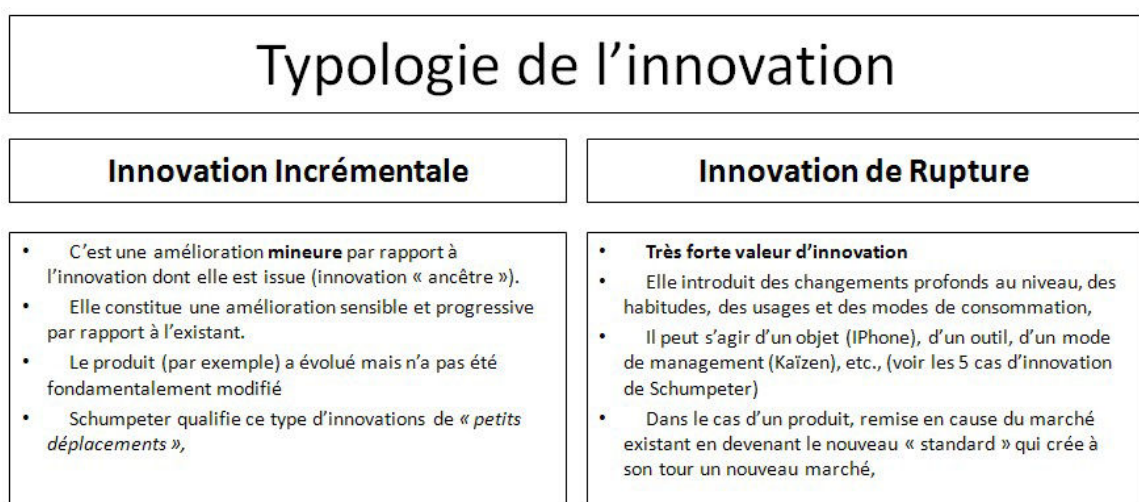
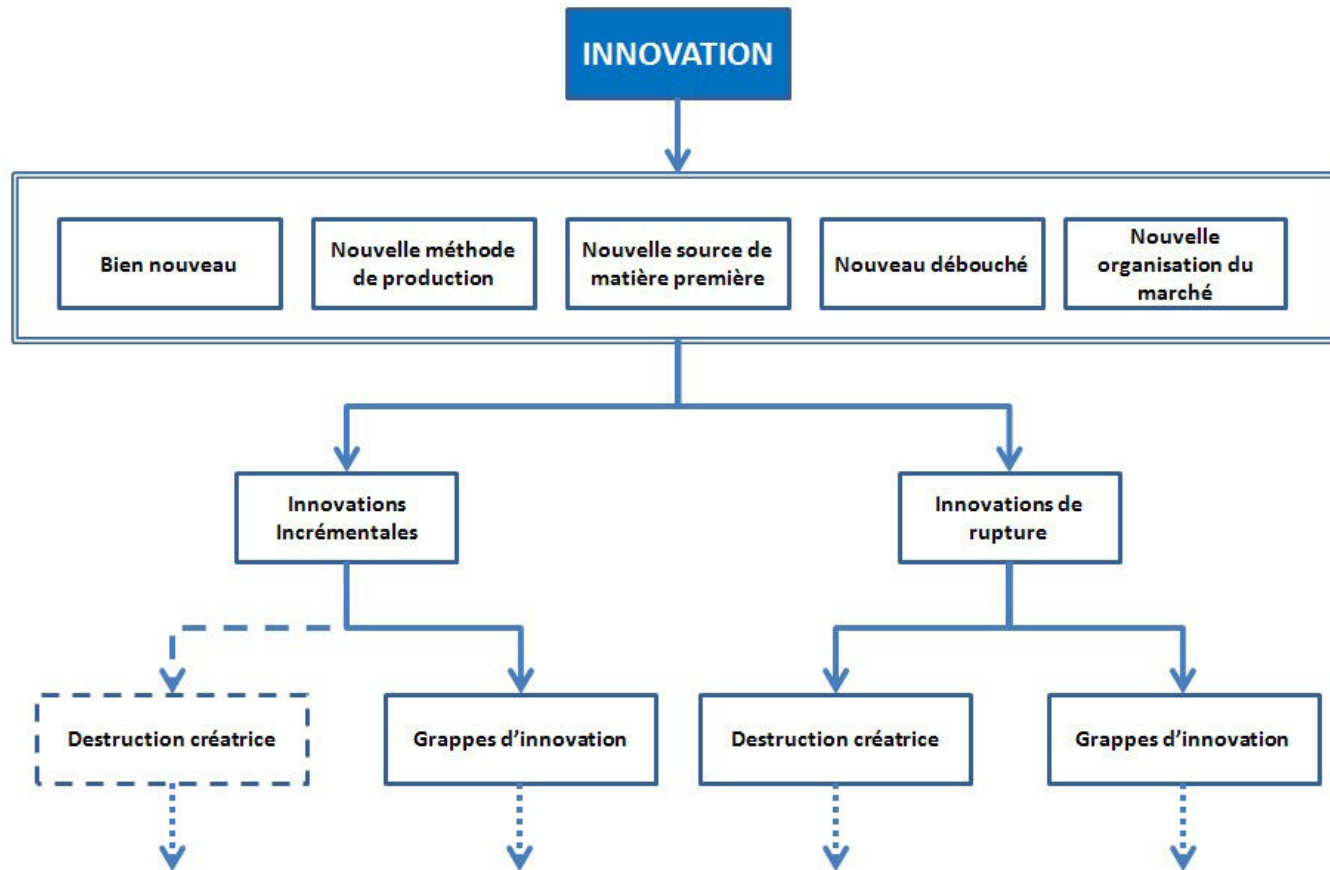


Figure 1-5 Synthèse de l'analyse schumpétérienne de l'innovation



Source : Réalisé par l'auteur

* Dans le cas des innovations incrémentales, il ne se produit pas systématiquement un phénomène de destruction créatrice

SECTION 2 : LA VISION EVOLUTIONNISTE DE L'INNOVATION : PROLONGEMENT DES PROPOSITIONS SCHUMPETERIENNES

En économie, l'évocation du terme « évolutionniste » renvoie aux théories développées par Richard R. Nelson et Sidney Winter en 1982, dans leur ouvrage *An Evolutionary Theory of Economic Change*. À la différence de Schumpeter qui a placé l'entrepreneur au centre de son analyse, les « évolutionnistes » tentent d'expliquer les évolutions de l'entreprise et des mécanismes qui la conduisent à innover. L'entreprise est sidérée dans son environnement (institutionnel, économique, etc.).

Le lien qui s'est développé entre les néo-schumpeteriens et l'économie évolutionniste a été alimenté par l'amitié entre Hanusch et Wolfgang Stöpl, proche disciple de Schumpeter (Pyka et al., 2009 : 2)

Bien que présent dans les écrits de Schumpeter, le terme « *évolution* » est emprunté à Darwin sans pour autant qu'il soit possible d'y voir une analogie ou une transposition. Par « *évolution* » écrit-il, il faut entendre les changements dans la vie économique dont la source est interne à l'économie et non externe à celle-ci. Schumpeter (1954) part pour sa démonstration de ce qu'il appelle le « *circuit* », une représentation abstraite, réduite au minimum, d'une économie en équilibre, se reproduisant à l'identique de période en période. Ce circuit va laisser place à « *l'évolution* » quand de « *nouvelles combinaisons productives* » seront introduites par les innovateurs.

Pour Metcalfe (2012 : 1), « *No one can doubt that the schumpeterian research program has made a major contribution to economic thought and that evolutionary modes of reasoning are a powerful way to understand the operating principles of innovation-driven market economies* », L'auteur souligne l'importance de l'apport schumpétérien à la pensée économique ainsi qu'à ses réflexions sur l'innovation en général et rappelle que les modes de raisonnement se fondant sur cette approche permettent de comprendre les principes opérants dans les économies de marché pilotées par l'innovation. Kwasnicky (2007: 389) poursuit cette analyse : « *By using the term 'evolution' or 'evolutionary' neo-schumpeterians indicate the importance of long-term changes and crucial role of innovation for economic development* ».

Les innovations, en tant que principe de changement interne au système, font sortir l'économie de la zone de l'habitude, du tout fait, de l'automatisme. Il s'agit donc de ruptures dans les routines et les règles habituellement suivies (Manglote, 1992).

Schumpeter développe une explication des routines qui reprend certains thèmes de la rationalité limitée tels que l'incertitude et les capacités cognitives limitées des individus. Le couple routine - innovation, présent chez Schumpeter, sera repris et réinterprété dans une analyse « *bio évolutionniste* » par Nelson et Winter (1982).

Schumpeter a introduit la relation existant entre les innovations, leur succès sur le marché et leur impact sur le développement économique. Cette relation est au cœur de l'interprétation évolutionniste du développement économique depuis plus de soixante ans (Canter, 2009).

« *Without any exception I know about, the evolutionary theories of economic growth that have been developed all draw inspiration from Joseph Schumpeter's* » reconnaît Nelson (1995: 68). Kwasnicki (2007) souligne que le renouveau des théories de Schumpeter est entièrement basé sur une « interprétation évolutionniste » des idées formulées à l'origine par l'auteur.

Nelson et Winter ont posé les fondements de l'évolutionnisme (1982). Les auteurs accordent à Schumpeter une place parmi les pères fondateurs. Ils reconnaissent ainsi, dès leur introduction, leurs « *dettes intellectuelles majeures* » à l'égard de Schumpeter, ajoutant : « *Schumpeter posa le problème adéquat – comment comprendre le changement économique* » - et sa vision inclut plusieurs éléments importants de la réponse et insistent sur la sélection, sur la dépendance de sentier ainsi que sur les rendements croissants d'adoption (1994).

Par rapport à l'analyse schumpetérienne, l'analyse évolutionniste se caractérise principalement par la reconnaissance du rôle des innovations mineures et une conception du progrès technique comme le résultat de processus incrémentaux successifs c'est-à-dire cumulatifs et endogènes. Boulding (1991) considère que l'analyse évolutionniste propose de lire un système économique comme un processus continu dans l'espace et le temps.

Parmi les concepts clés retenus par Teece, les « *régimes technologiques* » (2.1), les sentiers de dépendance (« *path dependence* ») et phénomènes de « *lock-in* » (2.2) et les modèles de diffusion technologique (2.3) feront l’objet d’une attention particulière. En effet, ces quatre concepts s’avèrent particulièrement pertinents pour caractériser l’évolution de l’innovation actuellement à l’œuvre dans le secteur de l’automobile.

2.1 Régime technologique : un concept cadre

L’innovation est une force d’entraînement importante dans la dynamique de la concurrence entre firmes dans un secteur industriel donné. Cependant, les processus à l’origine de l’innovation et de l’évolution technologique peuvent être très différentes selon les industries et les pays. La majeure partie de la connaissance transférée par les entreprises dans l’innovation est dédiée à des applications spécifiques. Ainsi, la notion de « *régimes technologiques* » est un concept utile pour étudier les différences dans des activités innovatrices.

De nombreux auteurs évolutionnistes (Pavitt, 1984, Cohen et al., 1987, Pavitt et al., 1987, Malerba, 2002, etc.) ont tenté d’expliquer les différences pouvant exister entre les firmes d’un même secteur et d’analyser leurs performances en termes d’innovation en tant que résultat d’un changement technologique. Leiponen et Drejer (2007 : 1221) notent que la source théorique du concept de « *régime technologique* » est d’origine évolutionniste : « *the theoretical starting point is evolutionary theory with its premise that firms in different technological regimes pursue different paths to innovation* ».

Les « *régimes technologiques* » permettent donc de faire le lien entre les différents aspects du processus d’innovation.

Ce concept a été introduit par Nelson et Winter (1982) afin de servir de cadre à l’analyse des process d’innovation qu’ils avaient pu observer dans les différents secteurs industriels étudiés et les rendre compréhensibles. Le modèle proposé distingue les technologies dites « *science-based* » des « *cumulative technologies* ». Les premières, fondées sur l’innovation ont pour effet de favoriser l’entrée de nouvelles firmes basées sur l’innovation alors que les secondes *accorderont un rôle privilégié aux firmes de taille importante ayant cumulé savoirs et technologies*.

Il a été utilisé par plusieurs auteurs afin d’établir le lien entre l’environnement technologique, les conditions dans lesquelles se produit l’innovation et les dynamiques

industrielles (Winter, 1984, Dosi, et al. 1995, etc.). Marsili (1982 : 1) souligne le rôle des « régimes technologiques » comme cadre d’analyse « *Technological regimes are important because they identify common properties of innovative processes in distinct sets of production activities* », rejoignant Nelson et Winter. Marsili et Verspagen (2001 : 2), rappellent que le concept et le cadre d’analyse qui en découle, posé par ses prédécesseurs est important pour la compréhension - sur le plan théorique - de l’innovation et montrent que celui-ci est toujours d’actualité.

Dans le prolongement du cadre fondateur défini par Nelson et Winter (1982), Dosi (1982) propose d’identifier un « régime technologique » à partir des opportunités technologiques pouvant survenir, des conditions de leur appropriabilité – en d’autres termes comment l’entreprise peut-elle utiliser à son profit les nouvelles technologies, du caractère cumulatif des connaissances et de la nature du socle de connaissances propre à l’entreprise.

Malerba et Orsenigo (1996) définissent à leur tour les régimes technologiques en reprenant et en précisant ces quatre facteurs : les opportunités technologiques, le degré d’appropriabilité des innovations, le caractère cumulatif des avancées technologiques, le niveau de connaissances incorporé dans l’entreprise tout en considérant que les « régimes technologiques » découlent d’une combinaison particulière de ces facteurs qui sont développés ci-dessous.

- Les opportunités technologiques

Elles traduiraient la probabilité d’innover au regard des sommes investies au titre de la R&D. Un haut niveau d’opportunités constitue une incitation forte à investir dans des activités liées à l’innovation, dans un environnement qui n’est pas contraint par des phénomènes de rareté. Un tel environnement est favorable aux innovateurs et se traduira par un niveau important d’innovations technologiques.

- Le degré d’appropriabilité des innovations

Il définit d’une part les possibilités de profit pour la firme, comme résultat de ses activités d’innovation et d’autre part, la difficulté pour les firmes à s’approprier une technologie en l’imitant. « *The appropriability conditions are about the ability of the original innovator to capture the benefits from the innovation and hold off other firms from eating too much and too rapidly into these returns* »

(Nelson, 1987:52). La difficulté pour une autre firme à s’approprier une innovation peu tête un manque, de matériel par exemple (tel qu’un logiciel ou une machine spécifique) ou de connaissances dans l’entreprise (voir le quatrième facteur ci-dessous). L’existence de ce point fondamental chez ses concurrents peut constituer pour l’entreprise innovatrice un avantage concurrentiel. Ce fait est souligné par Teece (1986 : 288) qui note « *In some cases, as when the innovator is systemic, the complementary asset may be other part of a system* ».

- Le caractère cumulatif des avances technologiques

Il s’agit ici de noter que les innovations sont le résultat d’améliorations progressives, c’est-à-dire d’innovations incrémentales. Elles résultent de la combinaison d’un savoir acquis dans le passé (innovation « ancêtre ») et d’innovations récemment apportées.

- Le niveau de connaissances incorporé dans l’entreprise

Chaque entreprise bénéficie d’un socle de connaissances (techniques, technologiques, savoir-faire, etc.) accumulé tout au long des années. Ces connaissances peuvent être soit de nature tacite, soit codifiées. Les « *connaissances tacites* »¹⁶ font appel au savoir-faire, au « tour de main » et sont donc basées sur l’expérience. L’importance de cette connaissance accumul e avait été not e par Hayek (1945 : 521) « *that practically every individual has some advantage over all others because he possesses unique information of which beneficial use might be made, but of which use can be made only if the decisions depending on it are left to him or are made with his active cooperation. We need to remember only how much we have to learn in any occupation after we have completed our theoretical training, how big a part of our working life we spend learning particular jobs, and how valuable an asset in all walks of life is knowledge of people, of local conditions, and of special circumstances* ». Les ouvriers les plus exp riment s ont souvent transf r  leur savoir vers les apprentis qu’ils étaient charg s de former. Cette tradition se retrouve encore aujourd’hui dans des métiers où la main de l’homme intervient

¹⁶ Le concept de connaissances tacites a été développé en 1958 par Michel Polyani – *Personal knowledge : Towards a post-critical philosophy*. Elle sera reprise en 1982 par les économistes Nelson et Winter dans leur analyse évolutionniste du changement technologique.

majoritairement et dans les formations relevant du compagnonnage. Elle s'inscrit dans la tradition du « *learning by doing* ». Par opposition, la « *connaissance codifiée* » fait l'objet d'une transcription écrite qui permet de la reproduire ou de la vendre, dans le cadre des transferts de technologie. Il convient de souligner que, sans un niveau de connaissances suffisant, il ne sera pas possible d'utiliser une telle connaissance bien qu'elle ait été codifiée.

Georghiou et al. (1986 : 32) dans une analyse de la compétition « post-innovation » définissent le concept de « régime technologique » en tant que « *a set of design parameters which embody the principles which will generate both the physical configuration of the product and the process and materials from which it is to be constructed. The basic design parameters are the heart of the technological regime, and they constitute a framework of knowledge which is shared by the firms in the industry* ». Ce faisant, les auteurs soulignent le fait qu'un régime technologique est constitué d'un ensemble de facteurs interagissant les uns avec les autres. Kemp (1997 : 269) synthétise l'ensemble des points de vue : « *a technological regime includes all the knowledge involved, skills, routines, regulations, patterns of working and living and social norms and commonly shared preferences* ».

Comme cela sera évoqué dans le Chapitre 2, le Protocole de Kyoto a constitué un moment clé dans la prise de conscience de la dégradation de l'environnement et donc des enjeux environnementaux. Il est apparu que la technologie seule ne suffirait pas à offrir un avenir « durable » aux générations futures et que l'implication tant des pouvoirs publics que de la sphère privée étaient fondamentaux. Les gouvernements sont des acteurs importants dans la mesure où ils orientent la création de connaissances au travers des politiques d'éducation et d'acquisition de connaissances. Ils orientent également la recherche au travers des financements accordés à des axes considérés comme prioritaires.

Kemp (1994) s'était interrogé sur les opportunités de ruptures technologiques permettant de s'exonérer des énergies basées sur le carbone et était parvenu à la conclusion qu'un tel processus se produirait lentement et graduellement. Il avait mis en lumière que dans ce contexte, des firmes détenant des capacités technologiques réduites étaient néanmoins en mesure d'opérer un changement de « *régime technologique* » qui leur conférerait alors un avantage par rapport à des firmes mieux dotées.

Les « *régimes technologiques* » permettent d'analyser les innovations en tenant compte de l'environnement (institutionnel, juridique, économique, etc.). Mobiliser ce concept s'avère donc pertinent. En effet, dans ce cadre il apparaît que la transition vers un « environnement durable » va nécessiter une transition technologique et donc une évolution des régimes technologiques. Il ne s'agira pas uniquement d'un changement de technologies mais également de changements dans les modes de production, d'organisation et peut-être même du mode de vie.

Le concept de « sentier de dépendance » et de rendements croissants, conduisent à supposer que le changement technologique est lié à un effet de « lock-in », ce qui conduit à conclure que les options de développement technologique sont continuellement limitées dans les processus de changement en raison de la nature cumulative de la création de connaissances. Le « sentier de dépendance » guide le changement technique. Il montre la direction qui doit être poursuivie et qui ne doit être négligée, mais il ne permet pas de déterminer l'évolution technologique. Kemp (2002 : 106) avait noté le lien étroit existant entre le sentier de dépendance et la création d'un nouveau sentier soulignant qu'un nouveau régime technologique se construisait à partir de l'existant et « *new technological regimes are build on what is available and are shaped by this* ». Schumpeter (1947), dans son étude de la « destruction créatrice », avait noté le rôle central de l'entrepreneur dans le processus de création de nouveaux sentiers au travers des innovations dont celui-ci assumait le risque. C'est en s'engageant sur la voie des innovations que les entrepreneurs peuvent « échapper » au phénomène de « lock-in ».

2.2 « Path dependence » (Sentiers de dépendance) et « lock-in » (verrouillage) : des concepts à la pratique

« *Les sociétés jeunes innover plus facilement que celles chargées d'histoire, par exemple les Etats-Unis du XXe siècle face à la 'vieille Europe'* » (AMP - Pluriel, 2010 : 10). À cette affirmation, Pépin répond, « *Trop de mémoire, trop d'ancrages sur ce qui est ancien, empêche d'avancer. Mais pas assez aussi. Comment être à l'écoute des acquis sans être écrasé par eux ? L'innovation est une recherche permanente d'équilibre entre passé et avenir* ». Fréry (2010 : 10) considère que « *l'on construit l'innovation par rapport à son histoire mais parfois le passé a creusé un tel sentier dans les mœurs et les habitudes qu'il devient difficile d'en sortir. [...] Ce genre de contrainte de 'sentier' doit être prise en compte dans l'innovation* ».

Le choix des deux concepts clés – « *path dependence* » et « *lock-in* » comme éléments d'analyse du secteur automobile s'explique dans un premier temps par le fait que l'industrie automobile, « *marché faiblement contestable* » (Baumoll et al., 1982), en raison des capitaux nécessaires pour entrer sur ce marché, est caractérisée par de très fortes barrières à l'entrée et dans un second temps par le fait que, jusqu'à aujourd'hui, malgré une inflexion légère, les seules sources d'énergie utilisées aient été des carburants d'origine fossile. La notion de « *path dependence* » et le phénomène de « *lock-in* » (2.1.1) seront étudiés avant d'être illustrés au travers de cas stylisés (2.1.2)

2.2.1 Deux concepts clés « connexes »

La notion de « *path dependence* » ou « *sentier de dépendance* » est attribuée à Paul A. David. Dans un article intitulé « *Clio and the Economics of QWERTY* » publié en 1985 il développe son hypothèse selon laquelle « *"A path-dependent sequence of economic changes is one of which important influences upon the eventual outcome can be exerted by temporally remote events, including happen-stance dominated by chance elements rather than systematic forces. Stochastic processes like that do not converge automatically to a fixed-point distribution of outcomes, and are called non-ergodic. In such circumstances "historical accidents" can neither be ignored, nor neatly quarantined for the purpose of economic analysis; the dynamic process itself takes on an essentially historical character* » (David, 1985 : 332). Pour lui, le concept de « *path dependence* » trouverait son origine dans l'idée qu'un petit avantage détenu initialement ou plusieurs chocs aléatoires mineurs au cours du processus seraient susceptibles de modifier le cours de l'histoire.

« *It is impossible to plan and execute as per plan as the execution depends on the choices offered* » (Yin Mon Myint, Shailendra Vyakarnam, 2008). Le sentier de dépendance constitue un nouveau concept de la théorie économique. Selon le sentier de dépendance, l'issue finale est définie mais inconnue dans la mesure où elle dépend d'une part du point de départ, et d'autre part d'événements accidentels.

« *Path dependency is the view that technological change in a society depends quantitatively and/or qualitatively on its own past. A variety of mechanisms for the autocorrelation can be proposed. One of them, due to David (1975) is that technological change tends to be local, that is, learning occurs primarily around*

techniques in use, and thus more advanced economies will learn more about advanced techniques and stay at the cutting edge of progress » (Mokyr, 1990 : 163).

Dans l'étude de l'histoire des techniques et des évolutions technologiques, les sentiers de dépendance ont été utilisés pour comprendre les phénomènes de « *lock-in* » intervenus au cours de processus de changement technologique. A l'origine, le concept de « *path dependence* » était utilisé afin d'expliquer les arbitrages technologiques. « *Rosenberg a eu une immense influence dans ce domaine* » (Magnusson et Ottosson, 2009 : 2). Dans son ouvrage, « *Exploring the Black Box* » (1994) Rosenberg précise que le processus technologique en cours doit être compris en le mettant en perspective avec expériences technologiques précédentes, voire initiales.

Le sentier de dépendance se réfère aux effets de « *lock-in* » relatifs aux choix entre des technologies rivales. La plupart des travaux de recherche actuels ne considèrent ces théories que du point de vue de l'adaptation technologique, c'est à dire pourquoi les consommateurs « prennent les décisions qu'ils prennent ». Ils n'explorent pas l'impact sur les décisions managériales au sein de l'entreprise.

Le concept de « *path dependence* » est exposé par Liebowitz et Margolis au travers de deux questions : « *What role does the past play in current economic conditions* » [...] « *Most generally, path dependence means that where we go next depends not only on where we are now, but also where we have been. History matters* » (1999 : 981).

Il trouve sa source dans l'idée que des avantages mineurs intervenus dès l'origine ou que quelques perturbations mineures et aléatoires sont susceptibles de modifier le cours de l'histoire (David, 1985) et de provoquer des verrouillages (« *lock-in* »). Ces phénomènes de blocage trouvant leur origine dans l'histoire sont qualifiés de « *lock-in by historical events* » (Arthur, 1989).

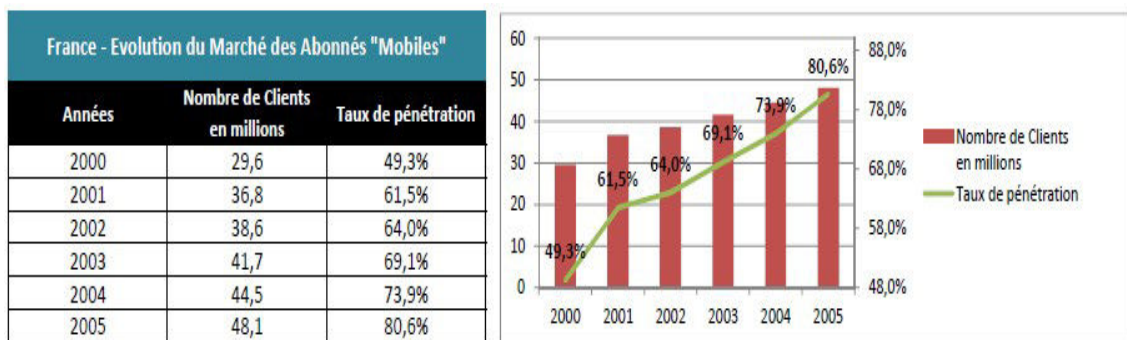
Aborder les concepts de « *path dependence* » et de « *lock-in* » conduit à s'interroger : tout d'abord, faut-il considérer que des erreurs réversibles peuvent être commises lors de l'introduction de nouveaux produits sur les marchés ? L'économie est elle susceptible d'être prisonnière (« *lock-in* ») d'options erronées ?

L'exemple du téléphone portable pourrait donner des éléments de réponse. En effet, après avoir connu des débuts plus que difficiles en raison de sa taille, son poids et du coût des communications, le téléphone mobile ou cellulaire est devenu un objet du

quotidien. En 1984, le « Radiocom 2000 » pesait 10kg et coûtait l’équivalent de 3 000 euros (Sagem). Cet objet de luxe était alors réservé à une élite de managers et ne concernait donc qu’un petit nombre de personnes.

Ce n’est qu’à partir des années 1990 que sont progressivement apparus les forfaits téléphoniques permettant de ne plus être contraint à acheter le téléphone portable dont le prix limitait la diffusion. La seule contrainte était de s’engager vis-à-vis de l’opérateur pour une durée de 12 à 24 mois. Comme le montre le Graphique 1-2, depuis l’année 2000 la progression du nombre d’abonnés français au téléphone mobile est en constante progression avec une hausse du taux de pénétration de près de 65% en cinq ans.

Graphique 1-2 Évolution du marché Français des abonnés au téléphone mobile entre 2000 et 2005



Source : D’après les données de l’Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP), 2006

Page (2006 : 88) souligne qu’une étude de la littérature relative aux sentiers de dépendance en révèle quatre causes :

- **Augmenter le retour sur investissement** par une multiplicité d’actes qui aboutiront à de meilleurs résultats (bénéfices). Arthur (1989) considère que les phénomènes de « *path dependence* » sont étroitement liés à ceux de « *lock-in* » en raison d’évènements historiques. Il identifie la possible émergence de « *path inefficiency* » liée également à l’augmentation du retour sur investissement.
- **Auto-renforcement (self reinforcing)** se comprend comme faire des choix ou initier des actions qui aboutiront à leur soutien. Pour Paulré, « *l’auto-renforcement signifie, presque par définition, qu’un résultat particulier ou un équilibre possède ou a accumulé un avantage économique qui prend la forme d’une « barrière potentielle »* en lien avec les phénomènes de lock-in.

- **Obtenir des feedbacks positifs** car ils créent des externalités positives et peuvent être assimilés à des bénéfices dans la mesure où ils influenceront sur les choix futurs des clients et génèreront des bénéfices. Ils sont à la base ou du moins expliquent les « *rendements croissants d’adoption* ».

La production peut également être source de feedback positifs dans la mesure où des gains liés à l’apprentissage peuvent intervenir. En effet, la courbe d’apprentissage suit de manière quasi parallèle celle de la production (Cohen et Lévinthal), ce qui a pour effet d’induire une baisse des prix et d’augmenter les parts de marché. Ce mouvement de manière circulaire, va se reproduire aboutissant à un « avantage prix ». La sensibilité du marché à ces feedback positifs est corrélée à l’impact de l’apprentissage sur les prix proposés au marché (Kline, 2001).

- **Le « lock-in »** est entendu comme un choix ou une action qui se révélera plus profitable qu’une autre en raison d’un grand nombre de personnes ayant adopté cette voie.

Liebovitz et Margolis (1995) identifient trois niveaux de sentiers de dépendance. Les auteurs soulignent le fait que certaines décisions anciennes voire insignifiantes peuvent conduire sur des « sentiers » que l’entreprise ne pourrait quitter sans que cela induise des coûts. Les choix en matière de machines, par exemple, sont susceptibles, compte tenu de l’importance des investissements réalisés, de l’engager sur le long terme. Les auteurs considèrent ce type de circonstances comme le premier degré de la dépendance de sentier.

Le deuxième degré apparaît lorsque l’information est imparfaite et que certaines décisions prises initialement apparaissent rétrospectivement inefficaces alors qu’une autre voie aurait produit des effets plus positifs que celle choisie. À ce niveau, l’entreprise aboutit à des résultats négatifs et les coûts nécessaires au changement sont très importants. Les deux premiers niveaux ne souffrent pas d’inefficacité au niveau des choix opérés.

Dans leur analyse, ils mettent en évidence le fait que « *l’importance des sentiers de dépendance résiderait dans le troisième degré lequel découle du deuxième et est*

*sensible*¹⁷ *aux conditions initiales* ». Malgré tout, comme le montrent Williamson (1993) ou Coase, il existe une possibilité de « *remédiabilité* ». À ce stade, la possibilité de « changer de cap » existe ou a existé afin d'obtenir le résultat attendu, mais l'objectif n'a pas été atteint. Pour Arthur (1989) le sentier de dépendance est du troisième degré dès lors que les décideurs sont en possession d'informations valables.

Les sentiers de dépendance suivis au premier et au second degré ne peuvent faire l'objet d'améliorations en raison d'un niveau d'information ou de connaissances insuffisant. La principale différence entre le second et le troisième degré est l'existence d'alternatives permettant ou ayant pu permettre de modifier les décisions prises initialement et suppose la faisabilité des apports et développements qui auraient pu être effectués.

À partir du moment où le sentier de dépendance du troisième niveau peut être compris comme une défaillance du marché, il importe de distinguer les différents degrés qui qualifient le sentier de dépendance (Liebovitz, Margolis, 1999).

Mokyr (1991) discute le parallèle qui pourrait exister entre la biologie et les sentiers de dépendance en économie et cite des cas où il apparaît *ex post* que certaines décisions ont été des erreurs correspondant à un sentier de dépendance du second degré.

Pour Cowan (1991) l'état de la technique et/ou des connaissances joue un rôle fondamental lorsqu'il s'agit de prendre position face à des technologies inconnues. Dans son modèle chaque agent va essayer alternativement chaque nouvelle technologie. Cette série de tests va réduire l'incertitude quant aux qualités respectives des technologies testées. Au final, celle qui sera retenue pourra être d'un niveau technologique inférieur. Cette situation décrite par l'auteur apparaîtrait lors d'un sentier de dépendance du troisième degré.

Arthur parle de la propriété de « *lock-in* » et de « *petits événements* » qui interfèrent dans les processus « *path dependent* ». Pour Antonelli (1997:643-644), « *Path dependence defines the set of dynamic processes where small events have long-lasting consequences that economy action at each moment can modify yet only to a limit extent* ».

¹⁷ Au sens mathématique du terme

Page (2006) dans sa revue de littérature note que les sentiers de dépendance ont quatre causes et peuvent être de trois niveaux. Ces différentes analyses sont synthétisées dans la Figure 1-7.

La littérature économique est riche d’exemples montrant que de « *mauvais choix* » ont conduit à l’adoption d’une « *mauvaise technologie* » dans le sens où celle-ci présentait des qualités moindres que ses concurrentes. Les cas d’école les plus couramment cités sont ceux du clavier QWERTY ou du standard vidéo VHS.

L’étude de ces cas permet de comprendre *ex post* l’organisation des événements qui ont conduit à l’adoption de ces technologies.

2.2.2 « Sentiers de dépendance » et « lock-in » : Cas stylisés

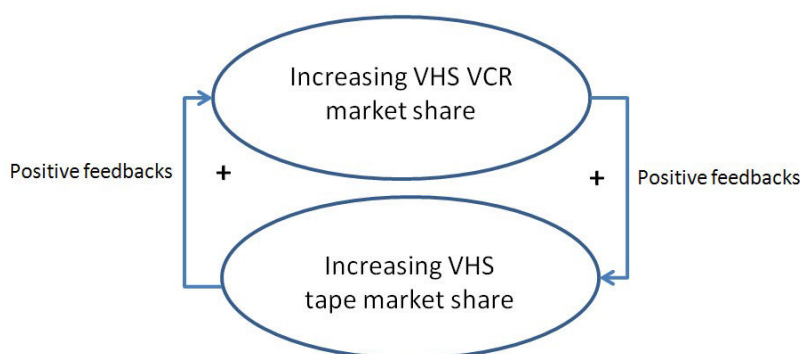
Liebovitz et Margolis (1990, 1995), qualifient d’archétype le cas du clavier QWERTY. David (1985) avait montré que la configuration de ce clavier avait été adoptée bien qu’elle n’offre pas une optimalité comparée à celle proposée par August Dvorak. Selon Liebovitz et Margolis, « *the QWERTY case is an active example of the third-degree of path-dependence* ». David concluait « *competition in the absence of perfect features market drove the industry prematurely in standardization on the wrong way* » (Liebovitz et Margolis, 1990). Les auteurs rejoignent David dans son analyse : « *We stay with the wrong keyboard, not because sunk investments on QWERTY make the switch to the Dvorak arrangement an inferior choice, but because of “decentralized decision making”* » (David, 1985). En imputant l’erreur à un pôle de décision décentralisé, les auteurs suggèrent que si celui-ci avait été centralisé, l’erreur aurait pu être corrigée.

Le second cas généralement cité en exemple est celui de la concurrence qui a existé entre les normes Video Home System (VHS) de JVC (Matsushita Group) et Betamax de Sony lors de l’introduction des lecteurs-enregistreurs de cassettes vidéo (Video Cassette Recorders – VCR) sur le marché. Les deux « standards » ont existé en parallèle, le VHS étant destiné aux utilisations « grand public » et le Betamax aux professionnels. Le V2000 lancé par Philips et Grundig en 1980, bien que d’une technologie supérieure au VHS sera abandonné en 1985. Cette année-là, le V2000 ne représentait que 7,5% du marché domestique, tandis que le VHS en contrôlait 85%. Les 7,5% restants étant réservés au Betamax, développé par Sony. L’histoire n’a retenu que le succès du format VHS oubliant du même coup que le Betamax avait été mis au point par Sony deux ans auparavant.

Les « *positive feedbacks* » (Figure 1-6) ont également joué un rôle important en faveur du VHS. La disponibilité des appareils associée à un large choix de cassettes préenregistrées a favorisé l'adoption de ce format qui rapidement a vu ses parts de marché augmenter et par là même les bénéfices qui en découlaient, comme le souligne Arthur (1990 : 92). « *The history of the videocassette recorder furnishes a simple example of positive feedback. The VCR market started out with two competing formats selling at about the same price: VHS and Beta. ...*

Both systems were introduced at about the same time and so began with roughly equal market shares; those shares fluctuated early on because of external circumstance, "luck" and corporate maneuvering. Increasing returns on early gains eventually tilted the competition toward VHS: it accumulated enough of an advantage to take virtually the entire VCR market. Yet it would have been impossible at the outset of the competition to say which system would win, which of the two possible equilibria would be selected. Furthermore, if the claim that Beta was technically superior is true, then the market's choice did not represent the best outcome ».

Figure 1-6 Positive feedback in the VCR market



Source : Kline, 2001: 98

Le marché n'avait pas opté pour la solution la plus performante mais pour celle qui avait offert le plus grand nombre d'avantages aux clients. Dans ce cas précis, les agents « grand public » et « professionnels » se sont distingués par leur choix technologique. Mais au final, il n'y a pas eu de technologie dominante sur l'ensemble du marché.

Selon Liebovitz et Margolis (1999), le cas VHS vs Beta ne mettrait pas en lumière un phénomène de « *lock-in* » mais la capacité du marché de passer d'un standard à un autre compte tenu des avantages offerts.

Le troisième cas généralement utilisé pour illustrer les phénomènes de « *path dependence* » est celui des systèmes d’exploitation dédiés à l’informatique. Bien que le système proposé par Microsoft (MS) soit considéré comme moins performant que celui offert par Macintosh, les réticences des utilisateurs du MS DOS et leur refus d’adopter cette solution alternative ont créé un phénomène de « *lock-in* » qui a ralenti la diffusion de ce système d’exploitation et freiné le développement de Macintosh.

Un parallèle peut être fait entre ces deux derniers cas. En effet tout comme le Beta – adopté par les professionnels de l’animation, Macintosh est apprécié des infographistes. Ces derniers, dans leur grande majorité, utilisent le Mac non seulement pour la qualité de ses interfaces mais également pour ses logiciels graphiques. Ce choix avait été opéré à l’époque où le MS DOS n’offrait pas de solutions satisfaisantes et bien que les performances aient évolué, la profession continue de privilégier le système proposé par Mac créant ainsi un sentier.

David et Arthur ont été des précurseurs en introduisant dans les années 1980 et 1990 le débat sur la pertinence des sentiers de dépendance. Leurs travaux (1985, 1988, 1989), illustrés par les cas stylisés ci-dessus ont mobilisé ce concept pour montrer les effets de « *lock-in* » sur le plan technologique. David, pour illustrer le fait que des choix technologiques ont pu être influencés par des facteurs autres que celui d’un choix optimal dans un marché parfait s’appuie sur le cas du clavier QWERTY. Pour l’auteur, il n’est pas possible de comprendre pourquoi certaines technologies ont été choisies au détriment d’autres sans avoir analysé les événements qui se sont produits dans le passé et leur impact sur les technologies existantes. Ce propos est illustré par le « *history matters* » de Liebovitz et Margolis.

Le cas du clavier QWERTY pour David est dû à trois facteurs qui ont conduit à un « *lock-in* » : « [...] *three features of the evolving production system were crucially important in causing QWERTY to become « locked-in » as the dominant keyboard arrangement. These were technical interrelatedness, economies of scale and quasi-irreversibility of investment. They constitute the basic ingredients of what may be called “QWERTY-nomics”* » (David, 1985: 334). Ainsi, il est possible de parvenir à une chronologie des faits ayant conduit au « *lock-in* ».

L’apprentissage par l’usage et les externalités de réseau qui en découlent permettent d’améliorer la technologie et donc de lui conférer une (certaine) supériorité par rapport

aux technologies concurrentes. Au fur et à mesure de son adoption les économies d'échelle qui vont être générées et les « rendements informationnels » vont venir renforcer sa position. « *Les interrelations technologiques caractérisent enfin la période durant laquelle le « lock-in » tient principalement par le fait que la technologie dominante représente désormais beaucoup plus qu'elle-même : une base productive* » (Foray, 1989 : 29)

À la suite des différents cas utilisés pour illustrer le phénomène de lock-in (verrouillage), il est possible de conclure qu'une technologie peut être adoptée bien qu'elle ne soit pas la meilleure mais parce qu'elle a été initialement choisie. Une telle décision peut conduire à un processus de standardisation technologique bien qu'elle ne constitue pas une solution optimale. A son stade le plus évolué, le lock-in peut être illustré par le fait qu'une ancienne technologie (voire obsolète) puisse continuer à être utilisée malgré l'existence d'une technologie plus performante répondant aux besoins (de la production, par exemple). Les externalités positives pouvant être produites sont alors ignorées.

Le comportement des firmes peut être analysé en qualifiant l'innovation de processus à la fois d'apprentissage et d'irréversibilités technologiques. Ainsi, l'industrie automobile a-t-elle « accumulé » une somme considérable de connaissances et d'expériences spécifiques à chaque constructeur qui révèlent les choix effectués en matière de trajectoire technologique. Les choix passés trouvent leur prolongement dans le présent et dans le futur. L'innovation ainsi que le processus qui la sous-tend fait référence à l'histoire, « *history matters* » (Liebovitz, Margolis, 1999 : 981) sont directement liés à la dépendance de sentier.

Comme cela a été montré au travers des cas stylisés, dès lors qu'une technologie a été adoptée, un processus de verrouillage rendra celle-ci dominante. Mais ce sont les consommateurs, qui, en choisissant l'une ou l'autre des technologies en compétition, lui permettront d'émerger par rapport à ses concurrentes.

2.3 Modèles de diffusion technologique et rendements croissants d'adoption

Pour Schumpeter, le processus de diffusion a été analysé comme un élément du contexte économique. Stoneman (2007) considère que le processus de diffusion implique la naissance et la mort des firmes ou au moins l'expansion et la contraction de

sociétés (destruction créatrice) et implique des changements endogènes significatifs tant au niveau des facteurs de production que des coûts de production.

Du point de vue technique, le processus de diffusion technologique peut être assimilé à un processus d'apprentissage. Cette forme d'apprentissage passe par l'interaction sociale et permet la mobilisation de la connaissance tacite. En se situant dans le champ technologique, l'analyse de cet apprentissage permet de voir le processus selon lequel la connaissance nécessaire à la diffusion d'une technologie a été mobilisée. Ceci conduit à noter l'importance, d'une part de la connaissance tacite dans la diffusion de la technologie et d'autre part, celle du partage de la connaissance. En effet, c'est grâce au partage de cette connaissance qu'une technologie donnée sera de plus en plus adoptée et se diffusera. Hall et Khan (2002) appréhendent la diffusion comme résultant d'un processus cumulatif dans lequel les avantages liés à l'adoption d'une nouvelle technologie interviendront de manière incrémentielle. Face à l'incertitude de l'environnement et à des informations souvent limitées les calculs individuels conduiront à privilégier une technologie par rapport à une autre. Afin de pouvoir comprendre comment une technologie devient dominante, il est utile d'étudier d'une part les modèles de diffusion technologique (2.2.1) et, d'autre part, les rendements croissants d'adoption (2.2.2).

2.3.1 Les modèles de diffusion technologique

La vision schumpétérienne du processus de diffusion considère que la propagation une fois entamée suivra son propre rythme. Dans le processus de diffusion, l'utilisation d'une technologie se propageant génère une utilisation croissante de celle-ci. Pour Stoneman, (2007) l'usage de cette technologie se poursuivra et s'étendra même en l'absence de chocs externes.

Stoneman (2007), dans une approche schumpétérienne de la diffusion, identifie deux forces principales qui vont permettre à ce processus de se développer. La première est « *l'émulation* » des entrepreneurs qui vont réaliser des profits plus importants grâce à la nouvelle technologie qu'ils ont introduite, ce qui aura pour effet d'attirer d'autres entrepreneurs souhaitant augmenter leurs profits en copiant cette technologie. La seconde est un « *effet prix* ». Au fur et à mesure que l'innovation initiale se diffusera et sera copiée, les prix vont évoluer et le coût de l'ancienne technologie baisser en même temps que sa rentabilité. L'auteur compare le processus de diffusion à un modèle de

diffusion épidémique viral et fait un parallèle avec la littérature médicale qui utilise ce type de modèle pour analyser la diffusion d'une maladie par contact humain. Desprez (2010 : 21) analyse également les évolutions et la diffusion d'une innovation selon le modèle viral : « *on va au contact du client, on adapte, on repart à la conquête. Comme un virus qui mute tant qu'il n'a pas trouvé la porte d'entrée de la cellule. Car une bonne innovation fonctionne comme une épidémie : ce sont les clients qui se 'refilent' les nouveautés, et non pas les nouveautés qui convainquent les esprits* ».

Stoneman (2007: 383-384) affirme également que, plus le nombre d'utilisateurs d'une nouvelle technologie augmente, plus le nombre de personnes ne l'adoptant pas, est susceptible d'augmenter. Néanmoins l'adoption est un facteur incitant à plus d'adoption. « *Schumpeterian approach to diffusion involves self-propagation with usage of a new technology generating use per se* ». Cet argument souligne l'importance de l'usage dans la propagation d'une technologie.

L'approche évolutionniste de la diffusion technologique fournit, au travers des écrits de Metcalfe (1994, 1995), des modes et des mécanismes de diffusion alternatifs.

Un des arguments repris par Stoneman (2007) est que les profits des entreprises ou du moins une partie, sont réinvestis en R&D. Cela conduit à penser que plus les profits seront élevés, plus le niveau d'investissement sera important en comparaison avec d'autres firmes moins rentables. Ainsi, une entreprise qui introduira une nouvelle technologie d'un niveau supérieur à celui de ses concurrentes, sera plus rentable qu'une firme qui n'aura pas investi ou n'aura pas fait le bon choix technologique.

Il est possible de conclure à partir de cette analyse que la décision d'être le premier à investir dans une technologie supérieure se révélera « payant » et que cette option influera sur la croissance de cette firme et augmentera ses parts de marché tant que des technologies concurrentes n'apparaîtront pas.

Boulding (1991) considère que l'analyse évolutionniste du changement est liée à l'existence de « *niches vides* » dans les écosystèmes existants et que celles-ci peuvent être remplies par la mutation génétique ou la migration des espèces. Il illustre son propos à partir des lapins qui avaient été introduits en Australie et qui se sont développés de manière exponentielle, pour analyser la diffusion de l'automobile. Il n'y avait aucune niche disponible dans le monde pour l'automobile avant la découverte du pétrole et la production d'essence, qui à l'origine constituait le sous-produit non désiré

du kérosène utilisé dans les lampes à huile. Une fois l'essence découverte, il a été difficile de ne pas inventer le moteur à combustion interne. Les automobiles se sont répandues à travers le monde comme les lapins en Australie, dans la mesure où elles semblent elles aussi dépourvues de prédateurs tels que des transports en commun adéquats ou autres substituts, bien que, à terme, elles risquent de manquer de nourriture (pétrole).

Foray (1989 : 17) identifie quatre articles (1987, 1988a et b, 1989) qui permettent à Arthur de poser les bases de sa théorie de la compétition technologique : la diffusion technologique est un processus dynamique, dont le moteur réside dans l'action même d'adopter. Celle-ci fonctionne en effet comme un mécanisme de « *self-reinforcing* », qu'Arthur formalise à l'aide de la notion de rendements croissants d'adoption. Les « *modèles de diffusion technologique* » permettent de comprendre et d'expliquer la diffusion d'une technologie.

La diffusion d'une technologie apparaît comme étant étroitement liée aux rendements croissants d'adoption. « *What makes competition between technologies interesting is that usually technologies become more attractive – more developed, more widespread, more useful – the more they are adopted* » (Arthur, 1988).

Pour Arthur (1988, 1989) ce processus s'inscrirait dans une dynamique d'« *auto-renforcement* » qu'il explique par le concept de « *rendements croissants d'adoption* » selon lequel plus une technologie est adoptée, plus elle se diffuse. Ce faisant, il souligne le rôle des « *externalités de réseau* » pouvant intervenir au cours du processus d'adoption. Ce sont les premiers adoptants « *early adopters* » d'une technologie qui vont favoriser ou freiner sa diffusion. En effet, selon la nature des feedbacks (retours d'expérience), les premiers adoptants vont agir comme des prescripteurs. Plus les retours d'expérience seront positifs, plus grand sera le nombre de personnes à adopter cette nouvelle technologie. Ainsi, la croissance des parts de marché sera donc étroitement liée aux avis qui auront été émis. De nos jours Internet et les réseaux sociaux se révèlent être un très important vecteur pour la diffusion des feedbacks.

2.3.2 *Les rendements croissants d’adoption*

Arthur considère que les rendements croissants d’adoption trouvent leur source :

- d’une part dans le « *learning by doing* » (apprentissage par l’usage). Plus une technologie est utilisée, plus son apprentissage permet un usage efficace et donc son adoption dans la mesure où des améliorations détectées lors de l’utilisation sont incorporées. Pour Sahal (1981), l’adoption croissante d’une technologie ouvre la voie à l’amélioration de ses caractéristiques. Rosenberg associe à la notion de « *learning by using* » la propriété de « *self-reinforcing* » : « *the improvements included in learning by using play an important role in the decision to adopt new technologies* » (Rosenberg, 1982: 140).
- d’autre part dans les « *externalités de réseau* ». Le cas « réseaux téléphoniques » est une illustration intéressante. En effet un tel dispositif n’a d’intérêt qu’à partir du moment où il y a des abonnés. Au fur et à mesure que leur nombre va grandir, le nombre de personnes souhaitant s’y raccorder va croître.

Arthur (1988, 1990) identifie également trois facteurs susceptibles de favoriser leur développement :

- **Les rendements croissants d’informations**, qui permettent de réduire les blocages pouvant restreindre sa diffusion en raison d’une peur des nouvelles technologies par manque ou absence de compréhension du mode d’utilisation.
- **Les économies d’échelle** lors de la production,
- **Les interrelations technologiques.**

Comme cela a été démontré au travers des exemples cités précédemment, l’accroissement de l’adoption d’une technologie a pour effet d’augmenter son rendement et par voie de conséquence d’amplifier son attractivité pour de potentiels adoptants. Arthur (1988) qualifie ce processus de propriété de « *path dependence* ».

Cette propriété est ainsi définie par Liebovitz et Margolis « *Where we are today is a result of what happened in the past* » (1988). L’histoire, le passé ainsi que les origines de la compétition sont des facteurs décisifs dans les résultats qui seront obtenus. L’adoption d’une technologie aux dépens d’une autre est selon David (1985) dépendante de « *petits événements inconnus* » (« *small unknown events* ») constitués par des « *accidents historiques* » (« *historical accidents* »).

Le rôle déterminant du marché et des avantages offerts, en lien avec les sentiers de dépendance a été formalisé par Arthur (1989) (Tableau 1-2) mettant en lumière la probabilité d’un lock-in d’insatisfaction en relation avec l’augmentation du retour sur investissement

Tableau 1-2 - Adoption Payoffs

Number of Previous Adoptions	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Technology A	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Technology B	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34

Source : Arthur, 1989 : 119

Le Tableau 1-2 analyse deux technologies en concurrence. Les avantages obtenus varient en fonction de l’évolution du nombre de personnes adoptant l’une ou l’autre des technologies. Ainsi, selon Arthur, la première personne obtiendra un avantage de 10 si elle opte pour la technologie A et de 4 pour la technologie B. Les personnes suivantes renforceront le choix de l’option A. Il faut néanmoins noter que s’il existe un nombre suffisant de personnes pour adopter ces technologies, l’option B se révélera celle qui offrira le plus haut niveau d’avantages. L’auteur insiste sur le fait que des choix individuels conduiraient à un verrouillage en faveur de la technologie A.

Les technologies modernes sont de plus en plus complexes et montrent des rendements croissants d’adoption. Au fur et à mesure de leur adoption, les retours d’expérience interviennent et des améliorations sont effectuées. Rosenberg (1982) avait mis en lumière ce phénomène qu’il appela « *learning by using* ». Comme le souligne Arthur (1989), si plusieurs technologies sont en compétition des évènements insignifiants seront susceptibles de donner l’avantage à l’une ou l’autre d’entre elles et inciter à son adoption. Plus le taux d’adoption sera élevé plus le produit bénéficiera d’améliorations et évoluera comparativement à ses concurrents.

La « *propriété de path dependence* » décrite par Arthur (1989) compare des technologies qu'il qualifie de « *sponsorisées* », c'est-à-dire qu'elles appartiennent à des firmes qui en sont propriétaires et qui, en conséquence, sont libres non seulement d'en fixer le prix mais de les utiliser à des fins stratégiques.

Le modèle ainsi développé compare deux technologies, notées A et B , non « *sponsorisées* » et part de l'hypothèse selon laquelle deux types d'agents R et S , représentés de façon identique, vont se différencier par leur préférence pour l'une ou l'autre des technologies. Pour chaque période t , chacun des agents i optera pour la technologie A ou la technologie B .

Les rendements croissants (ou décroissants) d'adoption en tenant compte de la valeur nette de chaque technologie dépendra tout d'abord du nombre d'utilisateurs actuels n_A et n_B et de la période à laquelle le choix a été opéré – le gain augmente de manière linéaire par rapport au nombre d'utilisateurs, puis des rendements d'adoption, croissants, décroissants voire constants indiqués par r et s et enfin du choix naturel des agents pour l'une des technologies.

L'auteur parvient à ces inégalités:

$$a_R > b_R \quad \text{et} \quad a_S < b_S$$

pour indiquer que les agents R choisissent la technologie A alors que les agents S adoptent la technologie B .

Dans ces inégalités, si

$R, S > 0$ rendements croissants d'adoption,

$R, S = 0$ rendements constants d'adoption

$R, S < 0$ rendements décroissants d'adoption

Les rendements associés à l’adoption des technologies, pour chaque type d’agent sont représentés

Tableau 1-3 selon le modèle d’Arthur.

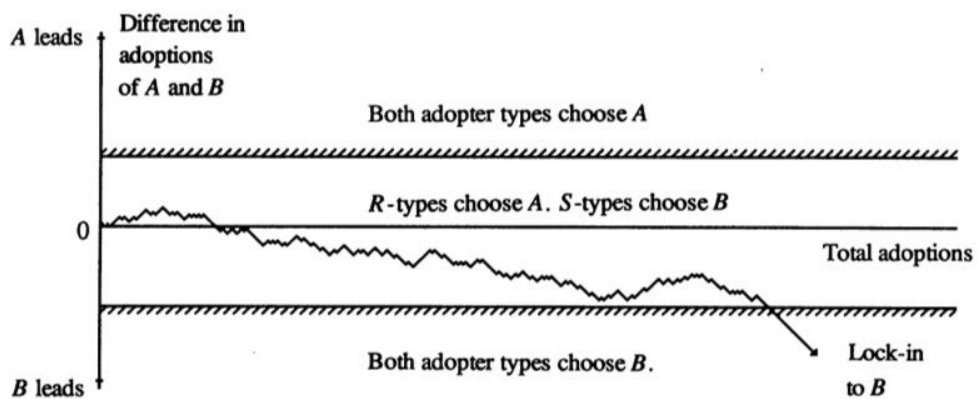
Tableau 1-3 Rendements associés à l’adoption des technologies selon le modèle d’Arthur (1988a, 1988b, 1989)

	Technologie A	Technologie B
Agent R	$a_R + r n_A$	$b_R + r n_B$
Agent S	$a_S + s n_A$	$b_S + s n_B$

Source : Arthur 1989 : 118

Dans le Graphique 1-3, Arthur, 1989 met en évidence le fait que l’adoption progressive de la technologie B par les agents S va conduire à un phénomène de « *lock-in* » dès lors que les agents R et S auront opté pour cette technologie.

Graphique 1-3 Increasing returns adoption : a random walk with absorbing barriers



Source : Arthur, 1989 : 120

Selon Foray (1989 : 27) le modèle développé par Arthur permet de mettre en lumière des « incertitudes ». Il rejoint l'analyse de Cowan qui souligne les limites du modèle : « In the Arthur's model, it is assumed that the future payoffs to a technology are well known. Typically, however, when a technology is introduced its futures payoffs are not well known. Though the assumption that payoffs will increase with use is a safe one, the degree of improvement is often difficult to predict » (Cowan ,1990).

Cowan considère qu'il existe une incertitude qui génèrerait un certain type de rendements croissants d'adoption, le « *learning about payoffs* » qui est comparable à celui produit par le « *rendement croissant informationnel* ». Il compare deux technologies notées A et B dont l'adoption s'effectue sur la base du « *learning by using* ». Il parvient au terme de son analyse à un résultat identique à celui découlant du modèle d'Arthur et met en lumière la possibilité d'un lock-in sur une technologie moins performante : « *An inferior technology can dominate the market in the following way. Early in the process, the inherently superior technology is used and yields a payoff which leads the decision maker to lower his estimate of how good it « really » is. As a consequence he switches to the other technology. It produces reasonably good result. Because the superior technology is not being used, it has no way to prove its superiority (nor to advance along its learning curve) » (Cowan, 1999).*

PROPOS D’ETAPE – CHAPITRE 1 – SECTION 2

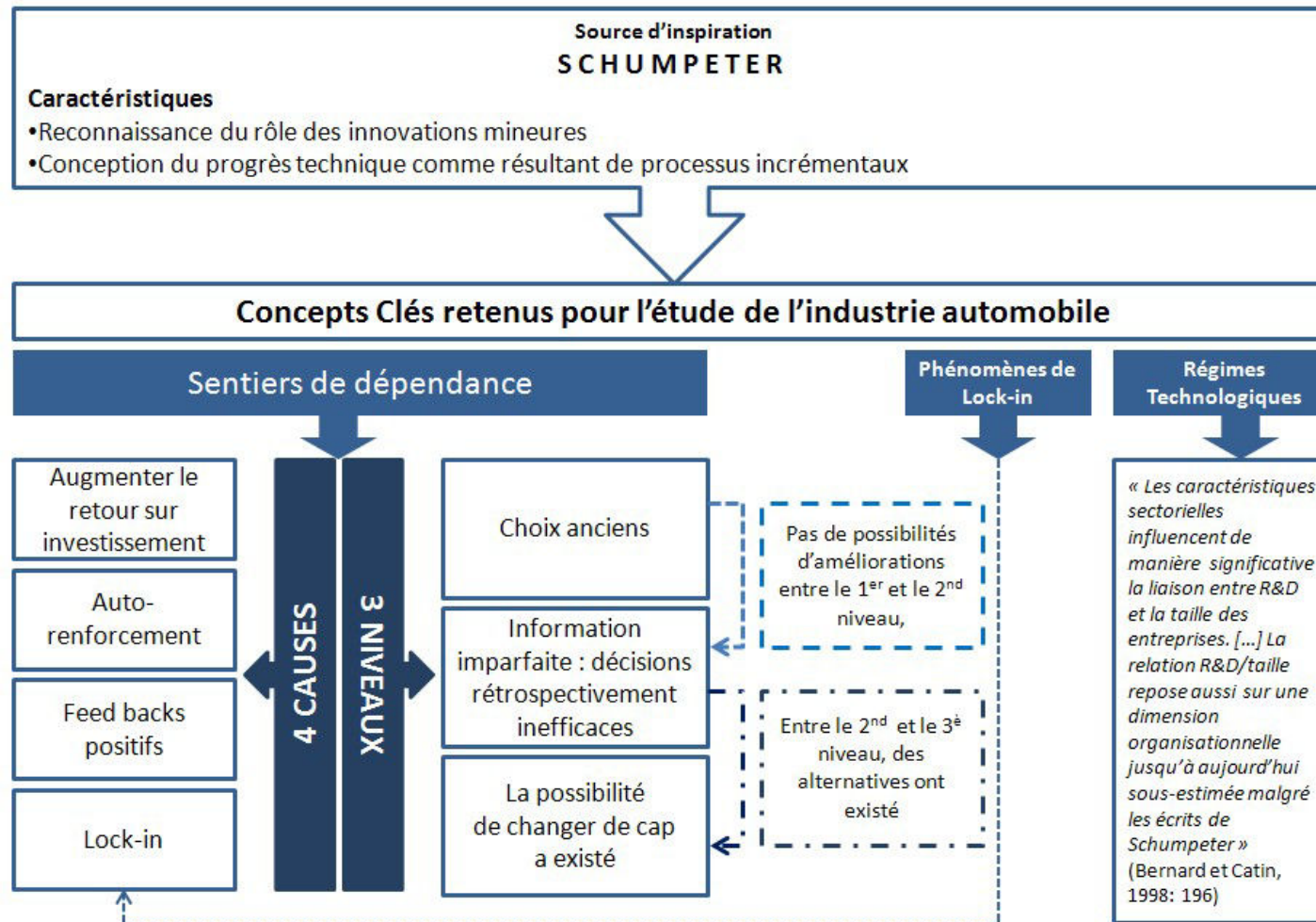
Comme le remarque Fagerberg (2003), les deux décennies écoulées ont vu le renouveau des idées développées par Schumpeter dans ses travaux ainsi que l’émergence de nouvelles idées « *évolutionnistes* » (Nelson et Winter, 1982). Il souligne le fait qu’en vue d’honorer l’auteur autrichien, l’International Schumpeter Society (ISS) a été fondée. La revue qui en est issue, « *Journal of Evolutionary Economics* » est étroitement liée à ce courant de pensée. De nombreux auteurs (Nelson et Winter, 1982 ; Nelson, 1995 ; Stoneman, 2007 ; Metcalfe, 2009 ; Pyka, 2009, ...), notent qu’il existe un « *noyau central conceptuel* » commun à Schumpeter et au courant évolutionniste qui les distinguent des autres approches.

Ainsi, l’analyse évolutionniste de l’innovation, tout en reconnaissant ses emprunts à Schumpeter, prolonge sous un angle « *évolutionniste* », sa pensée et la complète. Alors que Schumpeter considère les innovations mineures comme de petits déplacements, les évolutionnistes reconnaissent le rôle des innovations mineures et analysent le progrès technique comme le résultat de processus incrémentaux.

Plusieurs concepts trouvent leur origine dans l’analyse évolutionniste. Dans le cadre de l’étude de l’industrie automobile, trois concepts clés ont été retenus :

- les sentiers de dépendance – mis en lumière par David (1975). Son étude a été complétée par celles de Mokyr (1990), Rosenberg (1994), Liebovitz et Margolis (1996, 1999),
- les phénomènes de lock-in décrits par Arthur (1989)
- les régimes technologiques.

Figure 1-7 – Interprétation évolutionniste de l'innovation



Source : Réalisé par l'auteur

CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Au terme de ce chapitre, une cohérence épistémologique apparaît entre les écrits de Schumpeter et les approches « évolutionnistes » théorisées à partir de 1982 par Nelson et Winter. En effet, en reconnaissant ses emprunts à l'analyse schumpétérienne, le courant évolutionniste s'inscrit dans la continuité de la pensée de l'auteur autrichien.

Les écrits de Schumpeter constituent ainsi les fondations des travaux contemporains sur l'innovation. L'auteur considère d'une part que la sélection des innovations faite par l'entrepreneur est orientée par les perspectives de profits, et d'autre part que le processus d'imitation entre les concurrents est à prendre en compte. En identifiant ce qu'il appelle les « *cinq cas* » dans lesquels l'innovation peut apparaître, il offre au lecteur un premier cadre d'analyse. Celui-ci sera complété par la distinction entre les innovations incrémentales, qui à ses yeux ne constituent que de petits déplacements et les innovations de rupture. Ce faisant Schumpeter établit une hiérarchie entre les innovations. Celles qui sont de nature incrémentale sont considérées comme mineures alors que celles qu'il qualifie de ruptures introduisent des changements profonds. En remarquant qu'une première innovation, généralement appelée « *innovation ancêtre* » peut donner lieu à d'autres innovations qui en découlent, il théorise le concept de grappes d'innovations. Schumpeter considère le processus d'innovation et de diffusion de la technologie en tant que système.

Dès les années 1980 et 1990, le caractère cumulatif des effets des sentiers de dépendance (« *path dependence* ») sur l'innovation avait été souligné par Dosi (1988). Schumpeter avait émis l'idée qu'une innovation de rupture pouvait être de nature à « ouvrir la voie » à de plus amples développements. Fagerberg (2003) note que cette exploration devait conduire à s'interroger sur les questions à se poser, sur les processus de recherche de solutions, etc. Kuhn (1962) utilisera le terme « *paradigme technologique* » pour qualifier ces interdépendances et suggèrera la notion de « *trajectoires technologiques* » pour qualifier les sentiers tracés par ces paradigmes. Nelson et Winter, dans leur ouvrage fondateur (1982) adopteront le terme pour définir ce type de sentier.

La notion de trajectoire technologique renvoie au fait qu'un paradigme technologique et sa base de connaissance sont de nature à orienter le changement technique, sans pour autant tenir compte des signaux émis par le marché.

L'analyse évolutionniste de l'innovation est à l'origine d'un ensemble de concepts dont les « *sentiers de dépendance* », les phénomènes de « *lock-in* » et les « *régimes technologiques* » qui seront mobilisés pour l'étude de l'industrie automobile, objet de cette thèse. Les origines et les trois niveaux des sentiers de dépendance offrent un cadre pour analyser les phénomènes de « *lock-in* » qui qualifient l'irréversibilité de certains choix technologiques.

CHAPITRE 2

INNOVATION ET ENVIRONNEMENT : ECO-INNOVATIONS INCREMENTALES, ECO-INNOVATIONS DE RUPTURE

Le premier chapitre ayant posé les sous-bassements théoriques nécessaires à l'analyse de l'innovation en général et des évolutions récentes du secteur de l'automobile en particulier, il convient désormais d'examiner en quoi une préoccupation nouvelle, l'internalisation de contraintes environnementales, peut susciter des innovations « nouvelles ». Comment, en faisant évoluer l'environnement institutionnel de la firme, cette nouvelle donne va-t-elle faire apparaître un nouveau design d'innovations, les éco-innovations, permettant à la fois (ou successivement) de réduire les impacts environnementaux du processus de production, et de l'utilisation du produit.

Le deuxième chapitre va montrer que l'innovation ne se limite plus désormais aux « entrepreneurs innovateurs » mais qu'elle est le fruit de synergies entre acteurs du secteur public et du secteur privé, ce qui conduit à mobiliser les concepts « évolutionnistes » de l'innovation. Cette position se justifie par le fait que les

économistes évolutionnistes intègrent l'environnement de l'entreprise dans leur analyse. De plus dès lors que l'innovation est considérée sous l'angle des interactions entre les différents acteurs il est pertinent de s'intéresser aux systèmes nationaux d'innovation (SNI) et à leur « déclinaison sectorielle », les systèmes sectoriels d'innovation (SSI).

Les considérations environnementales sont de plus en plus présentes dans l'industrie en général. La fin annoncée du pétrole, conjuguée aux effets néfastes des pollutions atmosphériques sur le climat, placent en particulier l'automobile face à une double contrainte : celle de réagir rapidement face à l'augmentation de la pollution atmosphérique et réduire voire s'exonérer de sa dépendance aux énergies fossiles.

Certains auteurs n'hésitent pas à mentionner l'opportunité que peut paradoxalement représenter l'émergence de cette contraintes : *« Alors que, dans le monde entier, l'utilisation des ressources naturelles ne cesse de croître et l'environnement de se dégrader, les économistes et les politiques s'inquiètent avant tout de la perte de compétitivité de telle économie nationale ou de telle entreprise particulière. Ils focalisent aussi leur attention sur les performances financières des systèmes économiques au détriment d'une réflexion approfondie sur les changements nécessaires et urgents des modes de production, de consommation et d'échange dans lesquels la 'contrainte environnementale' pourrait se transformer en innombrables opportunités d'innovations et de 'faire autrement' »* (Boutillier et al., 2012 : 11).

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment des tensions étrangères aux mécanismes classiques de la concurrence dans une industrie, des pressions que l'on pourrait qualifier d'exogènes au secteur, ont conduit à l'émergence d'une nouvelle catégorie d'innovations aptes à concevoir des produits et des processus de production plus respectueux de l'environnement. Il montrera également que les éco-innovations constituent une déclinaison de l'innovation (section 1). Les concepts présentés dans le premier chapitre vont par conséquent pouvoir être déclinés en matière d'éco-innovation. Il étudiera également les acteurs et facteurs intervenant sur le développement d'innovations environnementales. Il montrera que ces innovations peuvent être le résultat d'interactions entre les différents acteurs (section 2).

SECTION 1 DE LA FIN ANNONCÉE DU PÉTROLE A LA PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT

La fin annoncée des carburants d'origine fossile (1.1) conjuguée à la prise en compte des effets nocifs sur leur combustion (1.2) vont conduire à un basculement de l'innovation vers l'éco-innovation (1.3).

1.1 Un pétrole plus rare et plus cher

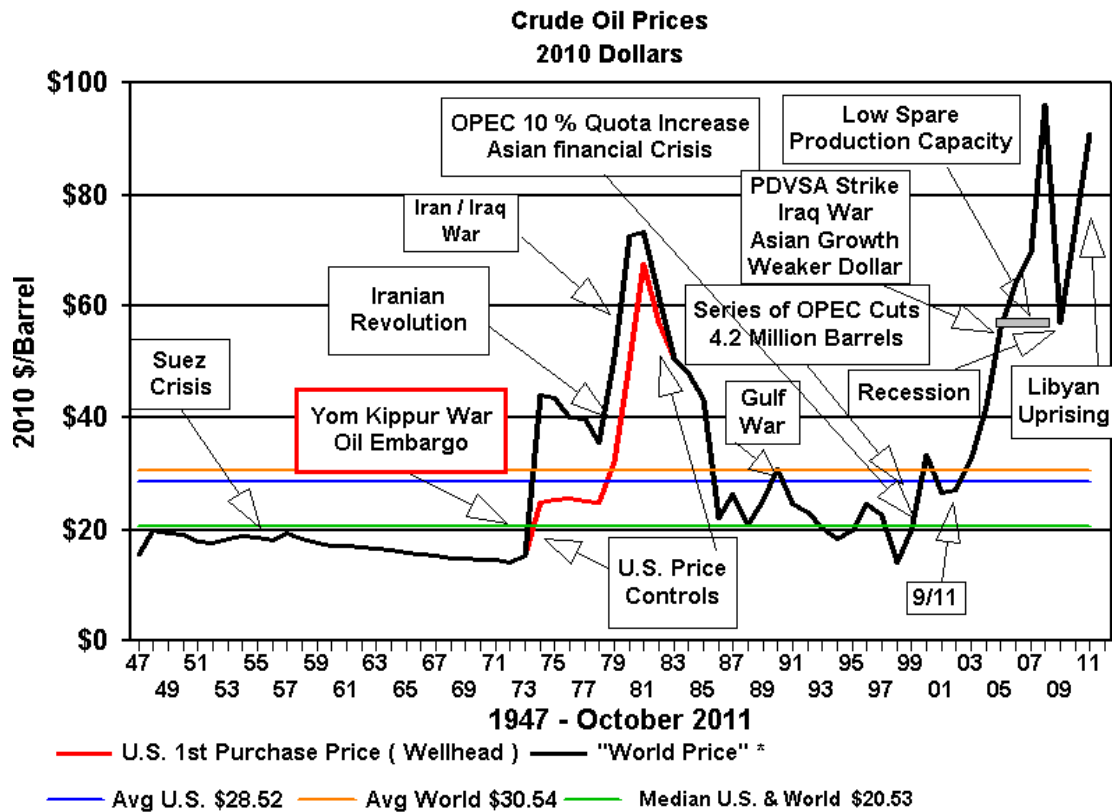
Le premier « choc pétrolier » remonte à 1973. Il fut caractérisé par une hausse brutale des cours du pétrole. Les pays de l'OPEP avaient annoncé une hausse de 70% du prix du baril, un embargo sur les livraisons destinées aux États-Unis et à l'Europe occidentale ainsi qu'une baisse de 5% de la production et avaient déclaré que cette mesure était dirigée « *contre les pays qui soutiennent Israël* », lors de la « *guerre de Kippour* » (6 octobre 1973) (Berthaud, 1992).

Le second choc pétrolier interviendra en 1979 dans le cadre de la « Révolution iranienne » qui aboutira à la chute du Shah d'Iran et à l'arrivée au pouvoir de l'Imam Khomeiny. Celui-ci annoncera une réduction unilatérale des exportations iraniennes de pétrole. Cette décision entraînera une hausse significative des prix : 15,7% pour l'essence, 16,3 % pour le gaz. La hausse la plus importante concernera le fuel qui verra son prix augmenter de 37,3 % (International Energy Agency - IEA).

D'autres chocs consécutifs à des conflits armés sont intervenus depuis 1973 et 1979 : la dégradation des relations entre l'Iran-Irak aboutira à une guerre entre ces deux pays producteurs de pétrole (1980-1988, également appelée première guerre du Golfe), ce qui aura pour effet de créer des tensions durables sur les cours du pétrole. La guerre du Golfe (1990-1991) et l'incendie de plusieurs terminaux pétroliers sur les ordres de Saddam Hussein a eu pour conséquence la relance de la hausse des cours (Graphique 2-1).

« En moins de dix ans, l'économie française a reçu trois chocs majeurs : quadruplement du prix du pétrole en 1973, flambée du prix des autres matières premières en 1976-1977, enfin en 1979-1980, nouvelle hausse du pétrole, suivie d'une envolée du dollar, le tout triplant le prix du pétrole en francs » (Meunier, 1982 : 31).

Graphique 2-1 - Évolutions du cours du baril de pétrole entre 1947 et 2011



Source : WTRG Economics (2012)

Au cœur du fordisme, « l'or noir », depuis plus d'un siècle est l'un des principaux moteurs de la croissance économique (Lefèvre, 2004). Le pétrole intervient dans de nombreux processus, qu'ils soient industriels ou dans le transport. En effet, la pétrochimie, ou « chimie du pétrole », est à l'origine de nombreux produits sans lesquels l'industrie n'aurait pu se développer. Sans pétrole, pas de centrales électriques (celles fonctionnant au charbon et au fuel ont été remplacées en partie seulement par des centrales nucléaires), pas d'automobiles, pas de motrices fonctionnant au fuel (en remplacement des locomotives à charbon), pas de tracteurs ni d'engins agricoles évolués ni d'avions dans le ciel...

Dès lors, il est aisé de comprendre que chaque hausse de prix de cette ressource devenue indispensable impacte négativement l'économie. Cet impact est d'autant plus important que jusqu'à la découverte des biocarburants et des carburants issus d'algues, il n'existait aucun produit pouvant être substitué au pétrole, que ce soit à un coût égal voire inférieur.

Les hasards de l'histoire font que l'annonce de l'épuisement des ressources fossiles se situe dans la même période (à l'aune des grandes phases du capitalisme) que la prise de conscience des effets nocifs de leur combustion. Cette conjonction peut être vue comme une opportunité pour le développement de nouvelles technologies plus respectueuses de l'environnement. « *Les activités économiques de production et de consommation sont polluantes. Pour prévenir le risque de réchauffement climatique durable, l'économie doit faire face à une double rareté : rareté d'abord des ressources énergétiques dont les besoins vont croissants, limite ensuite des capacités de la biosphère à servir de décharge commune aux rejets de gaz à effet de serre et de multiples polluants chimiques* » (Boutillier et al., 2012 : 11).

1.2 La prise en compte des considérations environnementales dans l'innovation

Les phénomènes de pollution sont inhérents au processus d'industrialisation. Dès la révolution industrielle, de nombreuses machines à vapeur mues par l'énergie du charbon ont permis à l'industrie de se transformer en profondeur. Cette période est synonyme d'utilisation de nouvelles techniques, qui ont conduit au développement de nouvelles branches d'activité et à une forte croissance. Si, dans un premier temps, le charbon domine, la découverte de gisements de pétrole et leur exploitation vont rapidement à en faire un concurrent. La combustion du charbon comme du pétrole, va contribuer à libérer toujours plus de CO₂ dans l'atmosphère. Alors que le charbon et le pétrole se sont formés au cours des millénaires, l'homme aura mis quelques décennies pour en épuiser les réserves, du moins celles qui sont exploitables ou connues. Si, selon Edward Lorenz¹⁸ « *le simple battement d'ailes d'un papillon au Brésil pourrait déclencher une tornade au Texas* », Boutillier et al. (2012 : 12) considèrent que « *toute atteinte portée en un point du globe touche ainsi l'ensemble des nations* ». Ces affirmations sont particulièrement pertinentes dans le domaine des pollutions dites atmosphériques. Ce point souligne l'importance et la nécessité d'une approche globale, c'est-à-dire au niveau de la planète et non d'un pays ou d'un continent. C'est dans ce contexte de prise de conscience de la finitude du monde que le terme de « développement durable » va émerger. La popularisation de ce nouveau venu dans la famille du développement onusien va sans aucun doute favoriser l'émergence de

¹⁸ Professeur de mathématiques au Massachusetts Institut of Technologie (MIT), père officiel de la théorie du chaos.

nouvelles modalités de coopération interétatique, dont le protocole de Kyoto constitue la manifestation la plus aboutie (Berthaud et 2004). Ce dernier, finalement ratifié en 2005 sans la participation des Etats-Unis, va favoriser la mise en place d'un cadre normatif.

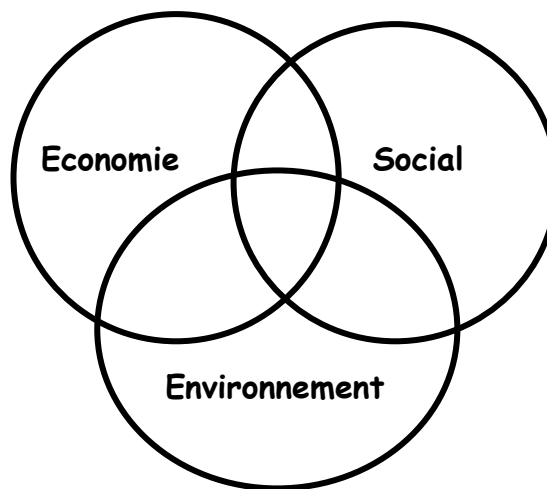
1.2.1 Le « développement durable » : une contrainte incontournable

Selon Blouet et Rivoire (1995), les premières considérations écologiques remonteraient aux années 1950 puis 1970 et se sont traduites par des bilans énergétiques et de consommation de matières premières. Elles concernaient essentiellement l'industrie chimique. Figuière et Rocca (2011) rappellent que l'idée de « *développement durable* » remonte au début des années 1970, avec le projet d'écodéveloppement porté par Ignacy Sachs depuis le sommet de Stockholm en 1972.

Il convient de préciser que le terme « *sustainable development* » généralement traduit par « *développement durable* » est apparu en 1980, dans le rapport « *World Conservation Strategy* » édité par « *The International Union for Sustainable Development* ». (Dresner, 2008: 30) qui donnait la définition suivante : « *the notion of sustainable development is the integration of conservation and development to ensure that modifications to the planet do indeed secure the survival and well-being of all people* ». Son usage ne sera généralisé qu'à partir de 1987, après la publication de la Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement, plus connu sous le nom de Rapport Brundtland (1987). « *The notion of “sustainable development” was essentially coined by the Brundtland report* » (Schiederig, et al., 2011: 3). La définition du développement durable désormais reconnue de manière universelle est précisément issue du rapport Brundtland : « *développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir* ».

Le développement durable se trouve donc à l'intersection de trois dimensions - sociale, économique et environnementale, qui en constituent les piliers. Pour Uzunidis et Gabus (2009 : 273-274), le pilier « *environnement* » concerne « *la réduction des rejets polluants dans l'atmosphère, la protection de la biodiversité, des forêts, des montagnes, des océans et des ressources halieutiques, la promotion d'une agriculture respectueuse du milieu naturel et des énergies renouvelables* ». Le pilier « *économie* » vise « *la lutte contre la pauvreté, la modification des modes de production et de consommation, la coopération internationale et l'aide aux pays en développement* ». Enfin, le pilier « *société* » (social dans la figure ci-dessous) inclut plusieurs objectifs : « *garantir l'accès à l'éducation et à la santé, lutte contre la faim, renforcement du rôle des organisations issues de la société civile* ». La représentation généralement utilisée place le développement durable au cœur des dimensions fondamentales : viable, vivable et équitable (Figure 2-1).

Figure 2-1 – Les trois pôles du Développement Durable



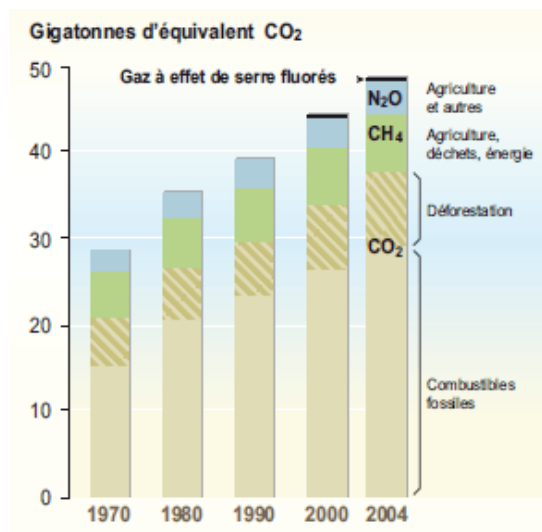
Source : introuvable pour la première version de ce schéma

Ainsi que le rappelle Godard, « *la quête d'un développement durable est usuellement comprise comme la prise en compte de trois exigences : le développement économique, la viabilité environnementale et l'équité sociale* » (Godard, 2002 : 102).

La transition entre le « *développement durable* » et la « *durabilité* » des produits se retrouve dans la déclaration de Johannesburg (2002) qui notait les synergies existant entre le développement durable – développement économique et social, et la protection de l’environnement, chacun confortant et consolidant l’autre et mettant en lumière les interactions complexes reliant les différentes dimensions -sociale/sociétale/économique, la temporalité et les parties prenantes - entreprises, institutions, actions individuelles,...

Les différents sommets qui ont marqué la période 1971-2005 ont progressivement mis l’accent sur l’impact de l’activité humaine sur l’environnement et plus particulièrement sur le climat. En 1988, le Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat (GIEC) dont l’une des missions consiste à évaluer les publications permettant de mieux cerner les possibles conséquences du changement climatique imputable à l’homme et à ses activités, a vu le jour. Sa création intervient à la suite de la première conférence mondiale sur le climat de Genève (22 mars 1985), de la Convention de Vienne sur « *la protection de la couche d’ozone* » et du Protocole de Montréal relatif aux « *substances qui appauvrissent la couche d’ozone* ». Le GIEC (2009) soulignait la croissance de 70% des émissions de gaz à effet de serre (GES), dont le dioxyde de carbone – CO₂ lié à l’utilisation de combustibles fossiles tels que le charbon ou le pétrole (Graphique 2-2).

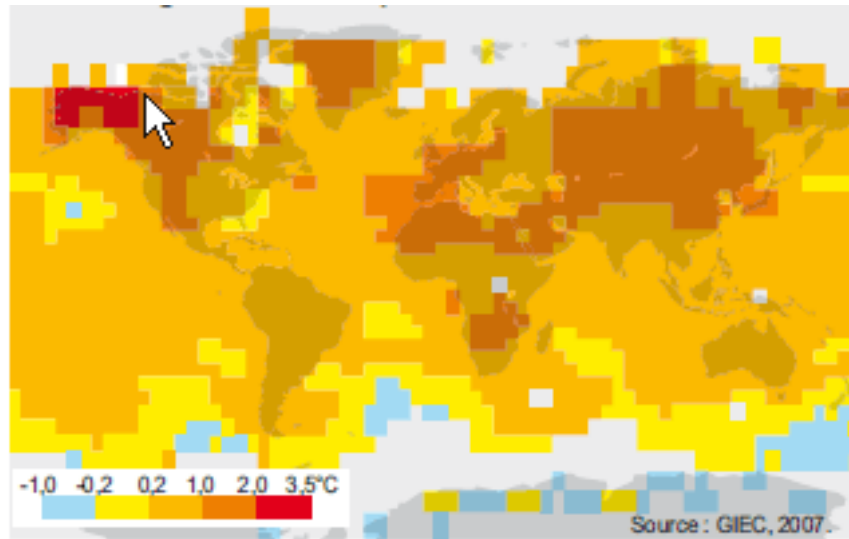
Graphique 2-2 - Émissions mondiales de gaz à effet de serre depuis 1970



Source : GIEC, 2007

Parmi les conséquences observées imputées au changement climatique, figure l'augmentation générale, au niveau mondial, des températures (air et eau-océan). Cette élévation peut atteindre jusqu'à 3,5°C comme le montre la Carte 2-1 qui analyse les variations de températures sur la période 1970 – 2004.

Carte 2-1– Changement de température entre 1970 et 2004



Source : GIEC, 2007

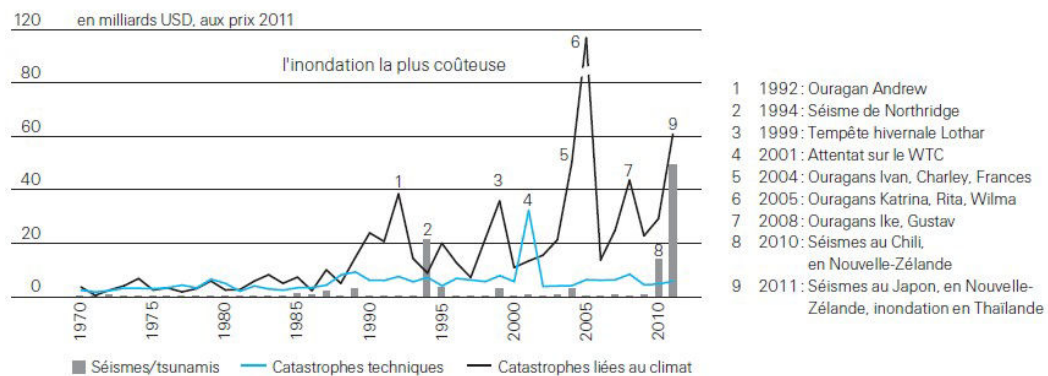
Cette élévation des températures a une influence sur de nombreux phénomènes naturels et est considérée comme étant la source d'événements climatiques extrêmes : précipitations, hausse du niveau de la mer, fonte des glaces, sécheresses, températures et précipitations inhabituellement élevées, ... Les conséquences des dérèglements climatiques sont également ressenties par les populations au travers de famines, d'inondations, de dégâts occasionnés par les cyclones tropicaux, ... Comme le rappelle le GIEC, « *de nombreux systèmes naturels sont affectés par les changements régionaux de climat, et notamment les augmentations de température* ». (GIEC, 2009 : 13).

L'étude Sigma sur les « *catastrophes naturelles et techniques* » (Swiss Re, 2012) révèle que les dommages économiques liés aux catastrophes naturelles¹⁹ en 2011 ont été les plus élevés jamais enregistrés avec un chiffre record de 370 milliards USD (dollar américain). L'inondation qui s'est produite en Thaïlande a coûté à elle seule 12 milliards USD.

¹⁹ L'étude considère comme catastrophe naturelle, les événements causés par la nature (Sigma, 2012 :41)

Le coût des dommages assurés relatif aux 175 catastrophes naturelles (Graphique 2-3), est dans son ensemble estimé à 110 milliards USD. Kurt Karl²⁰ (Swiss Re, 2012) note qu'au cours de l'année 2011, des catastrophes naturelles aussi inhabituelles que dévastatrices se sont produites entraînant de lourdes pertes tant humaines que matérielles, sans compter le traumatisme en découlant. Dans ce graphique, il est important de noter que la courbe symbolisant les catastrophes naturelles connaît plusieurs pics importants : 1992 – ouragan Andrew, 1999 – tempête hivernale Lothar, 2005 – Ouragans Katrina, Rita et Wilma, 2008 – ouragans Ike et Gustav et suit une tendance indiquant des coûts de plus en plus élevés.

Graphique 2-3 - Coût des dommages assurés entre 1970 et 2011



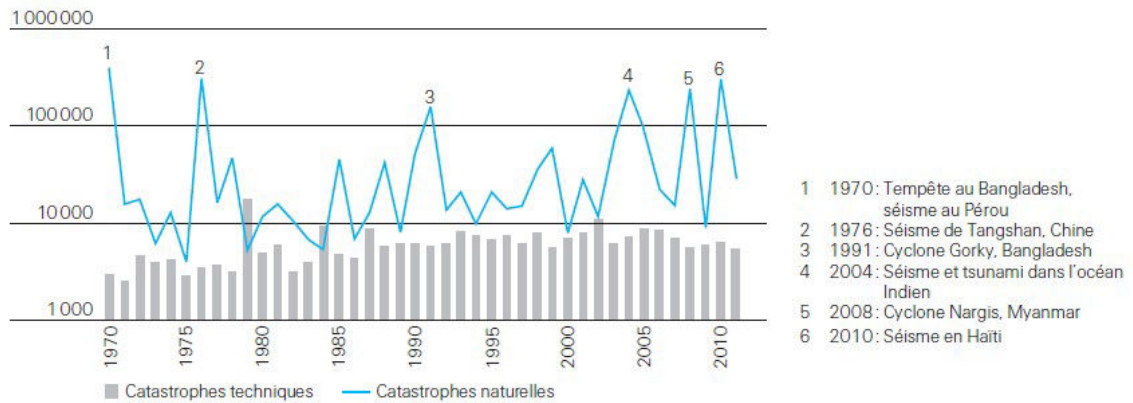
Source : Swiss Re (Sigma, 2012 : 6)

Les inondations sans précédent et très dévastatrices en Australie (2 milliards USD) et en Thaïlande (12 milliards USD) ont au-delà du coût économique des dommages assurés, ravagé des régions et fait près de 370 000 victimes dont 22 000 ont perdu la vie.

Le Graphique 2-4 montre que la dernière catastrophe naturelle du XXe siècle ayant fait plus de 100 000 victimes remonte à 1991. Il est possible de noter sur ce graphique que le phénomène s'est accéléré avec des événements majeurs en 2004, 2008 et 2010. L'augmentation du rythme des catastrophes naturelles liées au climat, leur répétition dans certaines zones et leur coût tant sur le plan humain que financier justifie les inquiétudes des pays qui les subissent.

²⁰ Kurt Karl est économiste en chef chez Swiss Re et co-auteur du rapport Sigma 2/20120

Graphique 2-4 - Nombre de victimes entre 1970 et 2011

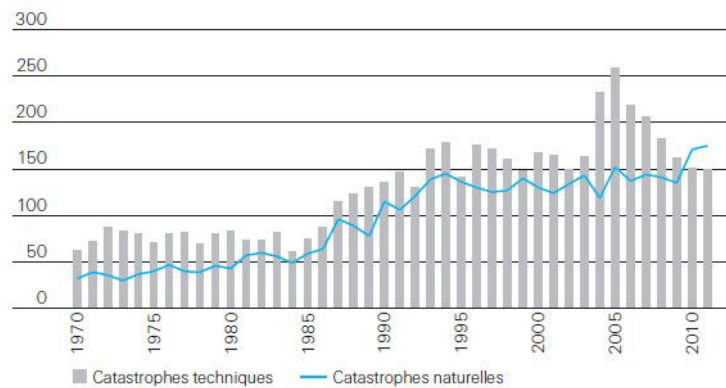


Remarque : le nombre de victimes, présenté sur une échelle logarithmique, est multiplié par dix à chaque tranche.

Source : Swiss Re (Sigma, 2012 : 4)

Sur le Graphique 2-4, deux pics sont à noter l'un en 2005 concernant les « *catastrophes techniques* » et l'autre en 2011, relatif aux « *catastrophes naturelles* ». La tendance générale des catastrophes naturelles montre une hausse constante de ces phénomènes malgré deux niveaux bas en 1989 et en 2004.

Graphique 2-5 - Nombre d'évènements entre 1970 et 2011



Source : Swiss Re (Sigma, 2012 : 3)

L'aggravation des conditions climatiques – pluies torrentielles, tornades, fonte des pôles, élévation de la température, etc. est attribuée aux modes de production et de consommation qui ont prévalu depuis des décennies. Les possibles effets d'un réchauffement climatique (Carte 2-2), concerneraient l'ensemble de la planète, à des degrés divers. Trois zones semblent se détacher pour leurs facultés d'adaptation à un tel phénomène : l'Amérique du Nord, l'Europe, le groupe Australie-Nouvelle-Zélande.

Carte 2-2- Possibles effets d'un réchauffement climatique (Projection 2050-2100)



Source : Les Dossiers en ligne de la Documentation Française

<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/dossiers/changement-climatique-index.shtml/changement-climatique-carte-monde-rechauffe.shtml>

Le rapport de la Banque Mondiale anticipe une élévation de la température du globe de 4° dès 2060. « *The 4°C scenarios are devastating [...]* » (2012 : ix). Aux catastrophes naturelles envisagées viendraient s'ajouter des vagues de chaleur, des inondations, des pénuries liées à la baisse des stocks alimentaires, entraînant des famines et donc de nombreux décès, une montée du niveau de la mer conduisant à déplacer des populations. Et, qui plus est, il n'existerait aucune certitude que la planète soit à même de s'adapter à ces nouvelles conditions climatiques ni qu'il soit possible de s'adapter à une planète dont la température aurait augmenté de 4°C.

Toujours selon la Banque Mondiale, si le niveau actuel d'émissions de CO₂ se maintenait, le réchauffement climatique se situerait alors au-delà des 4°C et les conséquences seraient difficiles à imaginer. Jim Yong Kim(2012), Président de la Banque Mondiale déclarait « *It would be so dramatically different from today's world that it is hard to describe accurately; much relies on complex projections and interpretations* ».

C'est dans ce climat sur le changement climatique et les coûts (humains et financiers) qu'il occasionne, ou va potentiellement occasionner, que la plus célèbre des conventions de l'ONU, popularisée sous l'appellation de « Protocole de Kyoto », va voir le jour.

1.2.2 Le Protocole de Kyoto : un nouveau contexte pour l'innovation

En 1992, lors du « Sommet de la Terre » qui s'est tenu à Rio de Janeiro, 189 pays ont ratifié la « Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) » et signé un traité et qui ne comportait aucune mesure contraignante mais demandait aux pays signataires de stabiliser leurs émissions de GES. Venant dans la continuité du Sommet de la Terre, la conférence de Kyoto avait pour objectif de ralentir la hausse des températures imputable aux gaz à effet de serre ainsi que les dérèglements climatiques – ouragans, sécheresses, inondations, etc. en résultant.

Le Protocole de Kyoto identifie six gaz à effet de serre (GES) dont les émissions sont directement corrélées avec le réchauffement climatique :

- Le méthane (CH₄),
- Les hydrofluorocarbones (HFCs),
- Les hydrocarbures perfluorés (PFCs),
- L'hexafluorure de soufre (SF₆),
- L'oxyde nitreux (N₂O)
- Le dioxyde de carbone (CO₂)

Selon l'article 2 de la convention, il s'agit de « stabiliser les concentrations de GES de l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Par cette stabilisation, l'article 2 attire l'attention des signataires sur le fait de ne pas franchir le seuil au-delà duquel les dommages causés à l'environnement deviennent irréversibles et donc irréparables. Il convient de préciser qu'à ce jour aucun chiffre précis fixant ce seuil n'a été communiqué.

Certains parmi ces gaz, comme l'oxyde nitreux (N₂O) ont une durée de vie atmosphérique relativement « courte », de l'ordre du siècle alors que d'autres, tels que les hydrocarbures perfluorés (PFCs) ou l'hexafluorure de soufre (SF₆), atteignent des durées de vie variant de 2 600 à 5000 ans pour le premier et 3 200 ans pour le second (Faucheux, Joumni, 2005 : 11) ainsi que leurs sources, niveaux d'émissions, concentration atmosphérique et évolutions est synthétisée dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2-1 - Les principaux GES visés par le protocole de Kyoto :
Les sources et les niveaux d'émissions, les concentrations atmosphériques et leur évolution**

Gaz	Principales sources	Concentration préindustrielle	Concentration en 1998	Durée de vie atmosphérique	Évolution des émissions depuis fin 1980	% dans les émissions en GES (Annexe I, 1990)
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Combustion d'énergies fossiles, production de ciment.	~ 280 ppm	365 ppm	ans*	Stable pour l'UE, augmentation pour les autres pays de l'OCDE et baisse dans les PET.	81,2
Méthane (CH ₄)	Plantation de rizières, combustion de la biomasse, fermentation, production de ressources fossiles, exploitation du gaz naturel, décharges incontrôlées.	~ 700 ppb	1 745 ppb	12 ans	En baisse dans la plupart des pays. Augmentation importante aux États-Unis, au Canada et en Norvège.	13,7
Oxyde nitreux (N ₂ O)	Combustion de la biomasse, activités industrielles, élevages et activités agricoles.	~ 270 ppb	314 ppb	114 ans	Légère hausse dans la plupart des pays, baisse légère dans les pays industrialisés, baisse dans les PET.	4,0
Hydrofluorocarbène-23 (HFC-23)	Industries, systèmes réfrigérants.	Zéro	14 ppt	260 ans	Hausse importante (substitué aux CFC).	0,56
Hydrocarbures perfluorés (PFC)	Industries, aluminium, secteur électrique et électronique, industries des solvants.	40 ppt (CF ₄)	80 ppt (CF ₄)	2 600-5 000 ans	Stable.	0,29
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	Industries électroniques, électriques.	—	—	3 200 ans	Augmentation dans la plupart des pays.	0,30

* Étant donné les différents taux d'absorption des divers processus d'élimination, aucun temps de séjour unique ne peut être déterminé pour le CO₂.
Abréviations : ppm : parties par million (10⁻⁶) ; ppb : parties par milliard (10⁻⁹) ; ppt : parties par billion (10⁻¹²) : ce sont des ratios entre le nombre de molécules de GES et le nombre total de molécules d'air sec. Par exemple, 270 ppm signifie 270 molécules de gaz à effet de serre par million de molécules d'air sec.

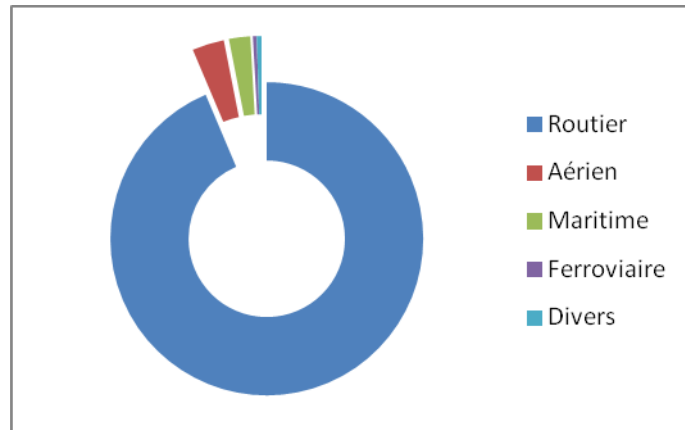
Source : Faucheux et Joumni (2005 : 11)

Compte tenu de ces paramètres et de leur nocivité, leur inscription au titre de la réduction des émissions de GES est pleinement justifiée. Le CO₂, trouve sa source dans la combustion des énergies fossiles et se retrouve dans les émissions automobiles. Le GIEC (1995) notait que la part du CO₂ dans les émissions de GES, était la plus importante, tant sur le plan de sa contribution au réchauffement climatique que pour le caractère irréversible de son accumulation. Le CO₂ serait ainsi, à hauteur de 60% à l'origine de l'accroissement de l'effet de serre.

Selon une étude de l'INSEE (2007) les émissions de CO₂ représentaient 34%²¹ des gaz à effet de serre. 93,6% étaient imputables au transport routier. A titre de comparaison, celles dues au transport aérien étaient de 3,3% contre 2,2% pour le trafic maritime et 0,4% pour les activités ferroviaires (Graphique 2-6).

²¹ Ce chiffre a été ramené à 33,7% en 2010 selon le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL).

Graphique 2-6 - Part des émissions de CO₂ en France selon le mode de transport



Source : INSEE (2007)

L'enquête de l'Observatoire du bilan carbone des ménages, conduite par l'IPSOS (2012), révèle que 54% du CO₂ émis par les foyers français est issu du transport et que la grande majorité serait liée à l'utilisation d'un véhicule particulier. Dès lors, il est crucial de réduire de manière significative l'impact des activités liées au transport automobile. Pour y parvenir, il est nécessaire d'améliorer les performances des motorisations tout en réduisant les émissions de GES. Parmi les différents axes, Jacques Chirac avait insisté sur le besoin de « *renforcer les normes existantes dans le secteur automobile* » et rappelé que « *l'État devra être exemplaire dans sa politique d'achats publics* ». Il avait également manifesté le souhait d'un « *renforcement des programmes de recherche dans les domaines stratégiques (dont ceux) du véhicule propre, de la pile à combustible hydrogène, des biocarburants [...]* ».

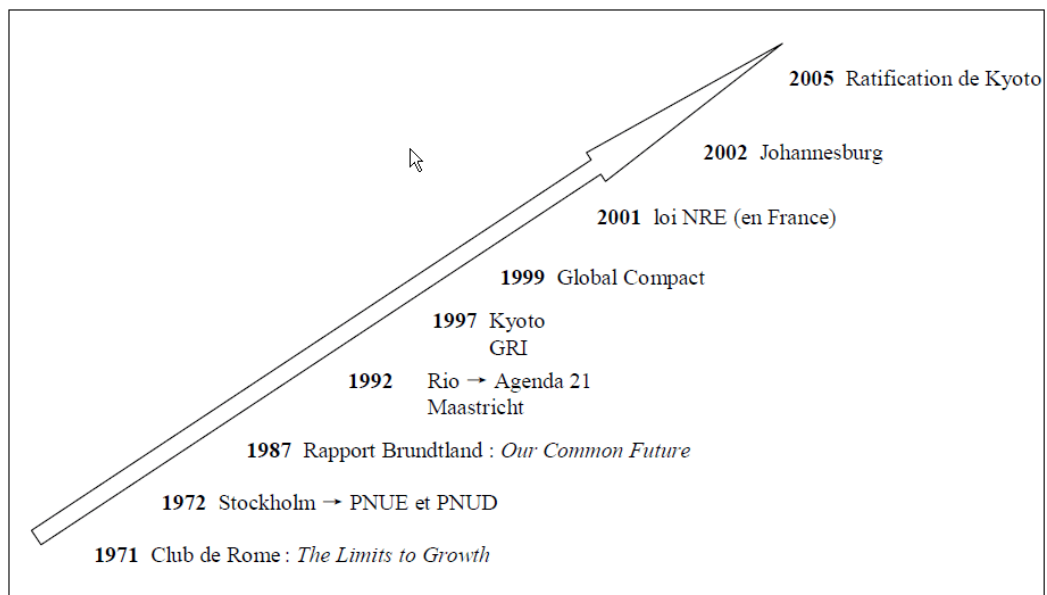
L'importance de ce taux justifie l'étude de solutions alternatives, telles que les véhicules hybrides ou électriques ou de modes alternatifs tels que les véhicules électriques en libre-service.

Berthaud et al. (2004 : 163) soulignent, rejoignant l'analyse de Barrett (1990), que « *le changement climatique est un problème d'environnement global, puisqu'il concerne un bien collectif planétaire : le maintien d'un système climatique jugé acceptable pour la vie des hommes en société, sur notre Terre* ». Les enjeux environnementaux sont à l'échelle de la planète et non d'un continent, d'un groupe de pays ou même d'un pays. En effet, sous l'effet des vents, la pollution émise en un point du globe sera amenée à contaminer d'autres points. Les émissions des gaz à effet de serre par un pays ne

pollueront pas seulement l’atmosphère de ce pays mais l’atmosphère de la Terre. Un tel constat justifie à lui seul que des mesures soient prises de manière globale.

Le Protocole de Kyoto (1997) sur « *la réduction des émissions de gaz à effet de serre* » fut une « *innovation* » dans la mesure où, pour la première fois, des contraintes étaient imposées de manière légale aux États dans le but de lutter contre le changement climatique. « *Le changement climatique est un problème mondial. Il exige une réaction mondiale, et concertée. [...] J’appelle la communauté internationale à faire preuve d’audace, à adhérer au protocole de Kyoto, et à se hâter de prendre les mesures nécessaires. Il n’y a pas de temps à perdre* » (K. Annan, 1997). Kyoto (Figure 2-2) s’inscrit dans le prolongement de réflexions entamées dès 1972 et transcrites dans la Déclaration de Stockholm.

Figure 2-2- Le développement durable : quelques dates clés



Source : J. Ernult, A. Ashta, (2007 : 7)

Tressallet (2008 : 12) rejoint Berthaud et *al.* (2006) et suggère qu’« *avec la ratification du Protocole de Kyoto, une nouvelle politique internationale de l’environnement semblait possible, laquelle aurait fonctionné même sans la contribution de la puissance américaine. Certains théoriciens de l’économie politique internationale considèrent*

ainsi que Kyoto permet de sortir du 'business as usual'²² en ce qu'il constituerait un accord fortement incitatif ».

Malgré les exhortations du Secrétaire Général de l'ONU, il faudra attendre le 16 février 2005 pour qu'entre en vigueur le Protocole adopté en 1997 dont les modalités de mise en œuvre avaient été préalablement fixées par les accords de Marrakech et de Bonn en 2001 (Figure 2-2- Le développement durable : quelques dates clés). Néanmoins le processus de ratification fut plus long : *« il fut ouvert à la signature du 16 mars 1998 au 15 mars 1999 au siège des Nations Unies, à New York. À cette date, le Protocole avait reçu 84 signatures »²³.*

Le texte fixe comme objectif aux pays développés, une réduction d'ici à 2008-2012, de 5,2% de leurs émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990. Or, il faut se souvenir que le Sommet de la Terre à Rio (1992) envisageait la stabilisation des GES au niveau de 1990, pour l'an 2000 et que cet objectif n'a pas été atteint. Faut-il, dès lors considérer que Kyoto se soldera par un échec ? *« Le réchauffement climatique est déjà à l'œuvre, nous savons que Kyoto est un premier pas »* (Dimas, 1997).

Pour Jacques Chirac *« cette étape de Kyoto, même si elle est tout à fait insuffisante, constitue un premier pas dans la bonne direction »*. Il déclarait *« qu'il fallait aller plus loin dans la lutte contre le réchauffement climatique en divisant par quatre, d'ici à 2050 les émissions de GES des pays développés »*. Sur le plan national, l'ex-Président français avait *« souhaité que la France soit exemplaire dans la mise en œuvre de ses engagements et [...] essaie d'aller au-delà de ses engagements de Kyoto »*.

Lors de la signature du protocole de Kyoto en 1998, le Communauté européenne avait souhaité aller au-delà des objectifs fixés par le traité, en s'engageant, pour la période 2008-2012, à une réduction de 8% de ses émissions de GES par rapport à 1990 dont les niveaux servent de référence. Le Conseil européen en validant en mars 2007 les propositions de la Commission européenne (janvier 2007) a renforcé la position de l'UE dont l'objectif est de limiter le réchauffement climatique à 2°C d'ici à 2100 et qui souhaite le développement des énergies renouvelables. Dans ce cadre, *« tous les états se voient ainsi imposer une augmentation de 5,75% des énergies renouvelables [...]»*.

²² Laissez-faire

²³http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/3346.php

Selon ce procédé, en France, les énergies renouvelables devront représenter 23% de la consommation totale d'ici à 2020 ». Ce plan d'action instauré par la Communauté européenne est connu sous la dénomination de « *Paquet Energie-Climat* ». La transposition, au niveau national, des engagements pris dans le cadre de la Communauté européenne s'inscrit dans le « Grenelle de l'Environnement » qui va au-delà des objectifs de l'accord. En effet, selon les conclusions, « *le pays souhaite s'engager à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050* ». Le projet de loi adopté par l'Assemblée Nationale puis par le Sénat prévoit plusieurs mesures affectant la construction, les transports et l'énergie. Il est à noter que ce texte a été adopté en première lecture, révélant le consensus politique autour des enjeux environnementaux.

1.2.3 Un cadre normatif qui s'affirme

Ce n'est qu'en 1994 qu'une Directive Européenne relative aux déchets d'emballages a été mise en place avec la réalisation d'études portant sur l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits. Une telle disposition constituait non seulement une innovation « globale » (touchant à tous les stades de la conception au recyclage, en passant par l'utilisation), mais également une éco-innovation « globale », en raison de son caractère environnemental. En instituant la prise en compte du cycle de vie des produits, la directive incluait implicitement qu'ils devraient être conçus dans le cadre d'une approche « globale » destinée à respecter l'environnement et donc que leur développement se ferait selon un modèle d'éco-conception. De même, il était attendu que les innovations introduites respectent ces règles. Dès lors s'engageait une évolution des innovations vers les éco-innovations.

The Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) définit l'ACV comme « *une évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets* » (SETAC, 1993).

L'année 1996 verra la certification des premières entreprises répondant à la norme ISO 14001 ainsi que la première norme sur les ACV, la norme NF 30-300. En 1998 une norme française relative à la « *prise en compte de l'environnement dans la conception des produits* » sera publiée, marquant les débuts réglementaires de « *l'éco-conception* ».

De son côté, la norme internationale ISO 14044 (octobre 2006) « *spécifie les principes et le cadre applicables à la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) comprenant la définition des objectifs et du champ de l'étude ACV, la phase d'inventaire du cycle de vie (ICV), la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI), la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'ACV, les limitations de l'ACV, la relation entre les phases de l'ACV, et les conditions d'utilisation des choix de valeurs et des éléments facultatifs* ». L'ACV analyse donc, pour chacune des étapes les rejets et les impacts sur l'environnement, considérant chaque produit comme un système.

« *Depuis le début des années 1970, le monde a progressivement pris conscience que la croissance économique n'entraîne pas nécessairement le progrès social et risque même de mettre en péril l'équilibre naturel de la planète.* » (Ernult, Ashta, 2007). Les multiples catastrophes écologiques (chimique : Seveso 1976, nucléaire : Three Mile Island 1979, Tchernobyl-avril 1986, marées noires : Amoco Cadiz-1978, Exxon Valdez-mars 1989 et Erika-décembre 1999, ...) qui ont marqué le XXe siècle sont à l'origine de la sensibilisation du public face aux enjeux environnementaux. Des événements récents tels que Fukushima ont relancé le débat sur la production d'électricité d'origine nucléaire.

Les enjeux et les contraintes du développement durable sont, depuis quelques années, pris en compte et intégrés dès la conception des nouveaux produits. En effet, il s'agit non seulement d'atténuer l'impact environnemental par la limitation des effluents de toutes sortes générés lors de la production, mais également de réduire les consommations tant de matières premières que d'énergie et enfin d'apporter une réponse à la valorisation (recyclage) de ces produits au terme de leur cycle de vie. Le produit, dès sa conception dans les bureaux d'études doit désormais satisfaire aux contraintes environnementales en vue de réduire non seulement son impact mais également les besoins en ressources.

Ainsi, l'éco-conception s'inscrit dans une démarche propre aux enjeux du développement durable et influence la nature des innovations en les orientant vers la prise en compte des considérations environnementales.

Au moment où le modèle actuel est remis en cause apparaissent des innovations issues directement des problématiques environnementales, telles que le premier véhicule hybride, la Toyota Prius, les ampoules « à économie d'énergie » (*fluocompactes*) qui permettent jusqu'à 80% d'économie avec une durée de vie 8 fois plus longue par rapport à une ampoule à incandescence²⁴ ou plus récemment les ampoules LED (*Light-Emitting Diode*). La réduction de la consommation permet de franchir un pas supplémentaire et d'atteindre une durée de vie de 15 ans pour 35 000 heures et un coût d'utilisation divisé par 6 par rapport à une solution traditionnelle. La durée de 15 ans pour une utilisation de 35 000 heures correspondant à une lampe LED sert de référence pour la comparaison des différentes ampoules (Tableau 2-2).

²⁴ Source Philips <http://www.philips.fr/c/-/16555/cat/>

Tableau 2-2 - Comparatif du coût d'utilisation entre les différents types d'ampoules

Type d'éclairage	Ampoule à Incandescence 60W	Lampe « Fluocompacte » (CFL) équivalent 60W	Lampe LED équivalent 60W
Prix unitaire	1€	4€	24.45€
Consommation électrique (en watts)	60W	12.5W	6W
Nombre d'ampoules utilisées en 35 000 heures ²⁵	35	1	1
Coût total de la consommation électrique Base 35 000h (soit 15 ans à raison de 6h/jour)	267.75€	55.75€	26.75€
Coût total d'utilisation sur 35 000h (électricité + ampoules)	302.75€	79.75€	51.20€

Source : Réalisé par l'auteur à partir des données figurant sur les emballages des différents fabricants (Philips, Osram, General Electric, etc.)

En application d'une décision européenne du 8 décembre 2008 relative au « *retrait progressif des ampoules à incandescence* », la loi française a imposé leur retrait selon le calendrier ci-dessous, en raison de leur trop forte consommation électrique.

30/06/2009 : retrait des ampoules à incandescence \geq 100 W

- 31/12/2009 : retrait des ampoules à incandescence \geq 75 W
- 30/06/2010 : retrait des ampoules à incandescence \geq 60 W
- 31/08/2011 : retrait des ampoules à incandescence \geq 40 W
- 31/12/2012 : retrait des ampoules à incandescence \geq 25 W

²⁵ La durée d'utilisation de 35 000 heures a été choisie comme référence car elle correspond à la durée de vie déclarée d'une ampoule led.

1.3 Innovation et environnement : un processus contraint

Pour l'OCDE²⁶, « *le changement technologique est indéniablement l'une des clés pour allier croissance économique et améliorations environnementales. Les politiques et instruments environnementaux doivent donc impérativement offrir des incitations favorisant le développement de technologies « environnementales » et leur diffusion* ».

Les contours de l'innovation sont en train d'évoluer. Bien que la définition de l'innovation reste inchangée, une nouvelle approche destinée à améliorer les produits et leur processus de fabrication sur le plan des émissions de GES, et plus particulièrement de CO₂, a vu le jour, celle d'éco-innovation dans laquelle le contenu environnemental n'est plus annexe mais devient central (1.3.1). Cette nouvelle approche sera définie et analysée afin d'en comprendre les mécanismes (1.3.2).

1.3.1 De l'innovation à l'éco-innovation

En relation avec l'interprétation schumpétérienne et celle de Hampton (2002), la plupart des innovations apparaissent à la faveur de l'amélioration des produits existants (innovations incrémentales) et/ou à la suite de nouvelles idées.

Selon les données du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL, 2009), « *l'innovation est un des principaux facteurs de la croissance économique. La croissance industrielle mondiale est générée pour deux tiers par des produits nouveaux. A la même échelle, 42% des produits exportés en 2005 n'apparaissent pas dans les flux mondiaux dix ans plus tôt* ».

Une nouvelle approche voit le jour dans l'industrie, celle de « *l'éco-innovation* », de « *l'éco-conception* » et d'une « *production durable* » afin d'améliorer, dès la conception, les nouveaux produits et leurs performances environnementales, et innover grâce à des offres de services inédites. « *L'éco-innovation est le processus par lequel se développent de nouveaux produits, processus ou services respectueux de l'environnement* » (Mathieu, 2008 : 7), en exploitant les ressources naturelles de manière rationnelle.

²⁶ <http://www.oecd.org/fr/environnement/politiquedelenvironnementetinovationtechnologique.htm>

1.3.2 Innovation environnementale, éco-innovation, innovation verte : définitions et précisions sémantiques

La définition « générale » de l'innovation peut être considérée comme neutre, dans la mesure où elle est « ouverte », et n'opère pas de restrictions quant au domaine étudié. Les catégories définies par Schumpeter distinguent les innovations organisationnelles, ou de process, des innovations de produit. Cette première division peut faire l'objet de nouvelles divisions en les classant selon leur caractère incrémental ou de rupture. Une nouvelle technologie apparaît-elle apporter des évolutions marginales ou est-elle radicalement différente par rapport à la précédente ? Cette question avait été soulevée par Freeman et Soete (1997) qui avaient noté l'accentuation qui s'opérait en faveur des innovations de process, conjuguées à des augmentations en termes d'efficacité, lesquelles orientaient les innovations plutôt vers l'incrémentiel au détriment de l'innovation radicale.

Pour van Dieren (1995 : 332), « *the eco-innovation itself is related to the concept of sustainable development* ». Dresner (2008) note que le concept d'« éco-innovation » fut utilisé pour la première fois en 1980 par l'International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources dans leur « *World Conservation Strategy Report* ». Ce rapport selon ses auteurs était un plaidoyer en faveur « *the integration of conservation and development to ensure that modifications to the planet do indeed secure the survival and well-being of all the people* » (IUCN, 1980 : introduction). Faber et al. (2005 : 1) soulignent la difficulté à définir le concept de durabilité : « *sustainability is a complex and confusing concept* » face à une multiplicité de définitions « *about 50 definitions and circumscriptions of sustainability exist* » (Faber et al., 2005 : 1). Malgré ces difficultés, la définition du développement durable qui figure dans le rapport Brundtland (1987) offre un cadre d'analyse satisfaisant.

Dans la littérature, il est de plus en plus courant de trouver les termes « vert », « éco », « durable », « soutenable » voire « environnemental » pour qualifier des innovations dont le but est de réduire l'impact sur l'environnement.

Selon, les différents auteurs, les définitions de l'éco-innovation peuvent différer et recouvrir des champs d'analyse différents. Plusieurs approches sont présentées ci-dessous.

Rennings (2000 : 322) suggère de retenir la définition selon laquelle : « *Eco-innovations are all measures of relevant actors (firms, politicians, unions, associations, churches, private households) which; develop new ideas, behavior, products and processes, apply or introduce them and which contribute to a reduction of environmental burdens or to ecologically specified sustainability targets* » couvrant un large champ d'acteurs et de mesures susceptibles d'intervenir dans ce domaine.

Kemp et Pearson (2007 : 7) construisent une définition basée sur celle que l'OCDE donne de l'innovation : « *Eco-innovation is the production, assimilation or exploitation of a product, production process, service or management or business method that is novel to the organisation (developing or adopting it) and which results, throughout its life cycle, in a reduction of environmental risk, pollution and other negative impacts of resources use (including energy use) compared to relevant alternatives* ».

Depret et Hamdouch (2008, 2009) appréhendent ce thème en tant que « *solutions ou ensembles de solutions* » dont le but est d'apporter des éléments correctifs préventifs aux atteintes environnementales possibles et ainsi d'atteindre les objectifs liés à une politique de développement durable. Cette approche préventive se retrouve également dans la définition donnée par l'ADEME qui considère l'éco-innovation comme « *un axe majeur de prévention ou de réduction des impacts environnementaux* » et « *une opportunité nouvelle de différenciation et de compétitivité future* » (Depret, Hamdouch 2008, 2009). Le rôle des innovations à visée environnementale est central.

Arundell et Kemp (2009 : 5) précisent quant à eux qu'il s'agit d'un nouveau concept et apportent une vision de l'éco-innovation prenant en compte la notion de cycle de vie des produits : « *The production, assimilation or exploitation of a product, production process, service or management or business method that is novel to the organization (developing or adopting it) and which results, throughout its life cycle, in a reduction of environmental risk, pollution and other negative impacts of resources use (including energy use) compared to relevant alternatives* ». Les innovations (vertes) peuvent revêtir différentes formes, technologiques, organisationnelles institutionnelles, etc., ce qui n'est pas sans rappeler la typologie générale des innovations de Schumpeter.

Oltra et Saint Jean (2009) estiment que, dès lors qu'une innovation a un impact positif sur l'environnement, celle-ci doit être portée au crédit des éco-innovations.

Les éco-innovations peuvent être suscitées par la pénurie d'une ressource (pétrole, minerais, terres rares), par des considérations d'impact environnemental (réduction des émissions de CO₂ et autres GES, pollution de l'eau).

Dans l'industrie automobile, c'est l'ensemble de la chaîne qui est remis en cause. En effet, il s'agit, non seulement de baisser les volumes d'émissions au cours de la production et en fin de vie, mais également de réduire celles qui vont intervenir lors de l'utilisation, principalement au niveau du CO₂. L'objectif est de présenter l'empreinte carbone la plus faible possible tout au long de la vie du produit.

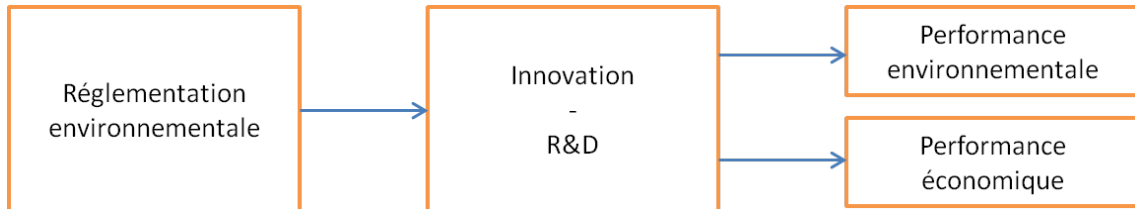
La « typologie » des innovations de Schumpeter reste néanmoins pertinente dans le cadre des éco-innovations, en raison des multiples domaines qui peuvent permettre son application. Ainsi, le périmètre des innovations environnementales est-il fortement influencé par l'efficacité environnementale compte tenu de la propension des entreprises à réduire leur impact environnemental. Cette approche de process s'oppose aux innovations dites de produit, dans la mesure où ces dernières sont susceptibles d'incorporer tout ou partie des externalités positives d'un process. Sur le long terme il apparaît que les innovations environnementales issues d'un processus incrémental ne pourront se poursuivre sans innovations de rupture.

Selon Porter et van der Linde (1995), les réglementations à visée environnementale auraient un résultat positif sur la « *performance environnementale et sur la compétitivité des entreprises* » générateur d'un effet qu'il qualifie de « *win-win effect* ».

Lanoie et Llerena (2007) considèrent que les technologies vertes sont à même d'améliorer les performances économique et environnementale. Pour les auteurs, l'innovation destinée à réduire les rejets polluants de toute nature, l'usage des ressources naturelles ou les effluents contaminants est potentiellement rentable sur le plan économique. Cette argumentation sert de socle à l'« *hypothèse de Porter* ». En effet Porter et van der Linde, en étudiant les effets produits par des « innovations vertes » étaient parvenus à la conclusion que nombre de pollutions étaient inhérentes à des gaspillages et qu'une réduction de la pollution aboutissait à une productivité accrue. Ce raisonnement permettait d'encourager les firmes à innover afin de limiter le gaspillage des ressources et, par voie de conséquence de réduire ses coûts. En combinant ces deux facteurs, il est possible d'obtenir des externalités positives, d'une part au niveau environnemental et, d'autre part au niveau de l'entreprise qui verra ses

profits augmenter. Une troisième externalité positive peut exister, au niveau de l'image de l'entreprise qui devra la valoriser par sa communication. La Figure 2-3 ci-dessous permet de visualiser l'argument qui sous-tend l'hypothèse de Porter.

Figure 2-3 - Mécanisme sous-jacent à l'hypothèse de Porter



Source : INRA (2008 : 2)

À l'opposé, Groff et Nguyen-Thi, considèrent « *qu'en l'absence de réglementation, les entreprises auraient continuellement des opportunités de profit qui resteraient inexploitées* ». La vocation première d'une entreprise est de maximiser ses profits. L'introduction d'innovations vertes peut alors constituer une opportunité qu'elle saisira.

Les auteurs notent que l'hypothèse du "win-win effects" « *ne semble pas être suffisamment robuste pour affirmer que les entreprises introduisent des innovations pour améliorer à la fois leur performance économique et réduire leur impact écologique* » (Groff et Nguyen-Thi, 2012 : 4-5).

La question du choix en matière d'innovation à visée environnementale est ici posée : quel(s) type(s) de technologies faut-il privilégier ?

1.3.3 Choix technologiques : vers la fin du « end of pipe »

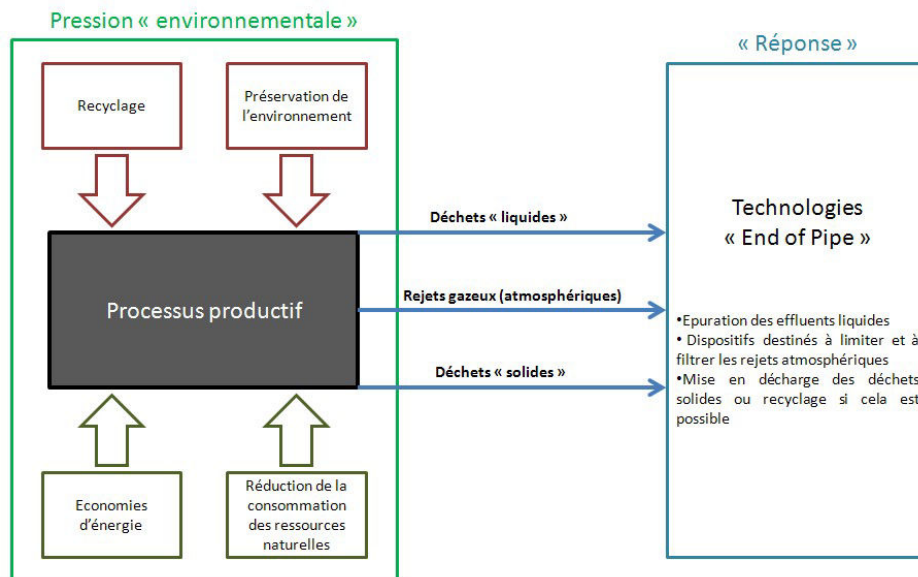
La littérature consacrée aux innovations examine l'innovation technologique selon deux axes : le premier étudie les technologies dites « *end of pipe* », c'est-à-dire qui ralentissent les émissions de polluants en améliorant soit le processus de production, soit les effluents dus à l'utilisation (recyclage, filtres, ...). Le second concerne les technologies qualifiées de « *propres* » qui intègrent les considérations environnementales.

- Remise en cause des technologies « *end of pipe* »

Le terme « *end of pipe* » qualifie des technologies qui vont intervenir à la fin d'un process. Il s'agira, par exemple du traitement des déchets (effluents, matières diverses) générés lors de la production²⁷. Mais ce traitement, à son tour produira des déchets. Les déchets ménagers sont incinérés dans des usines. Néanmoins, outre produire de la chaleur qui peut servir au niveau du chauffage urbain, les sous-produits issus de l'incinération (fumées, résidus, ...) sont à leur tour une source de pollution. En effet, les filtres ayant servi à limiter les émissions et les rejets dans l'atmosphère sont chargés de divers composants dont certains sont hautement toxiques. Il en est de même pour les cendres et mâchefers qui lors de leur élimination par épandage seront susceptibles de contaminer les nappes phréatiques situées à proximité.

Le processus dit « *end of pipe* », en d'autres termes, traitant en fin de processus les effluents, est synthétisé dans la Figure 2-4. Cette approche trouve ses limites dans l'élimination des déchets issus du traitement.

Figure 2-4 - Technologies "End of Pipe"



Source : Réalisé par l'auteur

²⁷ Pour une analyse critique détaillée du système « end of pipe » se référer notamment à Erkman (2004).

Progressivement les produits indiquent la quantité de CO₂ émise lors du processus de production. Outre le fait de s'afficher comme une entreprise respectueuse de l'environnement, c'est un signal adressé aux clients demandeurs de produits (plus) respectueux de l'environnement.

Selon certains auteurs (Arundel et *al.*, 2007, Oltra, 2008) les technologies « *end of pipe* » apparaîtraient comme étant moins efficaces que les technologies « *propres* », ces dernières relevant d'un processus d'innovation continu. En effet, ces dernières reposant sur un système de management environnemental semblent jouer un rôle plus important dans l'introduction de technologies visant à réduire les impacts négatifs sur l'environnement. Par opposition, le développement de technologies « *end of pipe* » serait motivé par une démarche de réduction des coûts. L'impact de la régulation (normes) apparaît d'autant plus important pour ces technologies, qu'elle fixe les seuils d'émissions de gaz à effet de serre. Dans l'industrie automobile, le CO₂, le SO₂ et le NO_x sont principalement visés. Ces deux derniers concernent les émissions des moteurs diesel et ont conduit à la mise en place de catalyseurs afin de limiter les rejets.

Cette approche conduit à distinguer l'éco-innovation intervenant au cours de la production de celle qui concerne les produits qui seront utilisés par les consommateurs finaux. Ainsi, les innovations environnementales introduites au cours de la fabrication d'un véhicule seront perçues différemment de celles liées à l'utilisation du véhicule et à sa fin de vie.

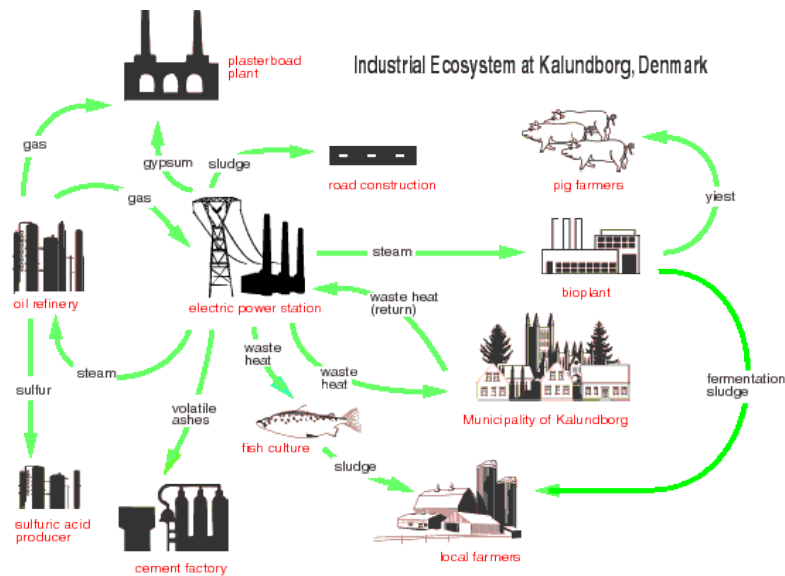
Frosch et Gallopoulos (1989: 94-102) en introduisant le concept d'« *écologie industrielle* » suggèrent une approche dans laquelle un « écosystème industriel » serait susceptible d'exister et de fonctionner de manière économiquement viable. Les auteurs proposent un circuit selon lequel, « *waste from one industrial process can serve as the raw material for another, thereby reducing the impact of industry on the environment* ».

Cette conception de « circuit » est désormais matérialisée par la « Symbiose de Kalundborg » (Danemark) qui démontre l'existence d'un écosystème industriel opérationnel et profitable pour tous les acteurs (Figure 2-5).

Comme le souligne Erkman (2004 : 28) l'intérêt d'un tel système réside dans les « *échanges de déchets tels que de la vapeur, de l'eau (à différentes températures et à différents degrés de pureté), ainsi que divers sous-produits* ». En d'autres termes,

l'objectif premier de l'écologie industrielle réside dans le « bouclage des flux de matières et d'énergie » (Figuière et Metereau, 2013), par opposition à un traitement « end of pipe » des impacts environnementaux.

Figure 2-5 – La Symbiose de Kalundborg



Source : <http://www.scoop.it/t/voyage-sur-la-planete-organique/p/1605865844/ecologie-industrielle-exemples-cogeneration-de-kalundborg>

Le bilan réalisé par Erkman (2004 : 31) fait ressortir :

- une « réduction de la consommation des ressources : 45 000 tonnes par an de pétrole, 15 000 tonnes par an de charbon et surtout 600 000 m³ par an d'eau [...] »,
- une « réduction des gaz à effet de serre et polluants : 175 000 tonnes par an de gaz carbonique, 10 200 tonnes par an de dioxyde de soufre »,
- la « réutilisation des déchets : 130 000 tonnes par an de cendres (pour la construction routière), 4 500 tonnes par an de soufre (pour la fabrication d'acide sulfurique) 90 000 tonnes par an de gypse, 1 440 tonnes par an d'azote et 600 tonnes par an de phosphore ».

Les avantages qui transparaissent à la suite de cette analyse sont multiples : l'un des principaux réside dans la diminution des émissions de gaz à effet de serre ou de gaz particulièrement polluants. Les autres sont économiques, d'une part au travers des économies par la non utilisation des ressources (pétrole, charbon, eau présentant un degré élevé de rareté dans la région) et, d'autre part dans les échanges réalisés entre les différents acteurs (usines, éleveurs, ...).

Bien que ce modèle puisse sembler idyllique, il pose la question de l'organisation même du processus. En effet, si celui-ci a pu se développer à Kalundborg, c'est en raison de l'intérêt de certains pour les déchets des autres. Cela conduirait à organiser des pôles industriels hétérogènes dans lesquels la complémentarité des activités serait liée à la valorisation des déchets produits sur le site. Une des limites tiendrait aux rigidités introduites. En effet, les échanges, une fois établis, que se passerait-il si l'un des éléments du système venait à changer son activité et donc la nature de ses déchets, ou à mettre fin à son activité. L'ensemble du système serait déséquilibré et pourrait s'effondrer.

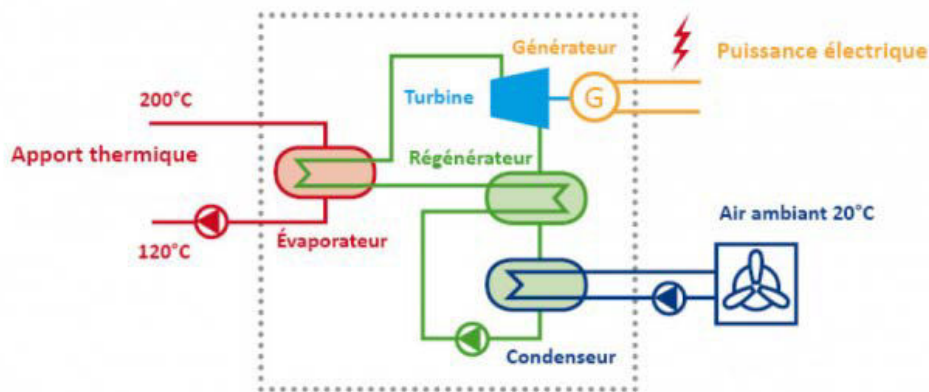
Ce concept a donné naissance, essentiellement aux États-Unis, aux parcs éco-industriels (« eco-industrial parks »). « L'écologie industrielle doit relever un quadruple défi : valoriser les déchets (passer des « bads » aux « goods ») ; boucler les cycles en minimisant les rejets ; dématérialiser les produits (accroître la productivité des ressources) et procéder à la décarbonisation de l'énergie (évolution vers un système industriel moins gourmand en énergie fossile » Diemer et Labrune, 2007 : 5-6). Cela conduit à considérer les « déchets » non plus uniquement comme des sous-produits issus du processus de production dont il faut se débarrasser, mais également comme des matières premières « secondaires » générant non plus des coûts liés à leur destruction mais des profits en raison de leur valeur pour d'autres industries. Ce bénéfice est alors double puisqu'il permet de réduire les consommations (inputs) et les prélèvements (mines, etc.). Pour Gilles David²⁸, « l'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas » (Actu Environnement²⁹, 2013). Il souligne le fait que dans le cadre de la transition énergétique, il s'agit tout d'abord d'augmenter l'efficacité énergétique des entreprises. Pour y parvenir, il suggère l'utilisation de la « *technologie du Cycle Organique de Rankine (ORC)* » qui conduirait à valoriser les fortes températures émises lors de certains processus de production (Figure 2-6).

Cette chaleur dite « *chaleur fatale* » dépasse les 100°C et constitue à son tour une source d'énergie.

²⁸ Président de Enertime

²⁹ Newsletter Actu Environnement, <http://www.actu-environnement.com/ae/news/gilles-david-chaleur-fatale-cycle-organique-de-rankine-17896.php4>, consultée le 26/02/2013

Figure 2-6 – Principe de fonctionnement de la Technologie du Cycle Organique de Rankine (ORC)



Source : ENERTIME (<http://www.enertime.com/fr/machines-a-cycle-organique-de-rankine/technologie>)

Si une faible partie de la chaleur émise lors de certaines productions peut être valorisée dans les réseaux urbains de chauffage, la partie la plus importante pourrait être transformée en énergie électrique grâce à des turbines et soit être utilisée par l'industrie qui la produit pour sa propre consommation soit être revendue. Certes, la mise en place d'un tel dispositif nécessiterait des investissements pour parvenir à valoriser cette ressource, mais les bénéfices seraient multiples : réduction de la consommation d'énergie pour l'entreprise, gains générés par la vente de l'électricité non consommée, rejets à haute température réduits, meilleure image de marque, etc.

Malgré l'intérêt que présente l'approche « *end of pipe* » en raison des gains obtenus en matière de ressources ou d'émissions, il semble néanmoins pertinent de s'intéresser aux « *technologies propres* » dont la mise en œuvre ne produit pas d'effluents toxiques (gaz à effet de serre, polluants, ...) qu'il est nécessaire ensuite d'éliminer. Cela conduit à étudier les procédés pouvant réduire ou éliminer les sources de pollution tout au long du processus de production.

- Technologies « *propres* » ou « *cleantech* »

Laforest et Berthéas (2005) rappellent que le terme « *technologie propre* » est apparu en 1975 et concernait des procédés de production plus évolués et plus économiques, polluant moins et intégrant la valorisation des déchets par la récupération des matières premières. Maës (1996) considère que les technologies propres sont concernées par « *toutes les actions préventives permettant la révision et la remise en cause du concept*

de production et de transformation en vue d'éviter une perte, une nuisance, un danger ».

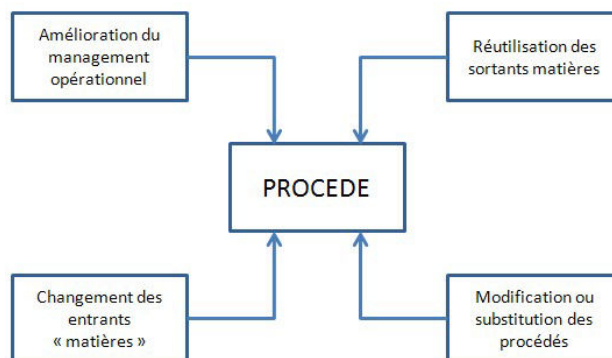
Les technologies propres interviennent au cours du processus de production et concernent l'ensemble des opérations conduites sur la chaîne. Le processus de dépollution est intégré au processus de production. Elles introduisent une réflexion conduisant à réduire les consommations de matières premières et d'énergie, d'où un moindre impact sur l'environnement, les déchets de tous genre (émissions atmosphériques, effluents liquides) et enfin à limiter le plus possible les éventuelles nuisances et sources de risques. Les technologies propres apparaissent comme un facteur de rationalisation tant dans l'utilisation des matières premières et des sources d'énergie qu'en matière de déchets.

Laforest (1999) identifie trois niveaux d'investissements relatifs à la mise en œuvre de technologies propres :

1. Optimisation du procédé existant,
2. Modification du procédé, l'objectif étant de parvenir à la valorisation des sous-produits
3. Substitution de la (des) technologie(s) utilisées par d'autres moins polluantes.

L'approche globale de la mise en œuvre de technologies propres est représentée par la Figure 2-7.

Figure 2-7 - Mise en œuvre de technologies propres



Source : Réalisé par l'auteur d'après Van Berkel (2000)

Les « *technologies propres* » se définissent par opposition aux technologies « *end of pipe* » pour lesquelles le traitement des déchets et des émissions a lieu en fin du processus de production, c'est-à-dire après qu'ils aient été générés. À l'inverse, une « *technologie propre* » visera à minimiser l'utilisation des ressources (matières

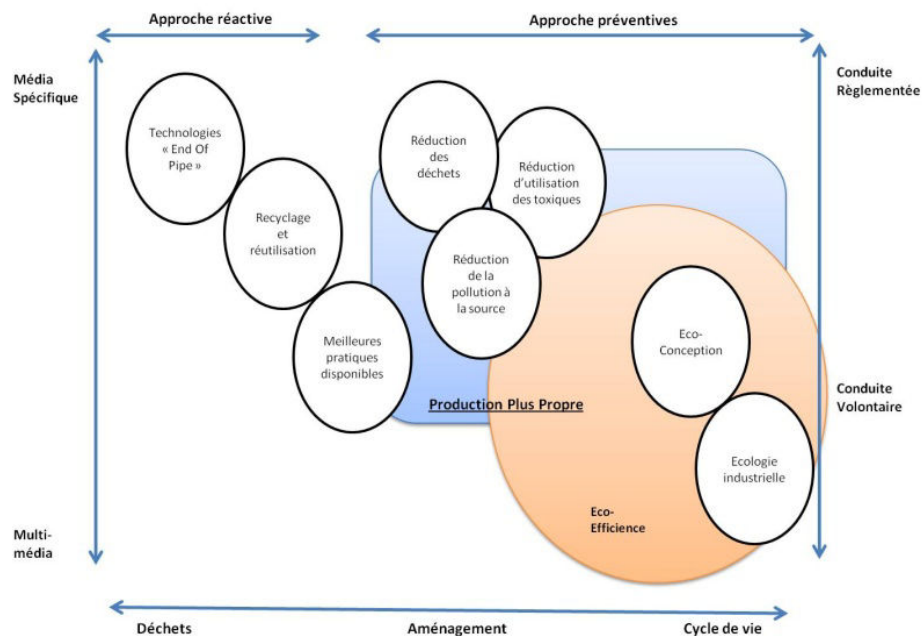
premières, énergie, ...) et à réduire les émissions qui interviendront non seulement au cours du process de fabrication, mais également tout au long de la vie du produit, c'est-à-dire depuis son utilisation jusqu'à sa fin de vie – élimination, recyclage.

La limite pour ces technologies, est de présenter un coût économique qui ne dissuade pas les utilisateurs potentiels. Elles doivent également répondre aux contraintes environnementales, en réduisant les risques de pollution et être économiquement viables, par la réduction des intrants (eau, énergies, matières premières) et des rejets.

La relation entre production plus propre et les autres concepts de management de l'environnement apparaît dans la Figure 2-8.

Il est à noter que si l'éco-efficience fait référence à l'éco-conception et à l'écologie industrielle et relève d'une démarche volontaire, les technologies « end of pipe » ont été mises en place sous la contrainte des réglementations.

Figure 2-8 - Relation entre production plus propre et les autres concepts de management de l'environnement



Source : Van Berkel, 2000

Les éco-innovations introduisent la nécessité d'un développement respectueux de l'environnement dans le processus industriel de l'innovation, ce qui conduit à mettre en œuvre des technologies propres peu consommatrices de ressources. Dans la littérature, elles sont également appelées « éco-technologies ». Les différents facteurs susceptibles de favoriser l'émergence de telles innovations ainsi que leur nature seront abordés dans la Section 2.

Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 1

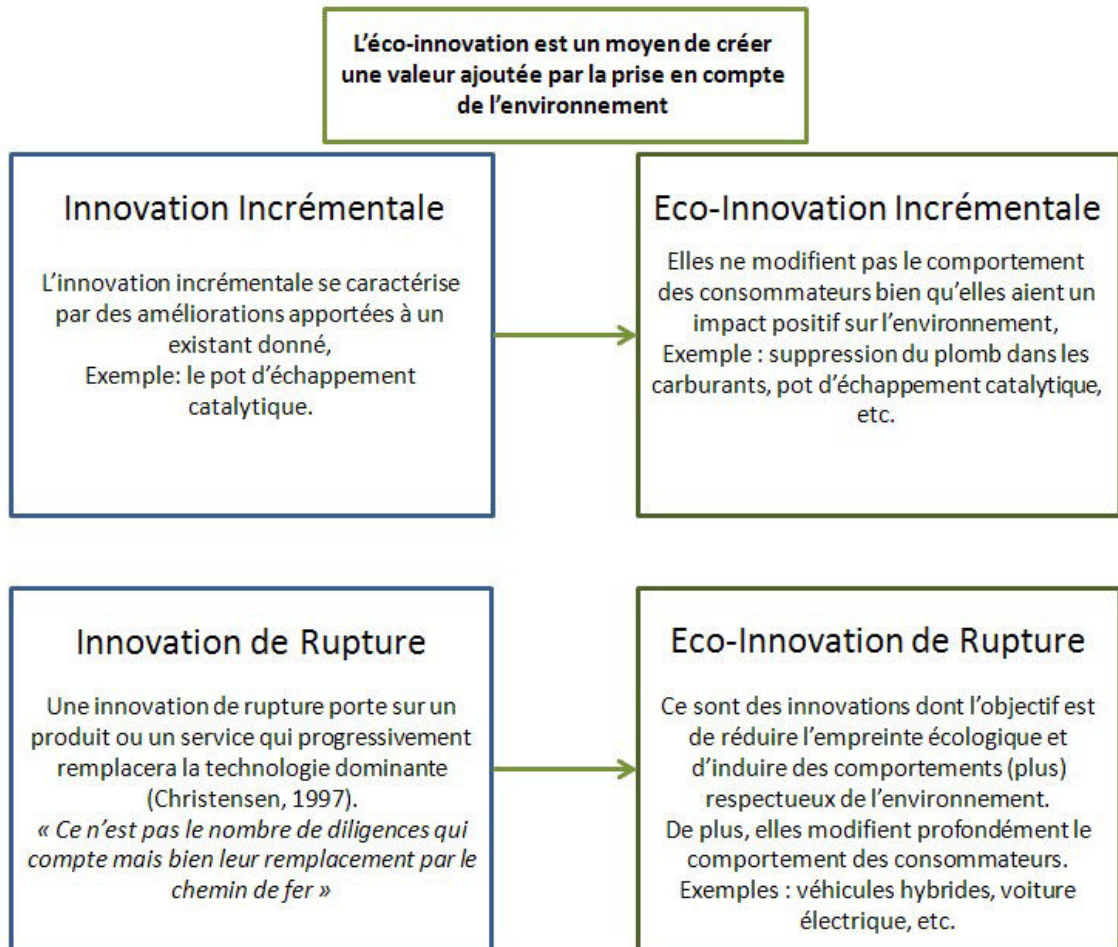
Au terme de cette section, il apparaît que le débat environnemental initié depuis les années 1970 a donné naissance en 1987 à la définition du « développement durable » et abouti au Protocole de Kyoto (1997) qui marque une étape décisive.

Parmi ses différents objectifs, et en relation avec le sujet de cette thèse portant sur l'industrie automobile, le protocole de Kyoto avait identifié six gaz à effet de serre, responsables du changement climatique dont le CO₂. Le transport routier et surtout l'automobile étant à l'origine de ces émissions, la transposition de Kyoto au niveau européen puis au niveau des États signataires s'est traduite par des textes instituant des bonus et des malus calculés en fonction du taux d'émissions de CO₂ par kilomètre parcouru. La nouvelle fiscalité mise en place fin 2012 a alourdi les malus en abaissant le seuil d'émissions et parallèlement institué des incitations en vue de favoriser les véhicules à faibles émissions de CO₂. La Commission Européenne (28/02/2013) a par ailleurs fixé les lignes directrices visant à encadrer les aides d'État pour l'achat de véhicules plus faiblement émetteurs de CO₂, ou neutres comme dans le cas des véhicules électriques. Il s'agit de maximiser la demande de ce type de véhicules.

Il a également été demandé aux constructeurs automobiles de mettre en place des processus permettant un meilleur recyclage en fin de vie des véhicules. Un tel dispositif s'inscrit dans une démarche d'éco-conception. En effet, afin de permettre un meilleur recyclage et de réduire les émissions et effluents lors de la production, les constructeurs automobiles ont dû réduire la part des matériaux susceptibles de représenter un frein lors de la déconstruction. C'est ainsi que la peinture des carrosseries par exemple, précédemment sur base de solvants a été remplacé par des produits sur base aqueuse.

Progressivement l'innovation a intégré la prise en compte des facteurs environnementaux devenant une innovation respectueuse de l'environnement. La littérature fait apparaître que les termes « éco », « vert », « durable », « soutenable », « *environnemental* », etc. sont indifféremment utilisés afin de qualifier des innovations à portée environnementale. Est-il possible de dire que toutes les innovations visent à réduire l'impact sur l'environnement, peut-être pas. Mais en ce qui concerne la conception des automobiles, sous l'incitation des Pouvoirs Publics et la pression du marché, il semble pertinent de dire que la R&D automobile est orientée vers la préservation de l'environnement, pour le bien des générations futures.

Figure 2-9 - De l'innovation à l'éco-innovation



SECTION 2 LES ACCELERATEURS DE L'INNOVATION

Innovation et esprit de compétition sont étroitement liés. En effet, une innovation produite par un constructeur ou un de ses équipementiers lui confèrera un avantage sur ses concurrents et lui permettra de se trouver en situation de monopole jusqu'à ce qu'une innovation concurrente vienne la supplanter.

Ce processus illustre parfaitement l'idée de Schumpeter (1954) selon laquelle, en règle générale, le nouveau ne sort pas de l'ancien mais apparaît à côté de l'ancien, lui fait concurrence jusqu'à le ruiner et modifie toutes les situations de sorte qu'un processus de mise en ordre est nécessaire. Cette thèse fut reprise par Aghion et Howitt (1989) qui, soulignent le fait que les innovations conduisent à rendre obsolètes les technologies exploitées jusqu'alors. Il en résulte qu'une entreprise innovatrice, bénéficiant d'un monopole, pourra à tout moment perdre sa position en raison de l'arrivée d'une entreprise offrant une technologie supérieure à la sienne.

La croissance du secteur apparaît comme étant induite par ce mouvement de renouvellement où apparaissent des entreprises offrant des technologies toujours plus performantes et offrant des gains de productivité supérieurs à ceux de leurs concurrents. Schumpeter (1954) avait également souligné le fait que, si les innovations portent la croissance, elles sont un facteur de déséquilibre par l'instabilité qu'elles génèrent par rapport à la situation précédente.

Plusieurs facteurs peuvent inciter les industriels à innover. Selon les pays et les contextes, il pourra s'agir d'aides ou d'intervention de l'État (2.1), sur des thématiques précises, ou de règles plus contraignantes, comme au Japon. Depuis la ratification du Protocole de Kyoto, « *l'innovation verte* » est entraînée par des considérations aussi diverses que le prix des matières premières, la demande des clients ou la compétition entre les firmes (2.2). Quel que soit le terme utilisé, « *éco-innovation* », « *innovation verte* », etc., ce type d'innovations est de nature à présenter des perspectives de développement technologique – au travers d'innovations incrémentales ou d'innovations de rupture (2.3), et économique au travers de la croissance générée (2.4).

2.1 Politiques publiques et éco-innovations

En matière de développement durable, les États ont ratifié le Protocole de Kyoto et en conséquence, il leur revient de transcrire dans les textes (de lois) les orientations que devront suivre les entreprises dans ce domaine. « *Les États sont en première ligne, ayant le devoir de relayer sur leur territoire souverain les objectifs et obligations définis par la communauté internationale* » (Godard, 2002 : 102). L'État apparaît selon Godard, comme l'interface entre des décisions prises à l'échelle de la planète et celles prises au niveau d'un pays et de ses firmes. « *Les enjeux du développement durable, qu'il s'agisse par exemple du devenir du climat [...] sont des questions qui relèvent au premier chef de la responsabilité politique et morale des États* » (Godard, 2002 :101-102).

Pour McCormick (2001: 21), l'action de l'État en faveur de l'environnement est appréhendée comme « *any actions deliberately taken - or not taken - by government that are aimed at managing human activities with a view to preventing harmful effects on nature and natural resources, and ensuring that man-made changes to the environment do not have harmful effects on humans* ». Toutes les mesures incitatives prises au travers des politiques publiques environnementales, qu'elles soient réglementaires ou financières tendent à stimuler le développement d'actions en faveur de l'environnement. Néanmoins, comme le soulignent Groff et Nguyen-Thi (2012 : 3-4) « *[...] l'allocation de subvention risque d'entraîner l'économie sur un sentier de dépendance moins favorable pour l'environnement que ne l'auraient fait d'autres technologies plus éco-performantes* ». Selon les auteurs, cette limite serait imputable au fait que les États ne disposeraient pas d'une information suffisamment complète.

L'État peut également être amené à susciter des éco-innovations au travers de la mise en place de nouvelles réglementations plus contraignantes. Ainsi, l'État en abaissant les seuils d'émission de CO₂ par les automobiles et en augmentant le tarif des malus (Tableau 2-3), il envoie un signal aux constructeurs afin de les inciter à produire des véhicules plus respectueux de l'environnement. De leur côté, les consommateurs sont encouragés au travers des bonus, à privilégier les modèles les moins polluants. L'indication du taux d'émission de CO₂ par kilomètre étant désormais obligatoire, l'acheteur d'une voiture neuve est ainsi à même de décider en connaissance de cause. À

son tour, ses choix fourniront aux constructeurs des indications susceptibles d’orienter leur production.

Tableau 2-3 - Évolution du Malus Automobile, 2013 calculé en fonction du taux d’émission de CO₂

Taux d’émission de CO ₂ , en g/km	Tarif 2012, en euros	Tarif à compter de 2013, en euros	Progression
Moins de 135	0	0	-
135 à 140	0	100	-
140 à 145	200	300	+ 50 %
145 à 150	200	400	+ 100 %
150 à 155	500	1 000	+ 100 %
155 à 175	750	1 500	+ 100 %
175 à 180	750	2 000	+ 167 %
180 à 185	1 300	2 600	+ 100 %
185 à 190	1 300	3 000	+ 131 %
190 à 200	2 300	5 000	+ 117 %
200 à 300	2 300	6 000	+ 161 %
Plus de 230	3 600	6 000	+ 67 %



Source : Assemblée Nationale, 2013

En France, l’État, au travers de mesures incitatives telles que les « bonus » et les « primes à la casse » a favorisé l’émergence sur le marché, de véhicules présentant, à puissance équivalente, de faibles taux d’émission de CO₂. Un nouveau champ de compétition est ouvert aux constructeurs, la réduction des émissions de CO₂.

Il faut également souligner que les bonus initialement prévus pour le GPL et le GNV sont supprimés. Renault, au mois de novembre 2010, a annoncé que la disparition de la prime de 2 000 euros initialement prévue jusqu’en 2012, aurait un impact non négligeable sur les ventes de ces modèles. Dans un communiqué du 22 novembre 2010, autoactu.com soulignait « *Les ventes de Renault pénalisées par la suppression du bonus GPL en 2011* » et précisait « *le groupe Renault est le grand perdant de la réforme du bonus. La suppression brutale, deux ans avant la date d’échéance, du bonus GPL lui coûtera plus de 20 000 voitures en France en 2011* » (autoactu.com, 22/11/2010).

Le choix fait par l’État, de supprimer le bonus en faveur du GPL et du GNV apparaît comme un choix stratégique en faveur de la technologie hybride. Cette technologie, selon les propos de Carlos Ghosn n’étant pas exploitée par Renault, une telle décision tendrait à favoriser le groupe PSA qui a misé sur le développement de l’hybride en tant que solution transitoire entre le moteur thermique et les véhicules électriques.

De leur côté, les véhicules hybrides continueront à bénéficier du bonus de 2 000 euros, à condition de respecter la nouvelle norme en matière d'émissions de CO₂, qui fixe désormais le seuil à 110g/km au lieu de 135g/km comme précédemment.

L'OCDE (2011) précisait qu'il était indispensable que la réglementation « *soit suffisamment stricte pour encourager l'innovation ; assez stable pour inspirer confiance aux investisseurs ; suffisamment souple pour favoriser des solutions véritablement novatrices ; viser précisément l'objectif de l'action publique ; et être propice à une innovation continue* ».

Rennings (2000) insiste sur le rôle des incitations réglementaires dans l'adoption d'une éco-innovation. Certains auteurs, à l'instar de Fukusaku (2000) constatent que les entreprises peuvent également en matière d'éco-innovation, être motivées par des contraintes imposées par le marché, ce qui renvoie à la typologie de l'innovation de Schumpeter et à l'analyse de Porter et van der Linde (2005).

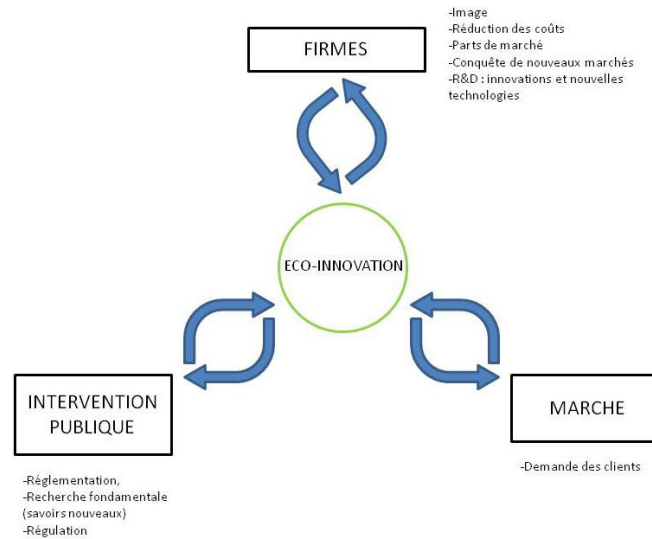
Il est donc possible d'identifier, de la part des entreprises, trois types de motivations à innover dans ce domaine :

- faire face à un cadre réglementaire en matière d'environnement et ne pas être pénalisée, financièrement (amendes) et/ou en termes d'image,
- répondre à une demande du marché souhaitant des produits « *eco-friendly* » (« market pull »),
- maintenir sa compétitivité sur le marché en améliorant la qualité des produits tout en réduisant ses coûts de production. « *Environmental innovations may be developed with or without the explicit aim of reducing environmental harm. They may be motivated by the usual business goals such as reducing costs or enhancing product quality. Many environmental innovations combine an environmental benefit with a benefit for the company or user.* » (Rennings et Zwick, 2001: 4).

Les entreprises se trouvent confrontées à l'obligation de définir une stratégie optimale qui leur permettra de répondre à la pression du « développement vert ». En effet elles sont contraintes d'une part, de réduire leur empreinte au cours de la phase de production

et, d'autre part d'innover afin de proposer des produits dont le contenu sera porteur de valeur tant pour le client que pour l'entreprise.

Figure 2-10- Les déterminants de l'éco-innovation



Source: réalisé par l'auteur

Comme le montre la Figure 2-10, les firmes seront conduites à développer des pratiques écologiques et durables. Il semble légitime de penser que les entreprises à forte culture d'innovation parviendront plus rapidement et plus aisément à initier ce type de politique, la construction d'un programme d'innovation durable constituant l'étape la plus importante.

Le développement technique connaît une accélération face à laquelle une firme peut se trouver en difficulté pour deux raisons. D'une part, une entreprise, quelles que soient les connaissances et les compétences accumulées, ne peut maîtriser toutes les connaissances (savoirs) et les procédés (compétences codifiées) indispensables au développement d'une innovation et d'autre part, les sommes nécessaires à ce développement peuvent être au-delà de la capacité financière de cette entreprise.

Comme le note Thuderoz³⁰ (2006), de nombreuses technologies requièrent des compétences complémentaires. Il analyse les technologies comme l'association de plusieurs modules résultant d'interactions. Ces coopérations peuvent associer des

³⁰ Professeur des Universités à l'INSA de Lyon

laboratoires publics (universitaires) et/ou privés, des entreprises, les pouvoirs publics, etc. ce qui renvoie au système d'innovation tel que défini par Malerba.

Pour analyser ce processus, le concept de « système national d'innovation » apparaît comme pertinent. Pour Amable (2001) l'approche en termes de « *Système d'Innovation* » permet de ne plus considérer le changement technique comme se développant d'une façon quasi-autonome du reste de l'économie, sous la seule influence des progrès d'une science soumise à ses propres règles. Le concept de système d'innovation retenu dans le cadre de cette thèse est celui de « *Système d'National d'Innovation* » (SNI) et plus particulièrement celui de « *Système Sectoriel d'Innovation* » (SSI).

Nelson et Winter (1982) notent dans le cadre d'une approche théorique évolutionniste du changement économique, que système national d'innovation (SNI) et système sectoriel d'innovation (SSI) sont associés. Les auteurs soulignent que la théorie évolutionniste insiste sur le rôle particulièrement important que revêtent la dynamique et les processus d'innovation dans les changements de l'économie. Il a été remarqué que la capacité d'apprentissage et les aptitudes à mobiliser les nouvelles connaissances étaient des facteurs clés (Malerba, Nelson, 2010) du changement économique.

Cohen et Levinthal (1990), définissent l'« *absorptive capacity* » comme la capacité de reconnaître des sources d'informations extérieures et les intégrer, ce qui revient à augmenter sa base de connaissances et ouvre de nouvelles perspectives en matière d'apprentissage et d'innovation. « *The ability of a firm to recognize the value of new, external information, assimilate it and apply it to commercial ends is critical to its innovative capabilities* » (Cohen et Levinthal, 1990 : 128). Ce fait a été validé dans l'automobile, par exemple, lorsque Henry Ford transposa le principe des convoyeurs qu'il avait vus aux abattoirs de Chicago, à ses usines. Toyota s'était inspiré de ce qu'il avait vu chez Ford pour mettre en place ses lignes de fabrication. « *We argue that the development of absorptive capacity, and, in turn, innovative performance are history- or path-dependent and argue how lack of investment in an area of expertise early on may foreclose the future development of a technical capability in that area* » (Cohen et Levinthal, 1990 : 128). Les auteurs considèrent que des investissements insuffisants dans l'acquisition de connaissances, que ce soit par la formation des personnels ou par une veille stratégique performante, trouvent leur source soit dans l'histoire, soit dans

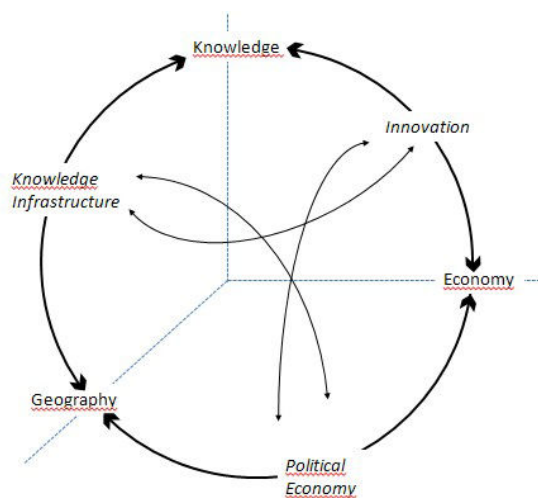
des sentiers de dépendance et sont de nature à hypothéquer le développement futur des firmes. Cela s'explique par la politique de formation professionnelle des firmes qui peuvent augmenter les compétences de leur personnel par des actions de formation ciblées ou le laisser en l'état. Dans ce cas, l'écart se creusera progressivement par rapport aux entreprises les plus investies et les connaissances incorporées dans l'entreprise deviendront obsolètes.

2.1.1 *Système national d'innovation (National System of Innovation)*

Bien que le terme « *National Innovation System* » ait été utilisé pour la première fois par Freeman (1987) l'auteur précise que la paternité du concept revient à Lundvall (1995). Lundvall pour sa part (1992), indique que l'analyse en termes de systèmes nationaux d'innovation ou plutôt de « systèmes nationaux de production » (Niosi et al, 1992 : 217) est due à Friedrich List, dans son ouvrage « *Das Nationale System des Politischen Oekonomie* » (1992). « *The first systematic and theoretically based attempt to focus on national systems of innovation goes back to Friedrich List* » (Lundvall, 1992 : 16). Pour Lundvall (1992), les SNI constituent une nouvelle perspective pour la compréhension du dynamisme économique, national ou pris dans sa globalité. Il considère également que la compétitivité des nations est basée sur l'innovation.

À partir des différentes données et acteurs qui composent l'environnement de la firme Leydesdorff (2010) aboutit à la Figure 2-11 qui montre les interactions pouvant intervenir entre ces acteurs.

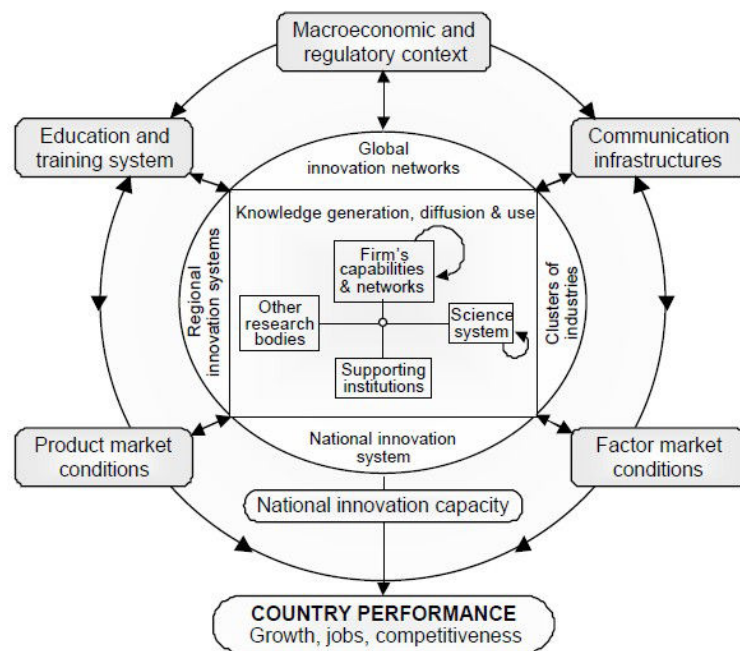
Figure 2-11 – Three dimensions of the social system with their three interactions terms



Source : Leydesdorff, 2010 : 377

Niosi et al. (1992 : 220) « à la recherche d'un concept utilisable³¹ » notent que « la notion de système implique la notion d'environnement, c'est-à-dire un ensemble d'éléments qui sont à l'extérieur du système ; la plupart des systèmes sont ouverts à un certain degré, ils ont une certaine forme d'interaction avec leur environnement ». Les auteurs aboutissent à une définition selon laquelle « un système national d'innovation comprend des entreprises, publiques et privées, petites et grandes, des universités et des centres publics, dont l'objet est la production de science et de technologie à l'intérieur de l'espace national. Ces acteurs interagissent en termes techniques, commerciaux, légaux, sociaux ou politiques, aussi longtemps que le but de ces interactions est le développement, la protection, le financement ou la régulation de nouvelles sciences et technologies » (Niosi et al, 1992 :223).

Figure 2-12 – Actors and linkages in the innovation system



Source : OECD (1999 : 23)

Le concept de « Système National d'Innovation » sera repris par Nelson (1988, 1993). L'auteur dit être convaincu du fait que les firmes sont les facteurs clé de la compétitivité et sont donc à l'origine des capacités technologiques des nations,

³¹ Le titre de l'article est « Les systèmes nationaux d'innovation : à la recherche d'un concept utilisable »

lesquelles peuvent être initiées par des actions conduites sur le plan national. Ces politiques seraient de nature à tisser des liens entre les « *agents nationaux de l'innovation* ». Bien que le concept et son cadre d'analyse présentent un intérêt certain, il n'existerait pas de consensus. « *Despite the popularity of the concept, however, very few studies have analyzed the development of individual national innovation in depth. Moreover, as Edquist (2004) points out, scholars disagree on how best to apply the innovation system concept to individual nations* » (Fagerberg et al.2008 : 1). Malgré les désaccords, le concept de SNI reste pertinent car il permet de prendre en compte les flux d'informations et de connaissances (transferts technologiques, etc.) qu'ils soient nationaux ou internationaux. Saviotti souligne le fait que « *the concept of system national of innovation implicates that difference between countries in the performances of innovation, procedures and structures is bigger than difference of these same variables inside countries* » (Saviotti, 1996 : 199). Niosi note que bien qu'il n'y ait pas consensus autour d'une définition unifiée, il n'en demeure pas moins qu'il existe un corpus partagé par les auteurs (voir Tableau 2-4) : « *Although no single definition has yet imposed itself, there is a semantic core that appears in most of the definitions used* » (Niosi, 2002 : 291).

Pour Laperche et Uzunidis (2007 : 70), un « *système national d'innovation est défini comme étant l'ensemble des institutions publiques et privées (entreprises, centres publics et privés de recherche scientifique et de développement technologique – R&D, sociétés financières, administration de réglementation et de régulation...) impliquées dans la réalisation des processus d'innovation et mises en relation les unes par rapport aux autres par des flux financiers, informationnels et par les mouvements de personnes (scientifiques, ingénieurs, travailleurs de toutes qualifications et compétences* ». Cette définition outre le fait qu'elle soit récente, donne une vision complète du SNI et en identifie les acteurs majeurs en même temps qu'elle réalise la synthèse des définitions données par les différents auteurs.

Nelson souligne qu'un système d'innovation tend à être spécifique au secteur étudié : « *if one focuses narrowly on what we have defined as 'innovation system' these tend to be sectoral specific* » (Nelson, 1993 : 518), ce qui conduit à resserrer l'étude du système d'innovation, du national au niveau sectoriel.

Tableau 2-4 - Évolutions de la définition de Système National d'Innovation

Freeman 1987	« <i>the network of institutions in the public and private sectors whose activities and interactions initiate, import, modify and diffuse new technologies</i> » (p 1)
Lundvall 1992	« <i>The elements and relationships which interact in the production, diffusion and use of new, and economically useful knowledge and are either located within or rooted inside the borders of a nation state</i> » (p 16).
Nelson 1993	« <i>A set of institutions whose interactions determine the innovative performance of national firms. The 'system' concept is that of a set of institutional actors that play the major role in influencing innovative performance</i> » (p 518).
Niosi et al. 1993	« <i>the system of interacting private and public firms (either large or small), universities, and government agencies aiming at the production of science and technology within national borders. Interaction among these actors may be technical, commercial, legal, social and financial, in as much of the goal of the interaction is the development, protection, financing or regulation of new science and technology</i> » (p 220)
Edquist & Lundvall 1993	« <i>the set of set of institutions and economic structures affecting the rate and direction of technological change in the society</i> » (p 299).
Patel & Pavitt 1994	« <i>The national institutions, their incentive structures and their competencies that determine the rate and direction of technological learning</i> ».
Metcalf 1995	« <i>That set of distinct institutions which jointly and individually contribute to the development and diffusion of new technologies and which provides the framework within which governments form and implement policies to influence the innovation process. As such it is a system of interconnected institutions to create, store and transfer the knowledge, skills and artefacts which define new technologies</i> ».
Saviotti 1995	« <i>the concept of system national of innovation implicates that difference between countries in the performances of innovation, procedures and structures is bigger than difference of these same variables inside countries</i> » (p 199).
OECD 1997	« <i>A complex set of relationships among actors producing, distributing and supplying various kinds of knowledge</i> » (p 7).
Laperche & Uzunidis 2007	« <i>un système national d'innovation</i> » est défini comme étant l'ensemble des institutions publiques et privées (entreprises, centres publics et privés de recherche scientifique et de développement technologique – R&D, sociétés financières, administration de réglementation et de régulation...) impliquées dans la réalisation des processus d'innovation et mises en relation les unes par rapport aux autres par des flux financiers, informationnels et par les mouvements de personnes (scientifiques, ingénieurs, travailleurs de toutes qualifications et compétences » (p70).

2.1.2 Système sectoriel d'innovation (Sectoral System of Innovation)

La définition donnée par Malerba en 2002 du système sectoriel d'innovation : « *A sectoral system of innovation and production is composed by the set of heterogeneous agents carrying out market and non-market interactions for the generation, adoption and use of (new and established) technologies and for the creation, production and use of (new and established) products that pertain to a sector ("sectoral products"). A sectoral system has a knowledge and a technological base, and key links and complementarities among products, knowledge and technologies, which greatly affect the creation, production and use of the "sectoral products". The agents composing the sectoral system are individuals and organizations. These organizations may be firms (such as users, producers and input suppliers) and non-firm organizations (such as universities, financial institutions, government agencies and so on), as well as organizations at lower or higher levels of aggregation (such as consumers, R-D departments or industry associations)* » (Malerba, 1999 : 4) et complétée en 2000 « *A sectoral system of innovation and production is a set of new and established products for specific uses and the set of agents carrying out market and non-market interactions for the creation, production and sale of those products. A sectoral system has a knowledge base, technologies, inputs and an existing, emergent and potential demand. The agents composing the sectoral system are organizations and individuals (e.g. consumers, entrepreneurs, scientists). Organizations may be firms (e.g. users, producers and input suppliers) and non-firm organizations (e.g. universities, financial institutions, government agencies, trade-unions, or technical associations), including sub-units of larger organizations (e.g. R&D or production departments) and groups of organizations (e.g. industry associations)* » (Malerba, 2000: 250) permet d'en appréhender la complexité liée au nombre des acteurs susceptibles de le composer.

L'analyse d'un secteur considéré dans le sens d'un « *ensemble des entreprises qui ont le même type de propriété, qui produisent des biens ou qui fournissent des services analogues entrant dans une même catégorie* »³² permet une lecture plus fine. Malerba (2002 : 65) définit le secteur comme « *A sector is a set of activities which are unified by some related product groups for a given or emerging demand and which share some basic knowledge* » et dans le cadre d'une analyse évolutionniste le situe dans son

³² Définition donnée par le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) - CNRS

environnement : « *A sector is composed of heterogeneous agents that are organisations and individuals (e.g. consumers, entrepreneurs, scientists). Organisations may be firms (e.g. users, producers and input suppliers) and non-firm organisations (e.g. universities, financial institutions, government agencies, trade-unions, or technical associations), including sub-units of larger organisations (e.g. R&D or production departments) and groups of organisations (e.g. industry associations)* (Malerba, 2005 : 66)

En effet, si le système national d'innovation permet d'appréhender l'innovation au niveau d'un pays, le système sectoriel d'innovation amène à considérer chaque secteur d'activité indépendamment des autres pour mesurer son dynamisme en termes d'innovation.

Un système sectoriel est caractérisé par une base de connaissances, des technologies, des inputs et l'existence d'une demande potentielle. Les agents qui le composent sont des organisations et des individus (par exemple, les consommateurs, les entrepreneurs, les scientifiques). Pour l'auteur, le concept de système sectoriel fait référence à l'approche industrielle traditionnelle et à l'analyse d'industries. « *It departs from the traditional concept of sector used in industrial economics because it examines other agents in addition to firms, it places a lot of emphasis on non-market as well as on market interactions, and focuses on the processes of transformation of the system it does not consider sectoral boundaries as given and static* » (Malerba, 2002 : 250)

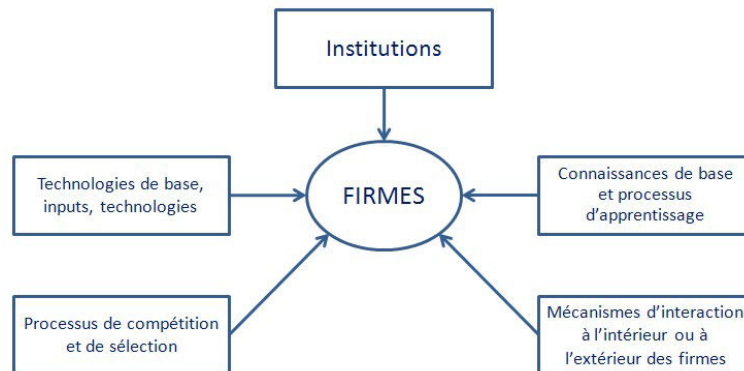
Le recours à la littérature évolutionniste s'explique par le fait que ce courant accorde aux concepts clés comme l'apprentissage, la connaissance, les compétences et le changement un rôle central. L'importance de ces concepts clés de l'analyse évolutionniste est ainsi démontrée : « *this notion of sectoral system of innovation and production draws from basic concepts of evolutionary theory and from key aspects of the innovation system approach* » (Malerba, 2002 : 250). La littérature évolutionniste note que selon les secteurs, les connaissances de base et les technologies mobilisées en matière d'innovation peuvent connaître de grandes différences. En effet, les opportunités technologiques peuvent radicalement différer en fonction des secteurs. « *As Freeman (1982) and Rosenberg (1982) among others have shown, in some sectors opportunity conditions are related to major scientific breakthroughs in universities* » (Malerba, 2002: 251-252). Cette approche s'avère d'autant plus pertinente dans le cas de biens incorporant d'importants contenus technologiques, et s'applique à l'objet étudié, l'automobile. En effet, une voiture associe différents dispositifs dont certains ont

été développés par exemple, dans le cadre de partenariats universités / grandes écoles et laboratoires de recherche.

En partant du concept de système sectoriel tel que défini par Malerba, il est possible d'identifier ses principaux éléments constitutifs (Figure 2-13) :

- Les institutions. Ce sont principalement le gouvernement, les institutions décentralisées (locales, régionales), les institutions financières mais également les « standards », les régulations, etc.
- Les connaissances « de base » et le processus d'apprentissage. Le rôle de la connaissance est central dans le processus d'innovation et a souvent été souligné dans la littérature évolutionniste (Nelson, 1995, Metcalfe, 1998, etc.). En effet, au niveau de l'entreprise, la connaissance est un facteur déterminant dans le processus d'apprentissage et de l'innovation. La capacité d'absorption sera donc dépendante du niveau de connaissances de chacun des agents.
 - Les technologies « de base », les inputs, les technologies. Dans chaque secteur d'activité, dans chaque firme, un certain nombre de technologies constituent le socle de connaissances sans lequel les différentes tâches ne peuvent être menées à bien. Les inputs sont liés à la demande et aux technologies complémentaires pouvant être déployées.
 - Les mécanismes d'interaction à l'intérieur ou à l'extérieur des firmes. Les agents sont considérés en fonction de leur implication dans les processus de marché et les interactions hors marché.

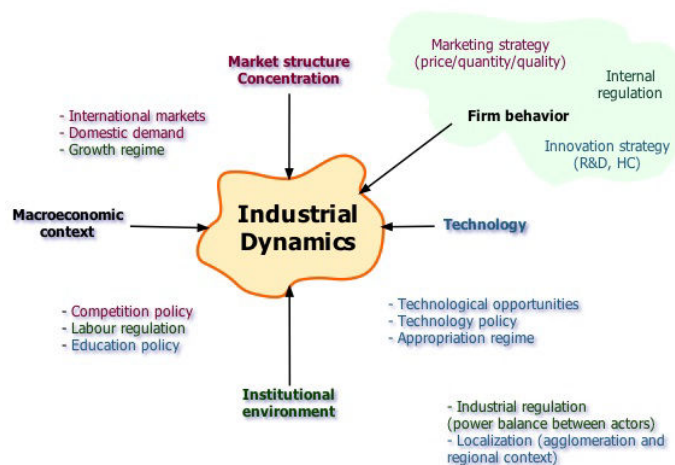
Figure 2-13 - Principaux éléments constitutifs d'un système sectoriel



Source : Réalisé par l'auteur à partir de Malerba (2002)

La notion de « système sectoriel » souligne l'importance de la structure du système en termes de produits, d'agents, de connaissances, de technologies ainsi que de dynamiques tant industrielles qu'entre les principaux éléments qui le constituent. Yildizoglu (Figure 2-14), montre que les dynamiques industrielles impliquent de nombreux agents mais tiennent compte également de l'environnement des firmes.

Figure 2-14 - Dynamiques Industrielles



Source : Yildizoglu - <http://yildizoglu.x10.mx/dynind/index.html>

Comme le rappelle Malerba (2006 : 29), « *There is now convincing evidence that technological change is the result of the contributions of quite different actors that have different relevance in different industries. It would be misleading to concentrate only on firms. Thus one may claim that a sector is composed of heterogeneous agents that could*

be organisations or individuals (e.g. consumers, entrepreneurs, scientists). Organisations may be firms (e.g. users, producers and input suppliers) or non-firms (e.g. universities, financial institutions, government agencies, trade-unions, or technical associations), and include sub-units of larger organisations (e.g. R&D or production departments) and groups of organisations (e.g. industry associations). These agents are characterised by specific learning processes, competencies, beliefs, objectives, organisational structures, and behaviour. They interact through processes of communication, exchange, cooperation, competition, and command ».

Les différents acteurs identifiés par Malerba et Yildizoglu permettent de comprendre que la dynamique industrielle qui les relie ainsi que les interactions entre les firmes sont cruciaux dans les processus d'apprentissage, d'acquisition de connaissances et de compétences, dans une optique d'innovation.

Le recours aux théories évolutionnistes est légitimé par la place accordée aux dynamiques industrielles chez Winter (1982), le « *Dynamics first* » de Winter selon Belis-Bergouignan (2009 : 3) proposant « *une vision cohérente des forces de changement et de sélection à l'œuvre, notamment sous l'effet des processus d'innovation* ». De plus, l'un des buts de la théorie est d'analyser les dynamiques pouvant exister au niveau de secteurs, voire d'industries (analyse méso-économique).

Ainsi, il est possible de conclure que les concepts pouvant être appliqués à l'innovation en général dans un système national d'innovation ou un système sectoriel d'innovation peuvent également l'être à l'éco-innovation, en particulier.

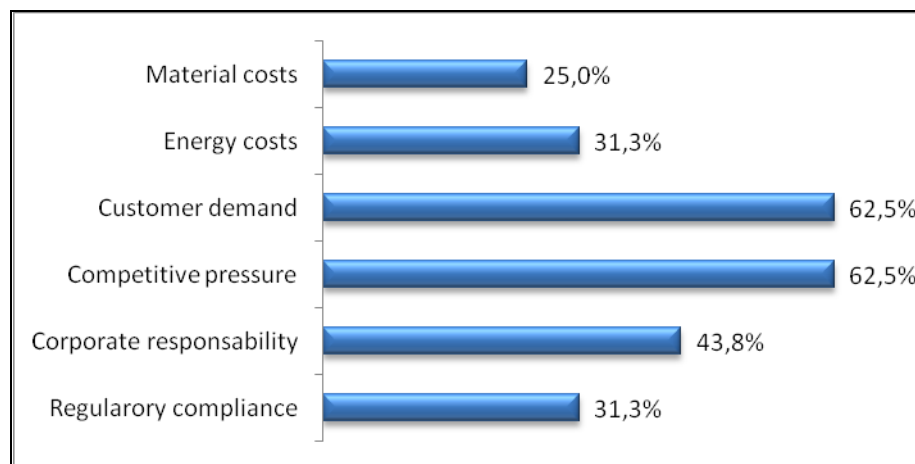
Tableau 2-5 - Évolutions de la définition d'un Système Sectoriel d'Innovation

<p>Malerba 2002</p>	<p>« A sectoral system of innovation and production is a set of new and established products for specific uses and the set of agents carrying out market and non-market interactions for the creation, production and sale of those products. A sectoral system has a knowledge base, technologies, inputs and an existing, emergent and potential demand. The agents composing the sectoral system are organizations and individuals (e.g. consumers, entrepreneurs, scientists). Organizations maybe firms (e.g. users, producers and input suppliers) and non-firm organizations (e.g. universities, financial institutions, government agencies, trade-unions, or technical associations), including sub-units of larger organizations (e.g. R&D or production departments) and groups of organizations (e.g. industry associations) » (p 250)</p>
<p>Geels 2004</p>	<p>Geels s'appuie sur plusieurs auteurs pour construire son référentiel : (897-898)</p> <p>« A sectoral system of innovation can be defined as: a system (group) of firms active in developing and making a sector's products and in generating and utilizing a sector's technologies; such a system of firms is related in two different ways: through processes of interaction and cooperation in artefact-technology development and through processes of competition and selection in innovative and market activities » (Breschi and Malerba, 1997, p. 131).</p> <p>Although this definition includes the selection environment, it does not explicitly look at the user side. Furthermore, the definition mainly looks at firms, neglecting other kinds of organisations.</p> <p>A technological system is defined as: « ... networks of agents interacting in a specific technology area under a particular institutional infrastructure to generate, diffuse and utilize technology.</p> <p>Technological systems are defined in terms of knowledge or competence flows rather than flows of ordinary goods and services. They consist of dynamic knowledge and competence networks » (Carlsson and Stankiewicz, 1991, p. 111)</p>
<p>Malerba 2005</p>	<p>« Sectoral systems of innovation have a knowledge base, technologies, inputs and a (potential or existing) demand. They are composed of a set of agents carrying out market and non-market interactions for the creation, development and diffusion of new sectoral products. These agents are individuals and organisations at various levels of aggregation, with specific learning processes, competencies organisational structure, beliefs, goals and behaviours. They interact through processes of communication, exchange, cooperation, competition and command. Their interaction is shaped by institutions. A sectoral system undergoes processes of change and transformation through the coevolution of its various elements ».</p> <p>Thus a sectoral system could be seen as composed by three main building blocks: – knowledge and technology – actors and networks – institutions » (pp 65-66)</p>
<p>Oltra et Saint Jean 2009</p>	<p>S'appuient sur la définition fondatrice de Malerba (2002) qui définit un système sectoriel d'innovation et de production en tant que « A sectoral system of innovation and production is a set of new and established products for specific uses and the set of agents carrying out market and non-market interactions for the creation, production and sale of those products » (p 567).</p>

2.2 Les moteurs de l'éco-innovation

Une étude américaine réalisée en 2008 posait la question suivante aux entreprises : *What drivers of Green Innovation do see in your organization* » (Innovating to Win). Deux éléments se détachent particulièrement parmi les réponses : la demande des clients et l'intensité de la compétition (62,5%). Un troisième facteur dominant est la responsabilité (sociale) de l'entreprise (43,8%) (Graphique 2-7). L'étude concluait « *this suggests that there is a quantifiable value to going green* montrant que les innovations « vertes » sont compatibles avec la nécessité pour une firme de faire des profits. Ces réponses tendent à valider les hypothèses de Porter et van der Linde (1995a, 1995b) selon lesquelles les considérations environnementales étaient des facteurs clés de succès déterminants dans le débat de l'innovation.

Graphique 2-7 - Green Innovation Drivers



Source : Innovating to Win, 2008

Elles valident également l'hypothèse émise par les auteurs (1995a, 1995b) selon laquelle une réglementation bien conduite, dans un environnement concurrentiel, aurait un effet positif sur les activités de R&D réalisées dans un objectif de développement de nouvelles technologies orientées vers l'écologie. Il semble néanmoins intéressant de constater que les réponses pour lesquelles les scores sont les plus importants sont la demande des clients et la pression liée à la compétition. L'impact du coût de l'énergie représente un peu moins de 50% des motivations citées précédemment.

Dans l'industrie automobile par exemple, les primes versées par l'État constituent autant d'incitations à innover dans la conception des nouvelles motorisations afin de pouvoir présenter aux clients les taux d'émissions de CO₂ les plus bas du marché et donc conquérir des parts de marché supplémentaires.

Le rôle de l'État apparaît comme déterminant non seulement au niveau des aides pouvant être attribuées – jusqu'à 5 000 euros pour un véhicule électrique (VE), mais également pour le développement du marché du VE, au travers de commandes émanant d'entreprises publiques (La Poste) et des collectivités locales. La livraison de la commande de 50 000 unités à partir de 2011 devrait favoriser progressivement son adoption et conduire à des économies d'échelle. Le retour d'expérience dû à cette commande aura sans nul doute un effet positif, grâce aux remarques des utilisateurs.

Qu'ils soient allemands, français, japonais, tous les constructeurs automobiles se sont engagés sur ce nouveau segment. L'apparition de nouveaux entrants tels que Venturi, Bolloré (avec la BlueCar en libre-service à Paris) souligne les faibles barrières à l'entrée pouvant exister à ce niveau.

Le 21 février 2013, Vincent Bolloré a annoncé que la BlueCar serait désormais disponible à la vente et non plus seulement accessible en libre-service ou en location. Le prix de vente serait de 12 000 euros, déduction faite de la prime d'État de 7 000 euros. Le véhicule vendu sera techniquement identique à celui loué. Le constructeur s'appuie sur un retour d'expérience significatif : le bilan de son système de véhicules électriques en libre-service « *Autolib'* » s'élève à 1,3 millions de locations et approximativement 15 millions de kilomètres parcourus depuis son lancement en décembre 2011 et a démontré sa fiabilité. L'investissement, selon l'industriel a représenté 1,8 milliards d'euros. Le groupe Bolloré s'appuie également sur la technologie « *lithium métal polymère* » (LMP) de ses batteries. « *La BlueCar est aussi une vitrine pour notre technologie de batteries* » (Bolloré, 2013). Les batteries LMP permettent une autonomie de 250 km en ville et 150 km sur route à une vitesse n'excédant pas 110km/h. Plusieurs constructeurs automobiles se sont déclarés être intéressés par cette technologie qui se différencie de la solution Lithium-ion. « *Nous discutons avec l'ensemble des constructeurs, tous sont intéressés par notre technologie, notamment pour des raisons de sécurité* » (Bolloré, 2013). La firme Boeing qui rencontre des problèmes avec les batteries Lithium-ion qui

équipent le 787 « Dreamliner »³³ (Electric Vehicle Research, 22/01/2013) pourrait opter pour les batteries LMP. Si cette hypothèse venait à se confirmer, l'adoption croissante de cette technologie pourrait entraîner d'autres secteurs dans le sillage de l'automobile et ainsi accélérer l'amortissement des investissements qui ont été nécessaires à son développement.

Les constructeurs ont certes pris conscience des enjeux et ont investi pour créer des motorisations alternatives, hybrides et électriques. Mais sans infrastructures de recharge, il sera difficile de déployer de telles technologies.

Les collectivités locales, sous l'impulsion de l'État, mettent en place des structures en vue de favoriser le véhicule électrique, en implantant des bornes de recharge qui profiteront également aux hybrides rechargeables. Dans le communiqué de presse du 13 avril 2010³⁴, Jean Louis Borloo et Christian Estrosi annonçaient « *la signature d'une charte avec douze collectivités territoriales « pilotes » et les constructeurs automobiles PSA et Renault, pour s'engager sur le déploiement, dès 2010, d'infrastructures de recharge des véhicules électriques et hybrides rechargeables [...]. L'État s'engage à formuler des recommandations opérationnelles pour le déploiement des infrastructures publiques de recharge qui seront regroupées au sein d'un livre vert publié en octobre 2010. Il précisera également les modalités de financement prévues dans le cadre du Grand Emprunt pour aider les collectivités* ».

Les Pouvoirs Publics apparaissent comme un acteur « *facilitateur* » de la mise en œuvre et du développement et du déploiement des voitures électriques et hybrides rechargeables, deux éco-innovations de rupture. Leur intervention est de nature à favoriser la diffusion d'innovations, tant au niveau des constructeurs automobiles que des acteurs « *périphériques* ».

Dans leur analyse sectorielle des systèmes d'innovations appliquée à l'industrie automobile française, Oltra et Saint Jean (2009 : 567), livrent une définition de l'éco-innovation ou plus précisément des innovations environnementales : « *In a broad sense, environmental innovations can be defined as innovations that consist of new or*

³³<http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/boeing-dreamliner-implications-for-electric-vehicles-00005110.asp?sessionid=1>

³⁴ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/13-04-2010_JLB-CE_Plan_Dev_Vehicules_electriques_hybrides-2.pdf

modified processes, practices, systems and products which benefit the environment and so contribute to environmental sustainability ». Le lien fait par les auteures entre environnement et développement durable est clairement établi.

Tietze et al. (2011: 345) rejoignent Driessen et Hildebrand³⁵ (2002 : 344) en choisissant une définition « *plus pragmatique* » à partir de laquelle « *it does not have to be developed with the goal of reducing the environment burden [...]. It does however, yield significant environmental benefits* ». Au terme de leur revue de littérature et des définitions de chacun des auteurs étudiés, ils retiennent six points importants :

1. *“Innovation object: Product, process, service, method*
2. *Market orientation: Satisfy needs/ be competitive on the market*
3. *Environmental aspect: Reduce negative impact (optimum = zero impact)*
4. *Phase: Full life cycle must be considered (for material flow reduction)*
5. *Impulse: Intention for reduction may economical or ecological*
6. *Level: Setting a new innovation/ green standard to the firm,”*

et concluent : « *Comparing the UN Brundtland definition for sustainability with the other three notions, the most important difference in this definition is the consideration of the ecological AND social dimension. The development of sustainable innovations therefore implements economical, ecological and social aspects. This is to our understanding the main difference between “sustainable” and the other three notions which only include the former two aspects* ».

Il apparaît, en conclusion de cette étude (Tietze et al. 2011 : 346), que les auteurs considèrent les différents termes « *vert* », « *éco* », « *durable* », « *soutenable* » et « *environnemental* » comme des synonymes, et les utilisent de manière indifférenciée. Seuls quelques-uns les utilisent dans une acceptation différente. « *Only in a limited number of publications (between 1.6 – 6.2%) the authors use multiple notions with the notions « green » and « eco-innovation »* ».

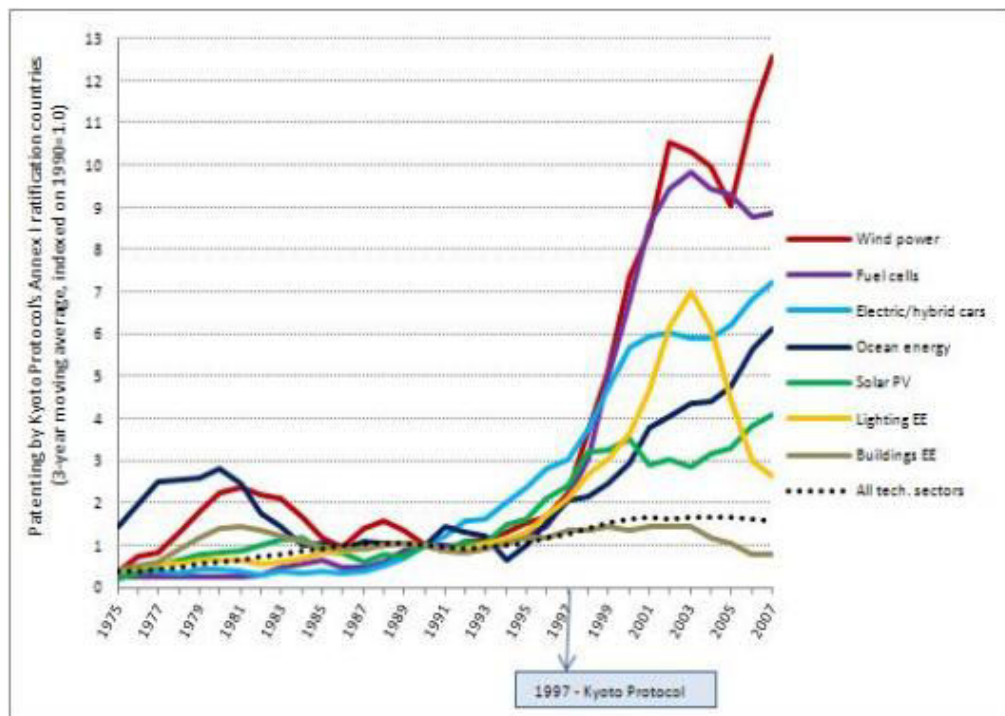
Boutiller et al. (2012 : 15) considèrent que « *l'éco-innovation (ou innovation verte ou innovation environnementale) désigne des innovations ayant une finalité de développement durable et de réorientation de la performance économique introduites par des institutions diverses (entreprises, acteurs publics, associations)* ».

³⁵ In Marketing for sustainability: towards transactional policy-making, ch. 28, 343-355.

Les opinions formulées par les différents auteurs permettent de déduire que toute innovation ayant un impact positif sur l'environnement (réduction de la pollution due aux GES, par exemple), qu'elle soit de produit ou de service qu'elle concerne un procédé ou des méthodes (organisation, ...) peut être qualifiée d'innovation environnementale.

Le Graphique 2-8 fait apparaître que l'évolution de l'innovation en matière d'atténuation du changement climatique a été la plus marquante sur trois technologies. Vient en première position l'éolien, loin devant les piles à combustible et enfin les véhicules hybrides et électriques. Cela peut s'expliquer, du moins en partie par le fait que le déploiement des véhicules hybrides et électriques entraînera un surplus de consommation électrique lors des phases de recharge. La pile à combustible pourrait dans l'avenir constituer une source d'énergie embarquée permettant une plus grande autonomie.

Graphique 2-8 - Évolution de l'innovation dans les technologies d'atténuation du changement climatique, comparaison avec tous les secteurs



Source : OCDE 2010. Projet de l'OCDE sur la politique de l'environnement et l'innovation technologique
www.oecd.org/env/cpe/entreprises/innovation

A partir de données extraites de la base de données statistiques mondiale OEB/OCDE (PATSTAT, 2009)

Le rapport Bruntland (1987) donne la priorité au développement économique par rapport à la protection de l'environnement. Il faut néanmoins rappeler que « *la Déclaration de Stockholm pose plusieurs principes, dont l'affirmation selon laquelle le développement économique est une condition première de l'amélioration de la qualité de vie et un remède à la dégradation de l'environnement* » (Tressallet, 2008 : 10). Cela conduit à considérer qu'il existe une relation entre développement durable et croissance économique et que ce lien serait les « éco-innovations ».

2.3 Les éco-innovations : un prolongement des concepts schumpétériens et évolutionnistes

L'innovation technologique trouve ses sources d'une part dans la recherche scientifique et, d'autre part au sein des entreprises, dans les départements de R&D. Il existe comme cela a été rappelé précédemment, cinq types d'innovations, selon Schumpeter. La tradition veut que l'innovation technologique soit distinguée des autres types d'innovations. Dans le cas présent, c'est la dimension de l'innovation technologique qui est retenue. « *Innover, c'est concevoir et produire un objet qui n'existe pas* » (Devalan, 2006 : 17). C'est en partant de cette première définition que l'innovation incrémentale sera caractérisée (2.3.1) avant d'aboutir à l'innovation de rupture (2.3.2).

2.3.1 Les éco-innovations incrémentales

Ce type d'innovation est généralement qualifié d'innovation de caractère mineur en raison du fait qu'il s'agit d'améliorations intervenant soit dans le processus de production (ou dans son organisation), soit dans les produits. Certaines entreprises ont compris l'importance de telles innovations et encouragent leurs employés à travailler dans le sens d'une amélioration continue (Toyota, Renault, ...). Une telle démarche se traduit par la mise en place de « boîtes à idées » dans lesquelles les employés pourront suggérer des modifications, soit dans la manière de produire, soit introduire des modifications dans le produit afin d'en réduire le coût et en augmenter l'efficacité. Elles s'inscrivent dans la recherche d'une plus grande efficacité et d'une dynamique d'entreprise. Néanmoins, comme le soulignent Chanaron et Lung (1995 : 47) « *les systèmes de suggestions dont l'efficacité a été largement démontrée au Japon, ont été partout systématisés. Mais en Europe, les réticences à ce type d'implication demeurent vives. C'est ainsi, par exemple, que les résultats de Fiat restent très en deçà de ceux de*

Toyota : en 1992, 0,75 suggestion par salarié contre 35,6 et 47% des suggestions adoptées contre 98% ».

L'industrie automobile ne se caractérise pas par ses innovations techniques de rupture, privilégiant les évolutions progressives. La plupart du temps les innovations sont introduites sur des véhicules haut de gamme (segment premium) ou sur des modèles de niche.

L'ABS (système empêchant les freins de se bloquer lors d'un freinage d'urgence) par exemple, a tout d'abord été commercialisé à un prix très élevé sur les Mercedes « classe S » (segment premium) avant de se généraliser à l'ensemble de la gamme puis de devenir un équipement monté en série sur toutes les voitures. Cette stratégie permet au constructeur de rentabiliser le plus rapidement possible l'investissement effectué dans le cadre de sa R&D, en touchant une clientèle sensible aux innovations ou désireuse d'être à la pointe en matière de technologie. Les avis émis par les utilisateurs de ces nouvelles technologies participeront à sa diffusion au travers des rendements croissants d'adoption. *« Chaque génération de nouveaux modèles est l'occasion privilégiée d'introduction de nouveautés techniques importantes certes, comme l'ont été en leur temps l'injection électronique, le turbocompresseur, le freinage antibloquant, les sacs gonflables (airbags), par exemple, mais qui restent de simples perfectionnements qui se généralisent peu à peu (souvent à partir des modèles haut de gamme vers le bas de la gamme) »* (Chanaron, Lung, 1995 : 27).

Figure 2-15 - Typologie de l'innovation

Habitudes de Consommation Ancienne Nouvelle	Innovation de Rupture	Innovation Comportementale
	Innovation Technique	Innovation Incrémentale
	Nouvelle	Ancienne
	Technologie	

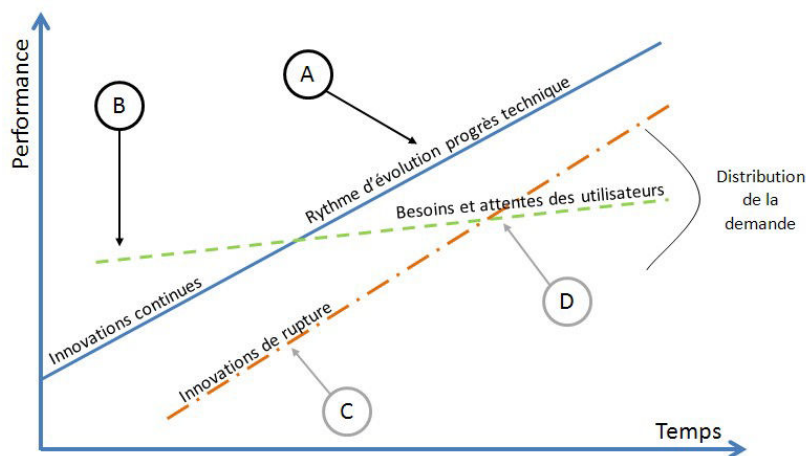
Source : d'après Derek Abell

Ainsi, comme le montre la typologie de Derek Abell (Figure 2-15), l'innovation incrémentale se trouve à l'intersection d'une ancienne technologie conjuguée à d'anciens comportements en matière de consommation alors que l'innovation de rupture, en mobilisant une nouvelle technologie va créer de nouveaux modes de consommation et modifier ainsi les « anciennes habitudes ».

2.3.2 Les éco-innovations de rupture

Selon Christensen (1997-2011), la technologie qui caractérise une innovation de rupture n'est pas au départ, performante au regard du marché car elle ne répond pas nécessairement à un besoin. Néanmoins au fur et à mesure qu'elle sera adoptée (ce qui peut demander un temps plus ou moins long) et qu'elle évoluera, sa demande sur le marché pourra la conduire à le dominer (Graphique 2-9). Elle pourra également être amenée à remplacer la précédente technologie dominante (destruction créatrice).

Graphique 2-9 - The Disruptive Innovation Model



Source : Christensen, 1997

La typologie de Derek ABELL (Figure 2-15) situe l'innovation de rupture à l'intersection d'une nouvelle technologie avec de nouvelles habitudes de consommation. Ceci s'explique par le fait qu'une nouvelle technologie, en rupture avec les anciennes va générer de nouvelles habitudes de consommation et également de nouvelles utilisations. Plusieurs exemples peuvent illustrer ce type d'innovation.

Un des plus connus est celui de Nescafé qui a lancé la « dosette » sur le marché et la machine à café qui permettait de l'utiliser. Bien que les débuts aient été difficiles, la marque a su dans un environnement commercial plutôt stagnant se démarquer, obtenir ainsi un monopole sur le marché d'un produit de grande consommation et en modifier le positionnement. En effet, les dosettes sont vendues dans un réseau se situant hors de la grande distribution, et dans des boutiques dédiées exclusivement ce produit.

La gamme s'est progressivement élargie et aujourd'hui, la marque est fière d'annoncer « *Nespresso, l'art de l'espresso parfait. 16 Grands Crus, une gamme de machines et une collection d'accessoires pour sublimer vos dégustations* ». La marque est également mobilisée sur le front du développement durable. L'objectif selon son PDG est de faire en sorte que d'ici 2013, 80% du café (utilisé) soit issu du Programme *Nespresso AAA Sustainable Quality™* Coffee, avec certification Rainforest Alliance et de mettre en place des systèmes de collecte pour tripler la capacité à recycler les capsules usagées afin d'atteindre un taux de 75% d'ici 2013 (Projet *AluCycle™*).

La démarche entreprise s'inscrit dans une conception du développement durable selon laquelle « *le développement durable n'impose pas de renoncer à exploiter les ressources naturelles ; il impose de reconstituer au sens économique du terme les ressources utilisées. Cela passe par la recherche d'une meilleure efficacité dans la transformation et l'usage de ces ressources (efficacité énergétique, efficacité-matières)* » (Godard, 2002 : 117).

La production d'une tonne d'aluminium nécessite l'utilisation de grandes quantités d'électricité : « *L'électricité est essentielle à la production de l'aluminium. Un peu plus du tiers (35%) des coûts de production d'une tonne métrique d'aluminium* » (Association de l'aluminium du Canada, 2013). Ainsi l'intérêt du recyclage est-il crucial afin d'une part de limiter les consommations de matière première et d'autre part de réduire la consommation d'électricité. Cette réduction est d'autant plus importante que dans certains pays tels que la Chine l'électricité est en partie produite par des centrales thermiques à charbon.

L'Association Française de l'Aluminium³⁶ rappelle que « *la consommation totale d'aluminium en France en 2010 a été de 1 276 000 tonnes. Le métal recyclé a contribué à hauteur de 554 000 tonnes à la satisfaction du besoin total (soit près de 43 % de celui-ci, un chiffre particulièrement élevé)* ».

Sur le plan des émissions de CO₂ l'entreprise s'est fixée, pour la période 2009-2013, une réduction de l'empreinte carbone de chaque tasse de 20%. La dosette de café confirme bien son statut d'innovation de rupture car au travers d'une nouvelle technologie, elle a modifié les habitudes des consommateurs. Le nouveau produit a été à l'origine de la création de cafetières adaptées. Cette nouvelle innovation découlant de la première s'inscrit dans la vision de Schumpeter pour qui le progrès technique est au cœur de l'économie. Les innovations apparaissent en grappes ou essaims : après une innovation de rupture due à un progrès technique, d'autres innovations sont portées par ces découvertes.

2.4 Eco-innovation : élément constitutif du développement durable

Le champ couvert par les innovations environnementales ou éco-innovations inclut l'ensemble des innovations qui ont un effet positif sur l'environnement³⁷. Le principal impact environnemental de la plupart des produits, de leur fabrication, à leur fin de vie (recyclage) en passant par leur utilisation peut en partie se traduire par leur « bilan carbone », c'est-à-dire la quantité de CO₂ émise tout au long du cycle de vie « *from cradle to grave* ». Cet enjeu est particulièrement important dans l'automobile, dont de nombreux composants, outre l'utilisation, sont source potentielle de pollutions (métaux lourds des batteries, métaux rares des composants électroniques, émissions de CO₂ des véhicules, ...).

Le bilan carbone ne peut résumer l'ensemble des contraintes environnementales. En effet, la réduction de la diversification des cultures par l'introduction du palmier à huile (*jathropa*) en vue de produire des biocarburants peut-elle être considérée comme un choix approprié en raison d'un bilan carbone positif. Si, dans certains pays comme le Mali, les effets ont été positifs, mais uniquement à l'échelon local, dans d'autres pays

³⁶ http://www.af-aluminium.fr/l-aluminium/production.0_2_85625_.php

³⁷ Dans la littérature anglo-saxonne, les termes « *green innovation* », « *eco-friendly* » et « *eco-innovation* » sont utilisés indifféremment pour désigner des « *innovations environnementales* ».

comme à Madagascar, le projet n'a pas abouti et a été qualifié de catastrophe pour les habitants qui ont cru pouvoir accroître leurs ressources grâce à cette nouvelle culture mais n'ont pas obtenu le retour sur investissement escompté.

L'éco-innovation apparaît comme un « *concept-clé* » se situant à l'intersection de l'efficacité et de la réduction de l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et de l'énergie. Elle s'inscrit dans la droite ligne du Traité de Lisbonne dont les objectifs étaient de concilier les enjeux de la croissance économique avec ceux de l'emploi et du développement durable.

« *L'innovation et l'éco-innovation sont des voies complémentaires :*

- *L'innovation technologique permet grâce à des procédés plus efficaces, un meilleur usage des ressources (matières premières, sources d'énergie, eau) et la réduction de l'impact sur l'environnement, par la minimisation des rejets ou la correction des effets ;*
- *L'éco-innovation encadre les progrès technologiques en les inscrivant dans un nouveau modèle de développement qui entraîne une modification des comportements sociaux » (MEDDTL, 2009, 2012).*

L'éco-innovation associe également les deux dimensions que sont la compétitivité et l'innovation en vue d'une performance environnementale, laquelle sera quantifiée en vue de sa valorisation. Dans l'automobile, cette valorisation se traduit essentiellement par une communication en direction des clients, fondée sur les innovations permettant de réduire les émissions de CO₂. Dès lors que le progrès technologique se trouve soumis à des problématiques environnementales, des « *éco-innovations* » émergent, entraînant de nouveaux comportements sociaux tant de la part des entreprises que de la société et l'émergence de nouveaux produits répondant à ces critères, lesquels remplaceront progressivement les anciens (destruction créatrice).

« *L'éco-innovation se définit comme la production, l'assimilation ou l'exploitation de la nouveauté dans les produits, processus, services ou les méthodes managériales avec pour objectif, tout au long de leur cycle de vie, de prévenir ou réduire de manière substantielle les risques environnementaux, la pollution et les autres impacts négatifs liés à l'utilisation des ressources nécessaires » (MEDDTL, 2009, 2012).*

Les éco-innovations (ou innovations environnementales) sont à l'origine de nombreuses innovations de nature différente. Soit elles s'inscrivent dans le prolongement d'une « *innovation ancêtre* » et il s'agit d'innovations incrémentales, soient elles constituent une rupture comme ce fut le cas avec l'arrivée des véhicules hybrides sur le marché.

Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 2

Cette section, a permis de mettre en lumière le fait que certes l'entrepreneur est au cœur du processus d'innovation, mais que certaines circonstances étaient de nature à favoriser voire accélérer ce processus. Dans le cas de l'automobile, la section 1 a conduit à noter le poids des facteurs environnementaux. Dans la section 2, il apparaît que les réglementations découlant de la ratification du Protocole de Kyoto constituent un accélérateur de l'innovation allant au-delà de ceux identifiés en 2008 (Innovating to win).

Le rôle de l'État et des Politiques Publiques est un facteur déterminant. En effet, en imposant des malus aux catégories de véhicules les plus polluants et en attribuant des bonus à ceux qui sont peu ou pas émetteurs de CO₂, l'État a conduit les constructeurs à innover en produisant des véhicules dont les performances n'étaient pas dégradées mais dont les émissions avaient été réduites. Si de telles améliorations n'avaient pas été apportées, il est légitime de penser que le marché aurait sanctionné les constructeurs peu respectueux de l'environnement, en se tournant vers d'autres. L'hypothèse de Porter van der Linde (1995) selon laquelle une réglementation bien conduite, dans un environnement concurrentiel, aurait un effet positif sur les activités de R&D réalisées dans un objectif de développement de nouvelles technologies orientées vers l'écologie est ainsi validée.

Comme cela a été montré, les innovations évoluent vers une plus grande prise en compte de l'environnement, devenant ainsi des innovations environnementales. Elles ne diffèrent pas des innovations « ordinaires » dans la mesure où elles peuvent être soit de nature incrémentale, c'est-à-dire constituer une amélioration, soit être de rupture dans le sens où elles introduisent un changement radical. Ces innovations pourront progressivement parvenir à remplacer les précédentes technologies dominantes (Schumpeter, Christensen, 1997, 2011). Les innovations « vertes » constituent également un facteur de croissance économique par la réduction de l'utilisation des ressources, la limitation des rejets de toutes sortes et par les nouveaux métiers qui se développent.

CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Au terme de ce chapitre, il est possible de conclure que le débat environnemental initié au début des années 1970 a progressivement conduit à la prise en compte de la dégradation du climat et de ses conséquences tant humaines que matérielles. L'homme depuis les débuts de l'ère industrielle a dépensé sans compter les ressources naturelles fossiles. Elles ont permis à l'industrie de se développer, à de nombreuses innovations de voir le jour telles les locomotives à vapeur ou l'automobile. Ces ressources ne sont pas inépuisables, de nombreux sites d'extraction de charbon ou de sites pétroliers ont fini par fermer, les réserves étant épuisées. Qui plus est, lors de leur combustion, les produits d'origine fossile émettent du CO₂, un gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique identifié par le Protocole de Kyoto comme devant faire l'objet d'une forte réduction.

Ainsi que l'avait souligné Grübler (1998), la relation existant entre la technologie et l'environnement est complexe. En effet, d'une part la technologie utilise des ressources et impose une pression sur l'environnement mais, d'autre part, la technologie peut conduire à une meilleure utilisation de ces ressources et donc réduire la pression sur l'environnement. Elle peut même, dans une situation optimale permettre de réduire la pollution existante. La finalité est de parvenir à ce que Weaver et *al.* (2000) qualifient de « *Sustainable Technology Development* »³⁸. « *In order to make technological change sustainable, technical change alone is not sufficient* » (Hekkert et *al.*, 2007 : 414). Reconnaître que le changement technologique ne peut à lui seul assurer un « développement durable » conduit à considérer que cette transition nécessite des changements à tous les niveaux de la société.

La double nécessité d'une part de réduire le prélèvement de ressources naturelles et, d'autre part de limiter les émissions de gaz à effet de serre a progressivement orienté les innovations vers un contenu environnemental ce qui rejoint l'analyse de Porter et Van der Linde selon laquelle un certain nombre de pollutions trouvaient leur source dans des gaspillages. Les auteurs aboutissaient à la conclusion qu'une réduction de la pollution était de nature à accroître la productivité. Il semble pertinent d'en déduire que les éco-

³⁸ Titre de l'ouvrage

innovations tout en réduisant la consommation de matières premières et l'émission de pollutions sont un facteur de croissance économique susceptible de créer des emplois.

L'État dans la transcription du Protocole de Kyoto au niveau national apparaît comme un levier pour le développement des éco-innovations. Appliquées à l'industrie automobile qui a dû réagir face aux mesures de limitation des émissions de CO₂, ces innovations se sont déjà traduites par des évolutions permettant de satisfaire aux nouvelles réglementations en matière de réduction des émissions de CO₂ ou des ruptures telles que l'apparition de véhicules hybrides.

Le troisième chapitre de la thèse analysera l'industrie automobile en mobilisant les théories schumpétériennes et leurs prolongements évolutionnistes ainsi que le concept d'éco-innovation. Ce chapitre étudiera l'impact des carburants fossiles sur cette industrie et des contraintes environnementales auxquelles elle doit s'adapter sous peine de disparaître. Ce chapitre montrera que la prise en compte d'une part des considérations environnementales depuis Kyoto, en se traduisant par des innovations « vertes » est de nature à faire émerger des innovations de rupture susceptibles d'assurer la pérennité de cette industrie et que d'autre part la fin annoncée des ressources pétrolières est également un facteur incitatif pour s'engager sur la voie de solutions alternatives au moteur à combustion interne, lesquelles constitueront des ruptures par rapport au « dominant design » actuel.

CHAPITRE 3

ECO-INNOVATION ET AUTOMOBILE : AMORCE D'UN NOUVEAU SENTIER

*« Le monde de demain ne sera meilleur que si la technologie automobile y participe. »
(Publicité pour la gamme hybride. Toyota France Octobre 2013).*

Les enjeux de l'innovation dans l'industrie automobile, sont liés d'une part à l'augmentation du prix du pétrole qui, selon le BIPE, devrait atteindre le cours de 200 dollars le baril en 2020 et, d'autre part à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il semble que ce deuxième facteur joue un rôle prépondérant dans la mutation engagée. En effet, elle s'inscrit dans le cadre de l'objectif de réduction de GES du protocole de Kyoto qui a conduit à limiter de manière stricte les émissions de CO₂ des véhicules neufs. Les normes fixent les limites à 140g de CO₂ pour 2012, 120g pour 2015 et 95g à l'horizon 2020. Dès lors, au regard des contraintes tant énergétiques qu'environnementales, l'automobile doit réduire son utilisation de carburants d'origine fossile et envisager des énergies alternatives, préférentiellement renouvelables.

Ce chapitre va montrer que les constructeurs automobiles sont confrontés non seulement à une contrainte environnementale forte se traduisant par un durcissement des normes mais également à la fin annoncée des ressources de carburants d'origine fossile³⁹ (section1). Il mettra en lumière la persistance d'un sentier de dépendance caractérisé, d'une part par la motorisation à combustion interne et, d'autre part aux carburants d'origine fossile (section 2). L'analyse des innovations montrera que l'automobile se situe actuellement sur un double sentier de dépendance. Bien que l'automobile soit notamment marquée par les innovations incrémentales, les pressions réglementaires issues du Protocole de Kyoto, ont conduit les constructeurs à intégrer la composante environnementale dans leur R & D, et par voie de conséquence à « éco-innover » (section 3). Ces éco-innovations faisant appel à de nouvelles sources d'énergie non émettrices de CO₂, elles sont lues comme des éco-innovations de rupture et annoncent ainsi depuis le début des années 2000 un changement de sentier de dépendance (Christensen, 1997 ; Midler, Ben Mahmoud-Jouini, 2012 ; Midler, Beaume, Maniak, 2012).

Ce chapitre s'inscrit nécessairement dans une « *approche disciplinaire ouverte* » (Figuière, 2013) dans la mesure où son objet et ses objectifs contraignent à conjuguer les apports des théories de l'innovation aux sciences de l'ingénieur.

³⁹ Dans le cas présent, il convient de préciser que les seuls carburants d'origine fossile pris en compte sont ceux produits à partir du pétrole (essence, gasoil, gaz de pétrole liquéfié – GPL) ainsi que le gaz naturel liquéfié (GNL). L'électricité produite par des centrales thermiques ou nucléaires ne sera pas considérée comme source d'énergie fossile.

SECTION 1 ENVIRONNEMENT : L'AUTOMOBILE FACE A UNE DOUBLE CONTRAINTE

L'une des caractéristiques principales de l'industrie automobile, outre sa concentration, est d'être fortement capitalistique et de nécessiter de très importants investissements tant au niveau des installations que du matériel mis en œuvre (presses, robots). Marsili (2002) note la complexité de l'industrie automobile au regard de la diversité des acteurs et rappelle qu'elle nécessite de la part des firmes la coordination de nombreuses sources d'informations (internes et externes) et de savoirs, d'intégrer de multiples technologies et d'être en mesure de s'adapter à des disciplines scientifiques variées. Cette section montre que l'industrie automobile ne se limite pas aux seuls constructeurs (1.1), mais que de nombreux acteurs interviennent et participent à la valeur ajoutée créée par cette industrie. Il sera également rappelé que des décisions politiques anciennes datant de la présidence du général de Gaulle ont contribué à la diésélisation du parc automobile (1.2) créant ainsi un sentier de dépendance à ce carburant. Cette dépendance montre l'importance des décisions prises dans le passé. L'histoire de l'automobile au travers de décisions anciennes illustre « *history matters* » de Rosenberg.

1.1 L'automobile dans l'économie française : un secteur incontournable

L'automobile est un des secteurs clés au regard de l'économie nationale. Les chiffres communiqués par le Ministère des Finances faisaient apparaître en 2004⁴⁰ que « *depuis 10 ans, la valeur ajoutée de la branche automobile a crû de près de 7% l'an en moyenne en volume et de 6% en valeur, contre respectivement 3,5% et 2,5% pour l'ensemble de l'industrie manufacturière. La branche automobile représente ainsi 11,2% de la valeur ajoutée manufacturière et 8,7% de l'emploi manufacturier* ».

Les données de l'INSEE reprises par le Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Économiques (PIPAME) (2011) rappellent qu'« *en 2008, le secteur de l'industrie automobile employait en France 239 711 personnes (équivalent temps plein) et représentait 8,3% de la valeur ajoutée manufacturière. Au cours de cette même année, l'industrie automobile a contribué à 11,5% des exportations de l'ensemble de l'industrie* ». La Direction Générale de la Compétitivité de l'Industrie et des Services (DGCIS) (2012) soulignait le rôle stratégique assumé par l'industrie

⁴⁰ http://www.minefi.gouv.fr/notes_bleues/nbb/nbb285/industrie_automobile.pdf

automobile française et notait : « *son effet d'entraînement est majeur sur l'économie : 1 unité de valeur ajoutée dans l'automobile crée 4,1 unités de valeur ajoutée dans l'économie nationale* »⁴¹.

Encadré 1 – Chiffres clés de l'automobile en France - 2012

- Troisième pays producteur européen derrière l'Allemagne et l'Espagne
- Moins de 2 millions de véhicules produits (véhicules particuliers et utilitaires), en recul de près de 39 % au regard de la production réalisée en France en 2005
- 440 000 emplois directs dans la filière automobile
- 648 000 emplois indirects dans la réparation, la distribution et les services
- recul de l'emploi de 30 % en 10 ans
- reçoit 16 % de la dépense de recherche-développement national
- la filière automobile française consacre 6% de son chiffre d'affaires au financement de ses dépenses de recherche et développement
- 1^{er} rang national en termes de prise de brevets
- Présence de l'ensemble des maillons de la filière automobile : centres de recherche et de développement, sites d'ingénierie, sites d'assemblage, réseau de sous-traitants qualifiés et diversifiés (mécanique, plasturgie, électronique, fonderie, ingénierie, technologies de l'information, textile...)
- Présence des constructeurs automobiles (PSA (Peugeot, Citroën), Renault, Toyota, Smart...) et de grands équipementiers automobiles (Valeo, Faurecia, Bosch, Plastic Omnium...)
- Présence de nombreuses entreprises de taille intermédiaire et de PME
- Présence de centres de recherche et laboratoires : IFSTTAR...
- Trois pôles de compétitivité dédiés à l'automobile et plus largement à la mobilité : Mov'eo, ID4Car, Véhicules du futur

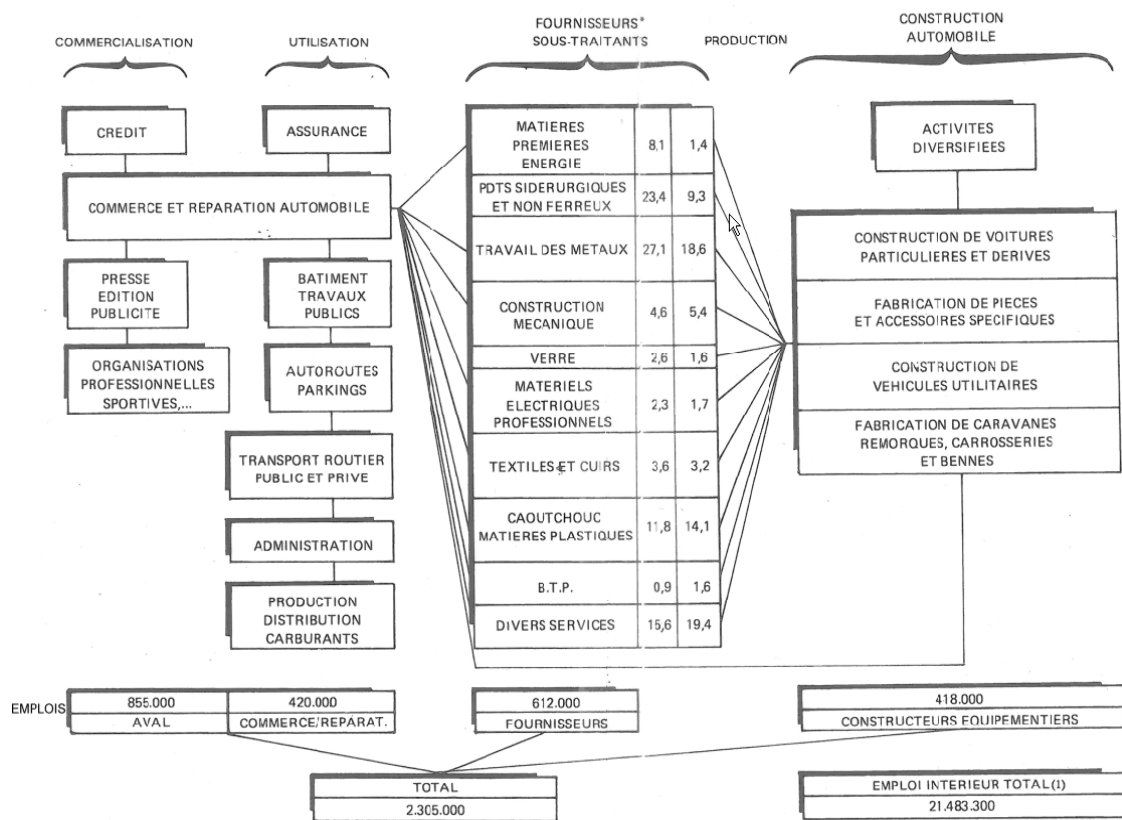
Source : Direction Générale de la Compétitivité de l'Industrie et des Services (2012)⁴²

⁴¹ <http://www.dgcis.gouv.fr/secteurs-professionnels/industrie/automobile>

⁴² <http://www.dgcis.gouv.fr/secteurs-professionnels/automobile/chiffres-cles-automobile>

Comme Chanaron (1981, 1983 : 84-85) le montrait (Figure 3-1), de nombreuses professions sont concernées, directement ou indirectement, c'est-à-dire impactées par les activités automobiles. L'évolution de l'automobile depuis 1983 a élargi ce champ. En effet, depuis cette date, au travers des innovations qui ont vu le jour, des secteurs se sont développés. C'est le cas par exemple, de l'électronique, de plus en plus présente dans les véhicules.

Figure 3-1- Les emplois liés à l'automobile en France (1981)



Source : J.J. Chanaron, (1983 : 84-85)

* Les chiffres indiqués pour les fournisseurs et sous-traitants correspondent le premier au poids de chaque secteur dans le total des approvisionnements de la branche « Automobile, transport terrestre » (hors achat à elle-même), le second à la part de cette dernière dans leurs débouchés industriels (y compris importations)

(1) Population active totale

Le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA) souligne l'importance de cette industrie et rappelle qu'elle est un moteur pour de nombreuses autres industries (Tableau 3-1) : « *L'impact sur l'économie française a été d'autant plus grand que la branche automobile exerce un effet d'entraînement sur les autres branches (métallurgie, composants, chimie, services...) qui lui fournissent la moitié de ses consommations intermédiaires* » (Minefi, 2004).

Les différents systèmes électroniques tels que l'ESP ou le limiteur de vitesse, sont devenus incontournables en raison de leur qualification en tant que « *dispositifs de sécurité* ». À titre d'exemple, leur absence (entre autres) lors des tests Euro NCAP de la Dacia Lodgy lui a valu d'être sanctionnée par un classement « trois étoiles ».

La gestion des multiples systèmes électroniques « embarqués » a conduit au développement de logiciels dédiés et de « mallettes informatiques » pouvant être connectées au véhicule afin d'en analyser les paramètres et de diagnostiquer d'éventuelles pannes. Les premières innovations, en entraînant de nouvelles, ont constitué des « *grappes d'innovations* » (Schumpeter) et créé des emplois.

Tableau 3-1 - Emplois induits par l'automobile en 2010 (milliers de personnes)

En personnes		
industrie manufacturière et énergétique 220 000	TOTAL MATIERES PREMIERES ET SERVICES 373 000	services 153 000
Construction automobile 137 000	Equipements accessoires 60 000	carrosserie, remorques, caravanes 23 000
	TOTAL INDUSTRIE AUTOMOBILE 220 000	
	TOTAL ACTIVITES DE PRODUCTION 593 000	
Ventes, réparation, contrôle technique location courte durée démolisseurs recycleurs 495 000	Assurances, experts et crédit 85 000	Ventes de carburants 34 000
Auto-écoles, permis 26 000	Sport, presse, édition, divers 13 000	
	TOTAL USAGE DE L'AUTOMOBILE 653 000	
Transports routiers de marchandises et de voyageurs (compte d'autrui et compte propre), services annexes 947 000	Police, santé, enseignement, administration, administration (services non marchands) 34 000	Construction et entretien des routes 132 000
	TOTAL TRANSPORTS 1 113 000	
	TOTAL DES EMPLOIS INDUITS PAR L'AUTOMOBILE 2 359 000	

Sources : CCFA, CNPA, SESSI, INSEE, SOeS, URF, URSIF, 2011

Ce double effet, à la fois d'entraînement et de structuration s'est poursuivi malgré la crise de 2008 et le fort ralentissement des ventes d'automobiles : « *la construction automobile française est une industrie structurante pour ses fournisseurs et pour l'économie française. L'évolution de la construction automobile française entraîne le secteur des équipementiers et des autres fournisseurs, tels que la plasturgie, le caoutchouc industriel, la fonderie, les services industriels des métaux, etc.* » (CCFA, 2010).

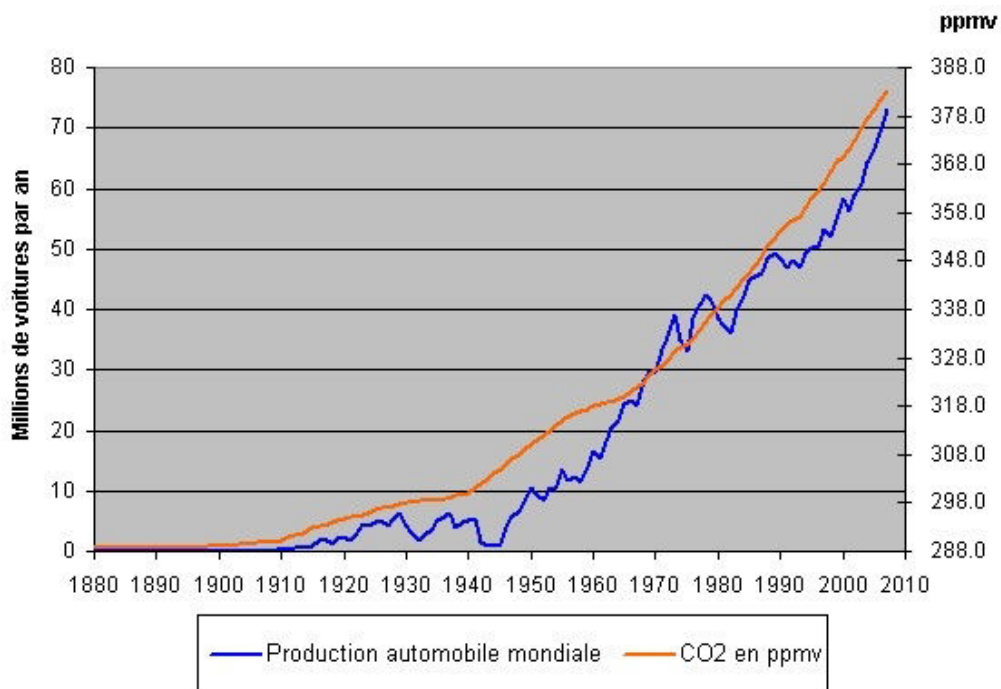
En se basant sur le rapport « *Community Innovation Survey* », Oltra et Saint Jean (2007) montrent que cette industrie fait appel aux synergies avec les sous-traitants et équipementiers en matière d'innovation. La production de masse combinée à la complexité du système de production (Marsili, 2002 ; Oltra et Saint Jean, 2007) augmente le risque d'échec inhérent aux innovations radicales et explique le développement des innovations incrémentales. Il semble que cette tendance à l'incrémentalisme se renforce lorsqu'il s'agit d'innovations environnementales faisant appel aux technologies « end of pipe ».

L'industrie automobile est l'une de celles qui a subi la plus forte pression pour améliorer ses performances environnementales. Nunes et Bennett rappellent que cette industrie est désormais considérée comme étant à l'origine de la majorité des pollutions en milieu urbain. Vergragt (2006), au-delà des effets positifs de l'automobile pointe les effets négatifs tant sur le plan humain qu'au niveau environnemental : pollutions localisées, émissions de gaz à effet de serre, congestion des centres villes (ce qui augmente la pollution localisée et les émissions diverses) auxquelles viennent se rajouter les conséquences dues aux accidents de la circulation. Orsato et Wells (2006) avaient relevé différents points sur lesquels l'industrie automobile serait amenée à s'interroger. Tout d'abord, au point de vue économique, comment résoudre le problème des surcapacités dans des marchés matures arrivés à saturation et poursuivre l'activité de manière à ce qu'elle génère des profits ? Selon le CCFA, la problématique des surcapacités s'est traduite par un recul de 610 000 unités (sur les neuf premiers mois de l'année) soit un recul de 12,6% par rapport à 2011.

Depuis 2012, Bruxelles envisage d'établir un « *taux minimal unique sur les carburants* » au sein de l'Union Européenne. Un tel dispositif aurait pour effet de renchérir le prix du gazole dans les pays appliquant de faibles droits d'accises. La France, compte tenu de sa politique fiscale sur le gasoil serait parmi les premières concernées. Le Commissaire Européen à la Fiscalité Algirdas Semeta (2011) a proposé de « *modifier le mode de calcul de l'impôt sur les produits énergétiques, en prenant en compte à la fois les émissions de CO₂ et la valeur énergétique du produit. La proposition formule le souhait de taxer le CO₂ à 20 euros par tonne rejetée et imposer un seuil minimum pour le fuel de chauffage et l'essence pour l'automobile. Cette proposition se place dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. Il s'agit d'encourager les énergies propres, d'aider les biocarburants et de réduire la dépendance créée par les importations de gazole* ».

Sur le plan environnemental, Orsato et Wells (2006) soulignent la forte dépendance aux carburants fossiles ainsi qu'une importante consommation de matières premières. Sur le Graphique 3-1, le lien entre l'augmentation de la production automobile et celle du CO₂ dans l'atmosphère apparaît clairement.

Graphique 3-1 - Évolution comparée de la production automobile mondiale et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère



Source : Carfree.fr – à partir des données des constructeurs et du GIEC

Ces deux facteurs, économique et environnemental devraient conduire les acteurs du secteur à envisager d'une part de nouveaux modes de production plus respectueux de l'environnement et, d'autre part de nouveaux usages de l'automobile. De nombreuses innovations sont appelées à émerger tant au niveau du processus productif et des usages qu'en fin de vie des véhicules.

1.2 Un secteur sous contraintes

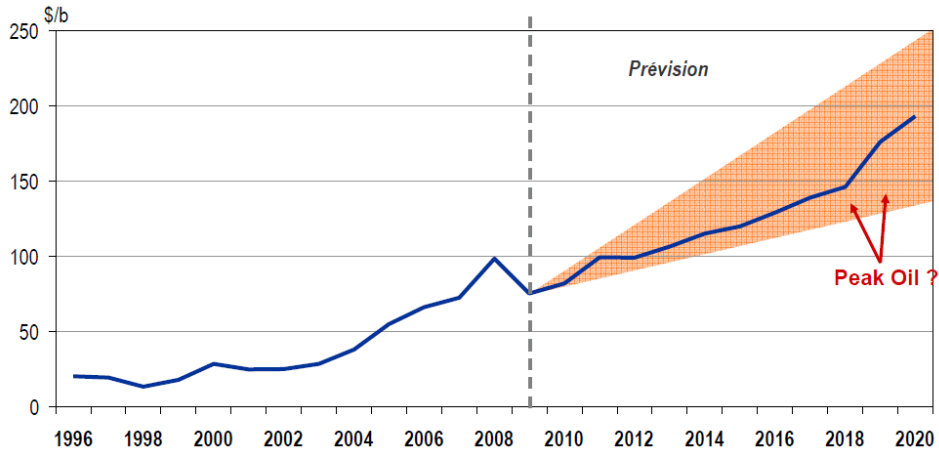
L'automobile a vu son développement favorisé par une source d'énergie facilement distribuable à ses débuts et aujourd'hui accessible en quelques minutes, le pétrole qui lors de son raffinage donne l'essence et le gas-oil. Non seulement la pérennité de cette ressource est remise en cause, mais il est prouvé que la combustion des carburants d'origine fossile dans les moteurs à combustion interne est source de pollutions (CO₂, NO_x, microparticules, etc.). L'automobile est donc confrontée à deux types de contraintes. La première consiste à réduire la consommation de produits pétroliers, la seconde vise la réduction des émissions de GES suite à la ratification du Protocole de Kyoto et à sa transposition par l'État français.

L'automobile doit faire face à une baisse puis à une pénurie annoncée de ressources en carburants fossiles, le « *peak oil* », terme qui désigne le moment à partir duquel les quantités de pétroles extraites vont commencer à décliner. Selon l'International Energy Agency (IEA), ce cap aurait été atteint en 2005 avec une production de 75 millions de barils/jour. Il faut tenir compte du sursaut de 2008 où la production a été de 83 millions de barils/jour. Ce propos est à nuancer en s'appuyant sur les estimations des experts qui considèrent qu'il n'y a pas un *peak oil* mais autant de *peak oil* que de pays producteurs. Cette théorie est reprise par le BIPE pour qui « [...] *le Royaume-Uni et la Norvège ont déjà franchi « leur » Peak Oil [...]. L'Iran aurait aussi franchi ce cap au milieu des années 70 et le Venezuela, un peu avant. La Russie devrait franchir ce cap entre 2010 et 2015* ».

La répartition des ressources entre les pays qui appartiennent à l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) et ceux qui ont choisi de ne pas adhérer permet de mieux comprendre les stratégies mises en place : les pays « non OPEP » concentrent 60% de la production bien qu'ils ne détiennent que 30% des ressources alors que les pays membres de l'OPEP représentent 70% des réserves prouvées. Ce fait serait de nature à renforcer l'influence des pays de l'OPEP et d'entraîner une augmentation

significative des prix comme le montre le Graphique 3-2. Les anticipations font apparaître un cours de 200 dollars le baril en 2020.

Graphique 3-2 - Évolution du cours du pétrole et prévision, 1996 - 2020



Source : Data Stream / Prévision BIPE

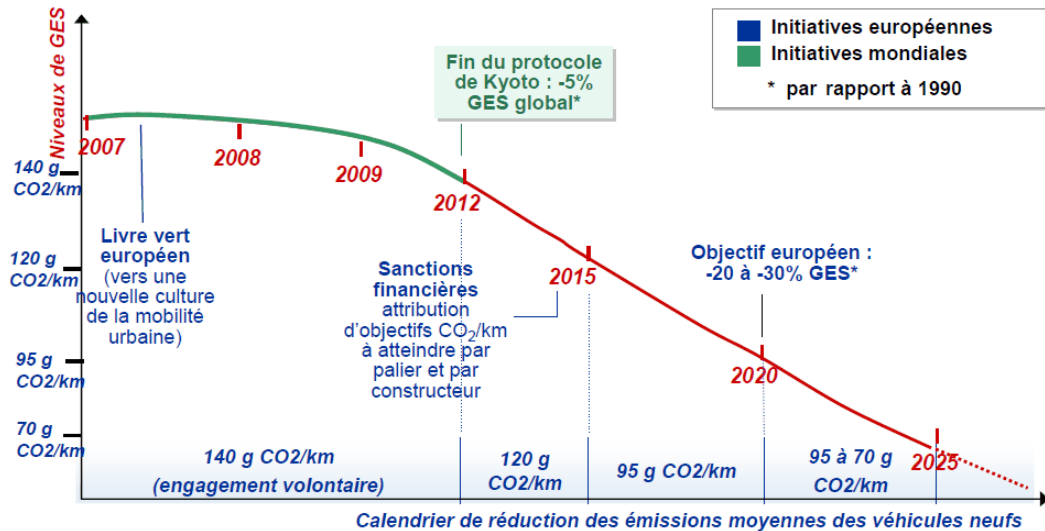
Les mutations économiques dans le secteur de l'automobile – Bercy, 21 mai 2010
http://www.industrie.gouv.fr/p3e/seminaires/automobile/cr1_mutationseco.pdf

L'industrie automobile, tant au cours de son processus de production que par ses productions elles-mêmes est concernée par la réduction des émissions de GES en général, et de CO₂ en particulier.

Si Kyoto a fixé les premières règles, la Communauté Européenne, de son côté, a formalisé les engagements pris par l'Union Européenne, dans le « Règlement (CE) N°443/2009 du parlement Européen et du Conseil » (23 avril 2009), « établissant les normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves, dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers ». Comme le souligne l'article 1, l'objectif est non seulement de réduire les émissions de CO₂ mais également de garantir le bon fonctionnement du marché intérieur et d'être en mesure d'atteindre le niveau moyen de 120 g de CO₂/km. Il est également rappelé que l'objectif applicable à partir de 2020 établit le niveau moyen d'émissions du parc de voitures neuves à 95 g de CO₂/km. Il apparaît, en conséquence que, pour atteindre cet objectif, la technologie moteurs devra être améliorée et que des technologies innovantes seront introduites (CNAM-SIA, 2008-2009). L'orientation donnée par le texte (J.O.U.E. L140) place l'ensemble du secteur au cœur de l'évolution « le présent règlement a pour but d'inciter le secteur automobile à

investir dans de nouvelles technologies. Il encourage activement l'éco-innovation et prend en compte les évolutions technologiques à venir » (JO L140 : 2).

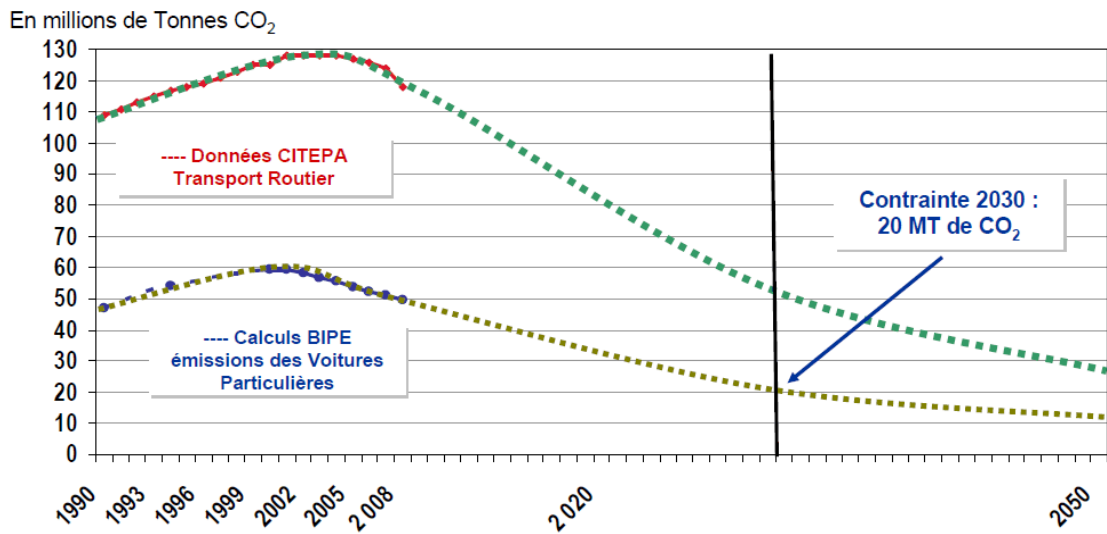
Graphique 3-3 - Contexte et objectifs envisagés pour la réduction des émissions de GES



Source : BIPE (2010)

Le Graphique 3-3 rappelle l'objectif de division par 4 (facteur 4) des émissions de GES pour l'Union Européenne en 2050, calculées par rapport à celles de 1990. Pour y parvenir, la Commission Européenne évoque qu'elle a adopté en 1995 « une stratégie commune visant à réduire les émissions de CO₂ des voitures particulières. Cette stratégie comportait trois grands piliers : les engagements volontaires des constructeurs automobiles de réduire les émissions, l'amélioration de l'information du consommateur et la promotion de voitures économes en carburant au moyen de mesures fiscales » (JO L140 : 2).

Graphique 3-4 - Courbes théoriques de l'évolution des émissions de CO₂



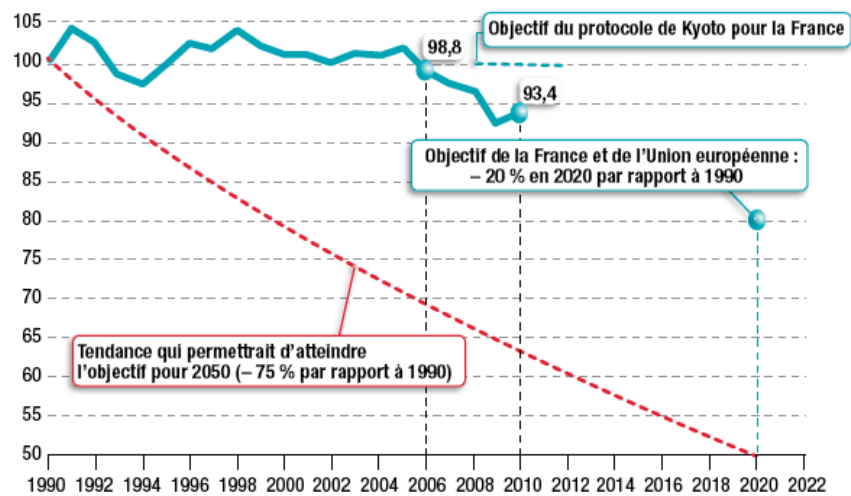
Source : CITEPA, estimations BIPE

France : 109 MT CO₂ jusqu'en 2008 et 27 MT CO₂ en 2050

La contrainte à l'horizon 2030, pour les voitures particulières est fixée à 20 MT en matière d'émissions de CO₂. Si la tendance observée (Graphique 3-4) se maintient, cet objectif devrait être atteint. À la lecture de ce graphique, il apparaît néanmoins que de gros efforts vont devoir être faits concernant le transport routier pour lequel il sera sûrement nécessaire de mettre en place des alternatives.

Le Graphique 3-5 situe la position de la France au regard des engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto et montre le chemin restant à parcourir pour atteindre les objectifs de réduction de GES à l'horizon 2020.

Graphique 3-5 - Évolution constatée des émissions de CO₂



N. B. : hors trafic international et changements d'utilisation des sols.
 Lecture : par rapport à 1990 (indice 100), le niveau total des émissions de gaz à effet de serre était à l'indice 93,4 en 2010, soit -6,6 % par rapport à 1990. Loin des objectifs souhaitables.

Source : Ministère du Développement Durable

Depuis 2006, une nouvelle information doit être communiquée par les constructeurs : outre la consommation en carburant les émissions de CO₂ doivent être indiquées sur « l'étiquette énergie »⁴³. L'objectif est d'informer les futurs clients afin qu'ils puissent faire le choix de leur véhicule de manière éclairée, en connaissant le volume de CO₂ qu'ils émettront. Il est légitime de penser qu'entre deux modèles équivalents les automobilistes opteront pour celui qui présentera le bilan environnemental le plus favorable. Selon l'ADEME, « la mention des émissions de CO₂ permet de sensibiliser les consommateurs et de les aider dans leur choix afin de les orienter prioritairement vers les voitures les moins émettrices » (ADEME, 2006). Une demande de véhicules moins polluants pourrait s'exercer sur les constructeurs et les inciter à rendre leurs motorisations plus performantes en matière de rejets. Les incitations fiscales bonus / malus, prime à l'achat constituent autant de leviers susceptibles d'orienter la demande et de peser sur les constructeurs. La prise en compte des impacts environnementaux et leur mesure est de nature à conduire (contraindre) les constructeurs à incorporer cette

⁴³ Elle indique les consommations en carburant et les émissions de CO₂ du véhicule. Elle est établie avec le guide des consommations conventionnelles et des émissions de gaz carbonique (CO₂) des voitures particulières neuves mises en vente en France, réalisé tous les ans par l'ADEME. (<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=38588&ref=16247&p1=B>)

composante et donc à « éco-innover » et à « éco-concevoir ». Le but à atteindre est de produire en ayant le plus faible impact possible sur l'environnement (air, eau, sols, ressources, etc) tout au long du cycle de vie du produit. Pour Naoun, (2011 : 11-12) « *en éco-innovation, ce qui compte vraiment est un service MAXIMUM pour des impacts MINIMUM* », ce qui peut se traduire par « *créer de la valeur tout en réduisant les impacts ... mais réduire les impacts crée de la valeur !* »

SECTION 2 UN PHENOMENE DE « LOCK-IN » JUSQU'A LA FIN DU 20E SIECLE

Remplacer un carburateur par un dispositif d'injection sur les moteurs à essence, réduire le nombre de cylindres tout en conservant la puissance grâce à l'adjonction d'un turbo compresseur, alimenter les moteurs diesel par une rampe du type « *common rail* », supprimer le plomb⁴⁴ de l'essence, améliorer les performances du gasoil, etc. ne constitue que de « *petits déplacements* » (Schumpeter, 1954). L'automobile tant sur le plan des motorisations que des carburants a certes innové, mais il s'agit principalement d'innovations incrémentales. L'automobile utilise toujours essentiellement des moteurs du type ICEV alimentés par des carburants d'origine fossile.

Le développement de l'automobile dans sa configuration actuelle ainsi que le rappellent Chanaron et Lung (1995) est dû aux « petits constructeurs ». « *C'est en Europe, et principalement sous l'influence des premiers artisans-constructeurs français, que l'automobile à pétrole, ancêtre des voitures actuelles, va se développer et s'imposer définitivement comme technique dominante, éclipsant les solutions à accumulateurs électriques et à vapeur, pourtant capables de détenir les records de vitesse jusqu'au début du siècle* » (Chanaron et Lung, 1995 : 5). À partir de ce moment, l'automobile va se développer en suivant un double sentier de dépendance, celui des motorisations utilisant le pétrole (2.1) et les carburants d'origine fossile (2.2). L'histoire et donc les décisions qui ont été prises dans le passé produisent encore leurs effets rappelant que Rosenberg avait noté cet effet. David (1988) avait pour sa part souligné que le sentier de dépendance était en économie une preuve du passé dans le futur. Cela est démontré par l'existence d'un phénomène de « lock-in » qui lie le type même des motorisations – à combustion interne, aux carburants d'origine fossile.

⁴⁴ Le plomb tétraméthyle et le plomb tétraéthyle étaient deux additifs présents dans l'essence et connus pour leur haut degré de toxicité

2.1 Motorisation : résistance de la combustion interne

Le modèle automobile dans sa configuration est-il encore viable ? Sa restructuration en profondeur pourrait-elle permettre sa survie ? Faut-il envisager une remise en cause du « *dominant design* » (Abernathy, Utterback, 1978) qui caractérise les motorisations thermiques, favorise le diesel et régit l'automobile ? Sur quels axes peut-il se développer pour assurer le développement de cette industrie ? L'un d'entre eux concerne les motorisations car elles constituent l'une des premières sources d'émissions de CO₂ et de gaz à effet de serre, mais pas uniquement. En effet, il semble que l'allègement de l'ensemble du véhicule, tout en maintenant son niveau de sécurité, soit un point crucial pour réduire la consommation des véhicules. « *Un effort particulier doit être fait pour le développement de nouvelles motorisations décarbonées et la mise au point de matériaux composites permettant de renforcer la fiabilité et la sécurité des véhicules* » (Montebourg, Sapin, 2012 : 4).

La nécessité, pour les constructeurs, d'optimiser le rendement des moteurs tout en réduisant la consommation a abouti à l'abandon des carburateurs pour les remplacer par des systèmes d'injection électronique. L'injection du carburant, gérée par un calculateur prenant en compte de multiples paramètres tels que la température de l'air et du moteur, etc. permettait d'améliorer non seulement la quantité et le temps d'injection du carburant dans les cylindres et donc de réduire le volume de carburant utilisé mais également de limiter les émissions de GES. La généralisation de l'injection électronique au détriment des carburateurs illustre ainsi le processus de destruction créatrice conceptualisé par Schumpeter.

L'exemple en matière d'optimisation est donné par Peugeot qui bien que sa présentation soit prévue pour le Salon de Francfort 2013 (10 au 22 septembre) a révélé les principales caractéristiques de la nouvelle 308 dont la commercialisation, selon le constructeur devrait intervenir au courant de l'automne. Cette nouvelle version de la 308 fait appel à plusieurs innovations. Tout d'abord, « elle intègre la nouvelle plateforme du groupe PSA baptisée EMP2 pour « *Efficient Modular Platform 2* » qui associe nouveaux process de mise en forme et d'assemblage, utilisation de matériaux allégés (aluminium, acier, etc.), nouvelles technologies ou encore modules déclinables et downsizés » (Binois, autoactu.com, 15/05/2013). L'intérêt de cette innovation est double : d'une part elle permettra selon le constructeur de partager 50% des composants

contre 25% à l'heure actuelle, ce qui par un « effet volume » fera baisser les coûts et d'autre part permettra un allègement par rapport à la gamme actuelle de 80 kg en moyenne pouvant aller jusqu'à 140 kg sur certains modèles. PSA annonce grâce à cette nouvelle plateforme une « *baisse moyenne de 22% des émissions de CO₂ et une baisse du coût moyen d'utilisation moyen de 15%* ». La réduction des émissions de GES et plus particulièrement de CO₂ implique entre autres de réduire le poids des véhicules. La R&D conduite dans cet objectif amènera à n'en pas douter, outre l'utilisation de nouveaux matériaux, à des innovations. L'introduction des « composites » dans les carrosseries constitue déjà une rupture par rapport à la construction traditionnelle des carrosseries longtemps fabriquées à partir d'acier.

Pierre Beuzit⁴⁵ (CNAM-SIA, 2008) soulignait que l'identification de rendements « *du puits à la route* » mauvais ou médiocres (inférieurs à 20%) conduisent dans un premier temps, à s'interroger sur les voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des voitures, à carburant inchangé. Dans un second temps, il s'agit de réfléchir à l'utilisation de la biomasse dans la production des « *biocarburants* » de 2^{ème} génération.

2.1.1 Les voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs

Concernant les motorisations thermiques (essence ou diesel) Michel Forissier⁴⁶ rappelle qu'en raison des multiples développements et améliorations déjà apportés, l'opinion générale considère que seules de faibles avancées sont encore possibles. « *En fait, le groupe motopropulseur (GMP) a encore paradoxalement un énorme potentiel d'optimisation, ce qui en fait la voie privilégiée et prioritaire d'une amélioration rapide des émissions de CO₂ des véhicules. Sous la pression des réglementations en projet limitant les émissions de CO₂ des véhicules, une dynamique intense d'optimisation s'est mise en place, ouvrant le champ à de multiples solutions. Le GMP du futur proche sera une subtile combinaison de moteur thermique, d'utilisation de biocarburant, d'une dose d'hybridation, d'un management énergétique efficace, de mécatronique et de boîtes de vitesses optimisées* » (CNAM/SIA, 2009). Ainsi que le souligne Forissier, les constructeurs ont été amenés à réagir et à anticiper le durcissement des normes en matière d'émissions de GES et plus particulièrement de CO₂. Une telle approche ne

⁴⁵ Ancien Directeur de la Recherche Renault, Président d'Alphéa Hydrogène

⁴⁶ Directeur du domaine « Powertrain Efficiency » Valeo

conduirait pas à la création de nouveaux marchés. En effet, il s'agit de technologies d'amélioration continue et d'incrémentes, non de rupture.

Aujourd'hui, une innovation qui fut en son temps qualifiée de rupture a acquis le statut d'éco-innovation dans la mesure où elle participe entre autres à la réduction des émissions de CO₂, le turbocompresseur également appelé « turbo ». Sans pour autant approfondir le fonctionnement de ce système qui relève des sciences de l'ingénieur, il convient néanmoins d'en expliciter le fonctionnement.

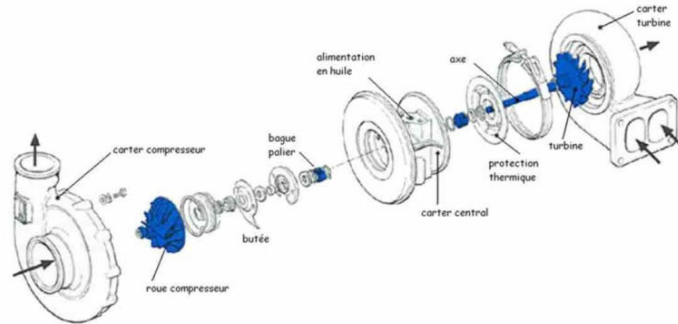
Le « turbo » est issu de l'aéronautique. Pendant la seconde guerre mondiale, il permit aux avions, par une admission forcée de voler à haute altitude. Le turbo fut utilisé dans l'automobile en 1977 par Porsche. Le modèle 911 doté d'un moteur de 3.0 litres développait 250 chevaux⁴⁷. Par comparaison, la Carrera 3.0 de 1978 n'atteignait que 204 chevaux. De même, la Porsche 924, avec un moteur de 2.0 litres développait 125CV. Dans sa version turbo, la puissance passait à 170 CV, soit un gain de 36%. L'impact du turbo est encore plus significatif puisque certains moteurs de Formule 1, d'une cylindrée de 1,5 litre pouvaient atteindre les 1 500 chevaux. Le principal défaut sur la « 911 turbo » était la violence de l'accélération lors du déclenchement du turbo, ce qui nécessitait des compétences en matière de pilotage. Ce problème sera en partie gommé sur la Porsche 911 turbo 3.3 litres – type 930 (300 chevaux) de 1978. De nombreux constructeurs adopteront cette technologie (Renault R5 turbo, R5GT turbo, Lancia Delta, Audi Quattro, etc.).

L'intérêt de cette innovation de rupture dans l'automobile était d'augmenter considérablement la puissance du véhicule tout en réduisant comparativement la consommation par l'utilisation des gaz d'échappement. En effet, comme le montre la Figure 3-2, la turbine du compresseur est uniquement entraînée par les gaz d'échappement ce qui ne génère pas de consommation de puissance sur le moteur. Le principe de fonctionnement d'un turbocompresseur est d'augmenter la pression du mélange air/carburant lors de la phase d'admission et donc d'obtenir un meilleur remplissage des cylindres, ce qui a pour effet d'augmenter la puissance du moteur et de diminuer parallèlement la consommation. Ainsi, à cylindrée égale, il était possible de disposer de moteurs développant la même puissance que des motorisations plus

⁴⁷ Les données relatives à la cylindrée et à la puissance des différents modèles PORSCHE sont issues du manuel constructeur.

importantes, plus « gourmandes » en termes de consommation de carburant et souffrant de « pertes mécaniques » liées aux « grosses cylindrées ».

Figure 3-2 - Vue « éclatée » d'un turbocompresseur



Source : <http://moteurpassion.site.voila.fr/turbo.htm>

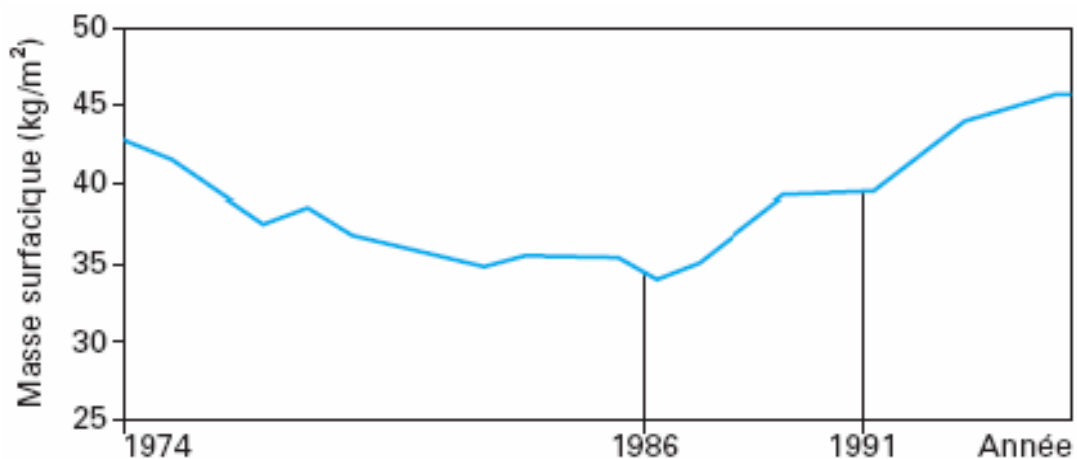
Depuis les premiers « turbos » la technique a évolué, réduisant le temps de réponse et apportant une plus grande souplesse d'utilisation. Aujourd'hui, le turbo est couramment utilisé et constitue un élément incontournable dans le cadre de la technologie des moteurs « à forte puissance spécifique » (« downsizing »). Il permet d'utiliser des moteurs plus petits, de plus faible cylindrée tout en disposant d'une puissance équivalente. Le « downsizing » peut être associé au « downspeeding » qui « consiste à abaisser le régime moteur afin de réduire les frictions et d'économiser du carburant, sans perdre au niveau des performances. L'objectif est d'apporter un maximum de couple à bas régime et d'optimiser la combustion » (CCFA, <http://www.ccfa.fr/Downspeeding>). Dans sa dernière version, le turbo n'utilise plus les gaz d'échappement mais est électrique, ce qui permet une « suralimentation » continue et par conséquent un gain de puissance constant quel que soit le régime du moteur.

L'intérêt d'une telle technologie réside d'une part dans la diminution des émissions polluantes et d'autre part la consommation de matières premières primaires ou secondaires (c'est-à-dire issues du recyclage). Ce principe est illustré par la Fiat 500 qui bien qu'équipée d'un moteur bicylindre de 1.2 litres (« twinair ») atteint une puissance de 69 chevaux grâce au turbo, selon les données du constructeur. A la rubrique écologie / « twinair », Fiat annonce un taux d'émissions de CO₂ de 92g/km et une consommation réduite d'au moins 30% et souligne « ce résultat incroyable vient couronner les efforts de Fiat en matière d'innovation éco-compatible et durable ».

Mazda, pour sa part a rompu avec les habitudes des motoristes pour qui un moteur essence doit avoir un taux de compression relativement bas et un moteur diesel doit afficher un taux de compression élevé. Selon le constructeur, « *le moteur essence 2.0L SKYACTIV-G, développant une puissance maximum de 165 CH, est un moteur à injection directe performant. Sa consommation de carburant est incroyablement basse et son taux de compression record de 14:1, le plus élevé pour un moteur essence produit en série, est la preuve d'un excellent rendement énergétique favorisé par une combustion interne idéale*⁴⁸ »

Malgré ces nombreuses évolutions, comme le souligne Martial Durget⁴⁹, « *une optimisation du moteur thermique seul, sans changement significatif sur la chaîne de transmission, les accessoires ou le véhicule lui-même ne pourra conduire aux plus basses émissions de CO₂* » (CNAM, SIA, IFP, 30/03/2010). En mentionnant les accessoires et le véhicule lui-même, Durget rejoint le constat fait par Gruson⁵⁰ qui notait un accroissement du poids des véhicules (Graphique 3-6) du fait de réglementations de plus en plus sévères en matière de sécurité tant active que passive et conduisait à des « *contraintes contradictoires* » : diminuer la consommation malgré l’augmentation de la masse.

Graphique 3-6 - Évolution de la masse surfacique des véhicules



Source : IFP Energies nouvelles (2013)

⁴⁸ <http://www.mazda.fr/showroom/mazda6/driving-performance/>

⁴⁹ Expert moteur chez AVL / LMM

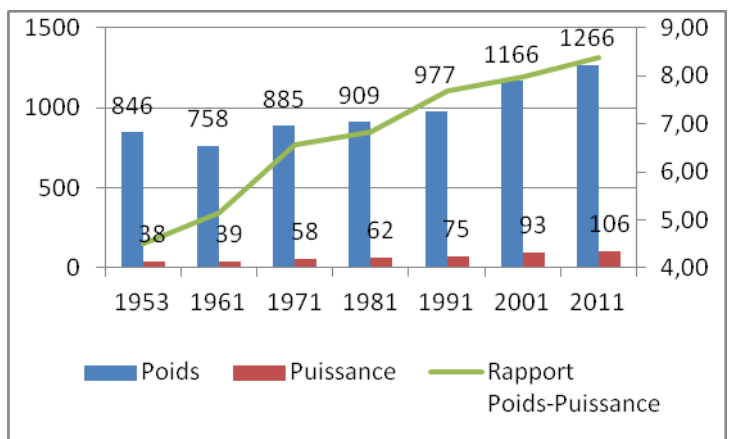
⁵⁰ Jean –François Gruson est rattaché à la Direction Economie et Veille à « ifp énergies nouvelles »

Cette contrainte pourrait être dépassée par l'utilisation de matériaux plus légers mais présentant des caractéristiques comparables en matière de sécurité, tels l'aluminium ou les composites. En effet, selon Nicolas Meilhan⁵¹(2013), « *l'amélioration de l'efficacité des véhicules par le rendement des motorisations atteint ses limites et seule une baisse de poids drastique peut apporter les améliorations nécessaires pour atteindre les objectifs de consommation et de réduction des émissions de CO₂* »..

Comme il est possible de le remarquer sur le Graphique 3-7, entre 1951 et 2011, le poids des véhicules a augmenté de presque 50%, avec une masse supplémentaire de 420 kg. Dans le même temps, la puissance des motorisations a quasiment triplé (+ 178%) alors que le rapport poids puissance n'a évolué que de 42%. Le poids des voitures apparaît clairement comme un facteur clé dans la réduction des émissions de GES.

Graphique 3-7 - Évolution de la puissance, du poids du véhicule particulier

Année	Poids	Puissance	Rapport Poids-Puissance
1953	846	38	4,49
1961	758	39	5,15
1971	885	58	6,55
1981	909	62	6,82
1991	977	75	7,68
2001	1166	93	7,98
2011	1266	106	8,37



Source : Réalisé par l'auteur d'après les données de l'Argus de l'Automobile, 2012

⁵¹ Consultant senior chez Frost & Sullivan, spécialiste « transport et énergies »

2.1.2 La réduction du poids des voitures

L'une des voies à étudier selon Meilhan serait de réduire le poids de la voiture du futur à 600kg. Un tel objectif semble réalisable dans la mesure où il s'agirait de véhicules à usage urbain n'utilisant pas de carburants d'origine fossile. En effet, Peugeot avec son concept car électrique « BB1 » conçu en 2009, offrait 4 places pour une autonomie de 120 km, une vitesse ne dépassant pas 90 km/h et un poids de 600 kg dont 150 kg de batteries.

Au Japon les « *Kei cars* » (keijidōsha -軽自動車) ou « *light cars* » ont représenté 40% des voitures vendues en 2012, soit 2 millions d'unités. Il s'agit de mini voitures dont la longueur n'excède pas 3,50m pour une cylindrée maximum de 600cm³ et 63CV. Il convient de noter que ces modèles ont eu lors de leur introduction sur le marché un effet positif sur l'industrie nipponne. « *Arrivées dans les années 1950, ces voitures ont offert aux Japonais une grande autonomie et permis aux entreprises de s'agrandir tout en stimulant le secteur automobile alors en berne* » (CCFA, 27/02/2012). Elles constituent une catégorie distincte au sein des différents segments automobiles. Un des modèles les plus connus en Europe bien qu'il n'ait pas été commercialisé sous l'appellation « *kei car* » est la Suzuki Wagon R. Les « *kei cars* » également appelées « *midgets* » sont des voitures à part entière sans rapport avec les voiturettes (Microcar, Ligier, etc.) lesquelles peuvent être utilisées sans être titulaire du permis de conduire. « *Les mini-véhicules, qui représentent un tiers des ventes au Japon, résistent par ailleurs un peu mieux à la crise que les autres catégories* » (CCFA, 27/02/2012⁵²). Plus récemment, Mitsubishi avec son modèle « *i* » lancé en 2006 au Japon (connue sous l'appellation i-MiEV⁵³ pour la version électrique) a combiné « *kei car* » et « *downsizing* ». Un nouveau marché est en train de s'ouvrir pour les « *kei cars* », celui de la voiture électrique. Selon Vijayendra R. Rao⁵⁴ les principaux constructeurs de « *kei cars* » tels que Suzuki, Daihatsu ou Mitsubishi avaient déjà entrepris le développement de ces nouveaux modèles et entamé les phases de test. Il semblerait que les bons résultats enregistrés par la Mitsubishi i-MiEV soient prometteurs. « *En Europe (en 2011), Mitsubishi est largement en tête. La firme détaille ses chiffres : 4 000 ventes au Japon, 5 800 en Europe. La i-MiEV est*

⁵² <http://www.ccfa.fr/Les-mini-vehicules-de-660-cm3-une>

⁵³ Mitsubishi innovative Electric Vehicle

⁵⁴ Directeur de la recherche « Automotive & Transportation Practice, Asia Pacific » chez Fros & Sullivan

vendue dans 15 pays européens, en plus des versions Peugeot et Citroën » (<http://www.automobile-propre.com/2011/06/20/ventes-voitures-electriques-monde/>).

Les constructeurs automobiles se trouvent ici face à une triple rupture. La première concerne la conception même des véhicules et donc celle de la « plateforme » ? En effet, mis à part des véhicules tels que la Renault Twingo, la Toyota Aygo et ses déclinaisons 107 chez Peugeot, C1 chez Citroën, etc., la plupart des modèles dépassent les 3,53 m requis pour bénéficier de l'appellation « *kei cars* ». La seconde remet en cause la cylindrée des moteurs car rares sont ceux qui ne dépassent pas les 600 cm³ prescrits. La troisième rupture et la plus importante, est l'introduction de motorisations électriques sur ces modèles.

Les enjeux sont importants comme le note Mr Rao, « *the Kei Car market in Japan has reached the maturity stage of the development graph as nearly one-third of all the new cars sold in Japan are Kei Cars. More than 50 per cent of the cars on Japan's roads are Kei Cars* » (Frost & Sullivan, 2013). *Le Japon a déjà largement adopté ces voitures. Leur adoption en Europe pourrait correspondre à un besoin tant en matière de taille de véhicule que de prix tout en ayant un impact positif sur l'environnement en raison d'émissions de GES réduites.* Les motorisations électriques sont également un facteur qui devra être pris en compte.

2.2 Carburants : le lock-in de la motorisation

L'automobile a bâti son développement sur une ressource devenue facilement exploitable puis facilement transportable, l'essence qui fut dans les premiers temps vendue chez les pharmaciens. L'apparition des pompes à essence due au norvégien John J. Tockeim qui déposera le premier brevet en 1901 (Coulibaly, 2007 : 20), rendra l'approvisionnement des voitures de plus en plus facile, au fur et à mesure de leur dissémination sur le territoire. Les usines ont dû à leur tour faire face à un accroissement de la demande en adaptant les modes de production et en les faisant évoluer de l'organisation Scientifique du Travail (OST) (taylorisme, sloanisme, fordisme) vers les Nouvelles Formes d'Organisation du Travail (NFOT) (toyotisme). Néanmoins, la raréfaction, si ce n'est la disparition annoncée du carburant qui a permis son expansion est de nature à remettre en cause le devenir de l'automobile, du moins dans sa configuration actuelle (2.1). L'automobile est confrontée à une conjoncture économique difficile depuis que la crise américaine des « *subprime* » de 2007 s'est

étendue à l'économie mondiale, et aux problèmes de surcapacités. Auditionnés par le Sénat le 7 février 2013, Denis Martin, directeur industriel de PSA a déclaré « *je ne veux pas fermer d'usine, mais quand il n'y a pas de clients, les usines ne peuvent pas tourner* » et Carlos Tavares, directeur général de Renault a reconnu qu'« *il existe en Europe entre 3 et 11 millions de surcapacité de production de véhicules, selon les calculs* ». Le durcissement des normes souligne la nécessité de s'adapter pour satisfaire aux normes de réduction des émissions de CO₂, et introduit une pression réglementaire sur les constructeurs. De plus, la récente découverte du caractère cancérigène des microparticules émises par les véhicules diesel, en conduisant le gouvernement à revoir sa position sur ces motorisations, a généré des inquiétudes chez les constructeurs. Il convient de souligner ici que quels que soient les carburants utilisés, essence, gasoil ou biocarburants, à des degrés divers ils sont à l'origine d'émissions de CO₂, de GES, et constituent une source de pollutions diverses.

2.2.1 La « diésélisation » du parc automobile

Dans un souci de clarté, le terme « diesel » sera utilisé pour désigner les motorisations et « gasoil » en ce qui concerne le carburant.

L'origine du développement des moteurs diesel peut être située au cours des années 1960. La France, sous l'impulsion du Général de Gaulle visait l'indépendance énergétique vis-à-vis des pays producteurs de pétrole. C'est dans le cadre de cette politique que les anciennes centrales électriques fonctionnant au gasoil allaient être fermées et remplacées par des centrales nucléaires. À cette époque, la France était productrice de gasoil au travers de ses activités de raffinage et les principaux utilisateurs étaient les matériels agricoles et les camions. Il fallait donc trouver un nouveau débouché à cette production devenue « inutile ».

Les constructeurs automobiles profiteront de cette « niche » pour développer de nouvelles motorisations destinées aux voitures particulières. Les taxis adopteront très rapidement les motorisations fonctionnant au gasoil en raison non seulement du faible coût du carburant mais également compte tenu de la longévité des moteurs, ces deux facteurs compensant le prix plus élevé des véhicules diesel. Jacques Calvet, ancien conseiller du Président de la République Valéry Giscard d'Estaing, devenu le dirigeant

de PSA obtiendra en 1977 que les motorisations diesel se voient délivrer la « *pastille verte* »⁵⁵ qui identifiait les véhicules écologiques. À l'époque déjà, la référence prise en compte était le taux d'émission de CO₂. Une telle mesure associée à une fiscalité avantageuse en faveur du diesel⁵⁶ a eu pour effet la « diésélisation » du parc automobile.

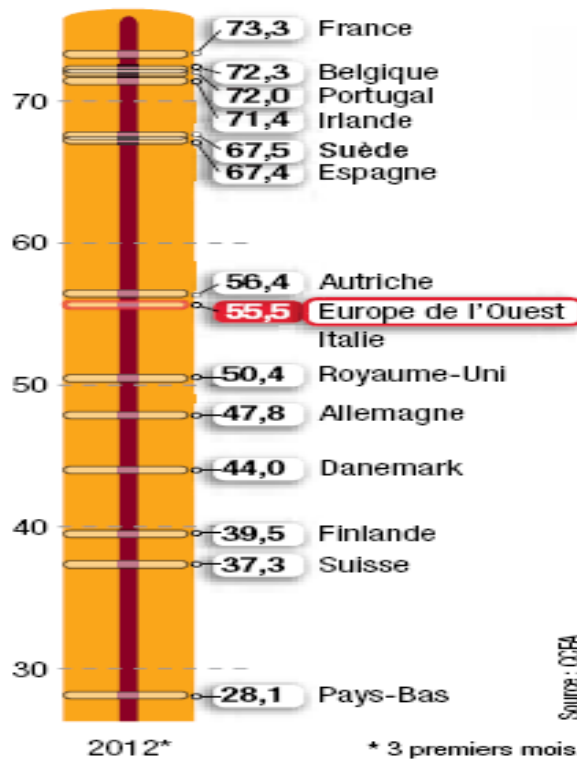
Bien que la nocivité des émissions des moteurs diesel ait été démontrée par l'OMS (2012), les constructeurs automobiles français continuent de défendre cette technologie. En effet, PSA, par exemple a déclaré que les microparticules seraient le fait des anciennes motorisations et non des véhicules équipés de filtres à particules. Malgré la position des constructeurs, le gouvernement français a déclaré réfléchir « *sur une évolution à la hausse de la taxation du gasoil* ». Le moteur diesel est souvent considéré comme une spécificité française. En effet, si certains pays comme la France ou la Belgique (Figure 3-3) ont un marché « diesel » développé, d'autres pays comme la Suisse et le Japon ont interdit ce type de motorisation. En Grèce, plus particulièrement à Athènes le diesel est interdit (WWF, 2011) en raison des pollutions qu'il génère (NOx, fumées noires, etc.) et dans un but de préservation du patrimoine historique (présence de nombreux sites).

Le CCFA notait qu'au cours de l'année 2011, plus de 70% des véhicules vendus en France étaient des diesels. Ce taux atteignait 83,5% « *sur les premiers mois de 2012* » pour se stabiliser à 73,3% pour le premier trimestre (Figure 3-3), soit le plus fort taux de diésélisation d'Europe. Il semble nécessaire de souligner que c'est encore une fois le taux d'émission de CO₂ qui a été pris en compte par le gouvernement français en 2008 lors de la mise en place du bonus/malus à l'exclusion de tout autre GES.

⁵⁵ Annexe II de la circulaire du 17 août 1998 relative à la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie

⁵⁶ La Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers (TIPP) aujourd'hui dénommée Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) avantage le diesel par rapport à l'essence. En mars 2013 (Carbeo.fr), les taxes sur le diesel représentaient approximativement 96% du prix HT et 133% pour l'essence.

Figure 3-3 - Part de marché du diesel dans les immatriculations de nouvelles voitures particulières 1er trimestre 2012, en %

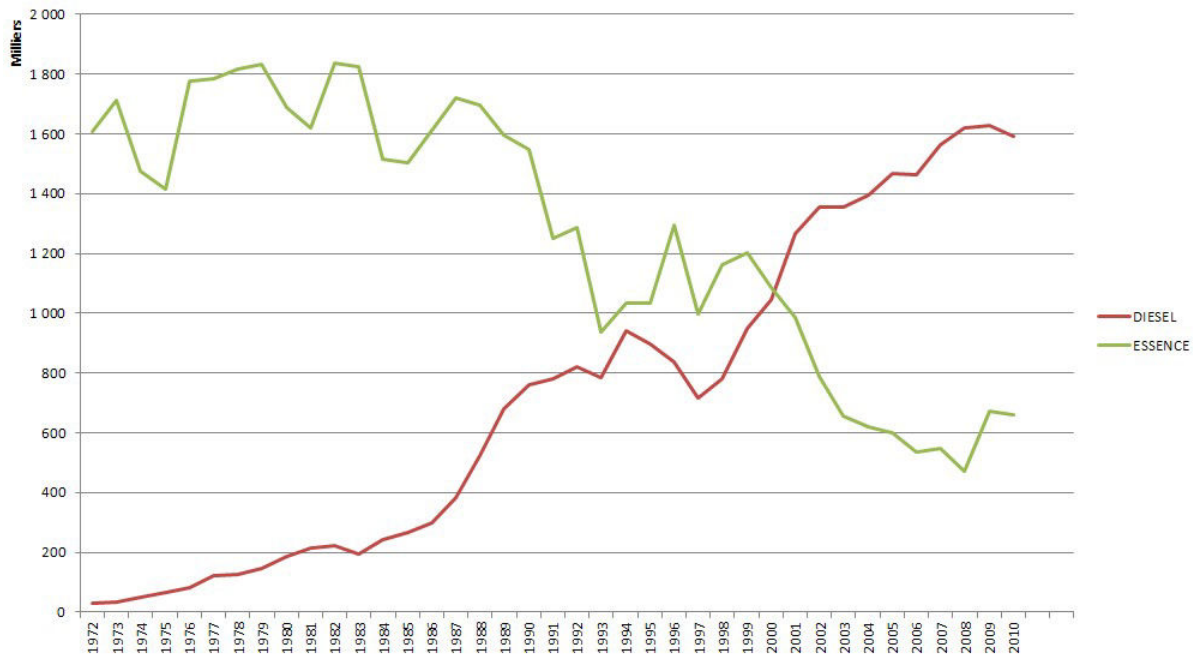


Source : CCFA, 2012

Comme le rappelle Porcher⁵⁷ (2012) « dans les années 60, la baisse de la taxation sur le diesel vient d'un consensus entre les politiques, les pétroliers et l'industrie automobile ». La question de la fiscalité du gasoil est aujourd'hui posée. Louis Gallois, commissaire à l'investissement a estimé dans son rapport (2012) que « le problème en France, c'est le diesel », et il faut « savoir si nous continuons à avoir un diesel qui bénéficie des avantages fiscaux dont il bénéficie actuellement ». La question est d'autant plus cruciale en matière de recettes fiscales que depuis 2001, les immatriculations de véhicules diesel sont devenues supérieures au nombre de véhicules essence (données CCFA). Le Graphique 3-8 montre clairement l'inversion qui s'est produite et la constante augmentation des immatriculations de véhicules particuliers diesel.

⁵⁷ Thomas Porcher est Docteur en économie, professeur en marché des matières premières à l'ESG-MS et chargé de cours à l'université Paris-Descartes. <http://www.atlantico.fr/decryptage/diesel-t-ete-erreur-strategique-majeure-pour-economie-francaise-thomas-porcher-538587.html>

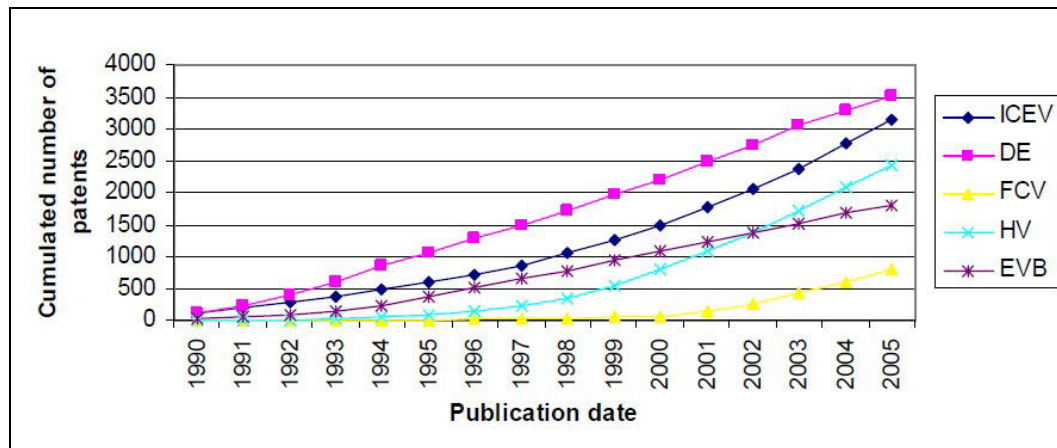
Graphique 3-8 - Évolution des immatriculations de voitures particulières essence et diesel entre 1972 et 2010



Source : Réalisé par l'auteur à partir des données du CCFA

Le moteur diesel a fait l'objet de constantes innovations sur la période 1990-2005. Alors que le nombre de brevets déposés au titre du moteur à combustion interne (ICEV) affiche un léger fléchissement, la progression sur cette période est constante pour le diesel (diesel engine - DE), passant de quasiment zéro à plus de 3 500 en quinze ans (Graphique 3-9).

Graphique 3-9 - Évolution du nombre de brevets déposés par l'échantillon de constructeurs automobiles 1990/2005



Source : Oltra, Saint Jean, 2006 :14

Légende

- ICEV Internal Combustion Engine Vehicle
- DE Diesel Engine
- FCV Fuel Cell Vehicle
- HV Hybrid Vehicle
- EVB Electric Vehicle - batteries

En 2014, la norme européenne relative aux pollutions (Euro 6) entrera en vigueur et imposera de ramener les émissions d'oxyde d'azote (NOx) de 180mg/km à 80mg/km. Tous les moteurs à combustion interne sont concernés et plus particulièrement les moteurs diesel (AFSSET, 2009). Cette mesure est d'autant plus importante que les NOx, outre des « *troubles respiratoires sérieux* » (Bisson et al., 2011), sont à l'origine de pluies acides. Le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NOx) participent au phénomène d'acidification. « *Ils sont émis par les centrales thermiques, les transports et diverses autres industries. Au contact de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ces gaz peuvent se transformer en acides : acide sulfurique pour le dioxyde de soufre et acide nitrique pour les oxydes d'azote. Une fois formés, ces acides sont transportés par le vent. Lorsqu'ils rencontrent de la pluie, de la neige ou de la grêle, ils forment des précipitations appelées ' pluies acides' » (Renault⁵⁸, avril 2013).*

⁵⁸ <http://www.renault.com/fr/groupe/developpement-durable/environnement/pages/acidification.aspx>

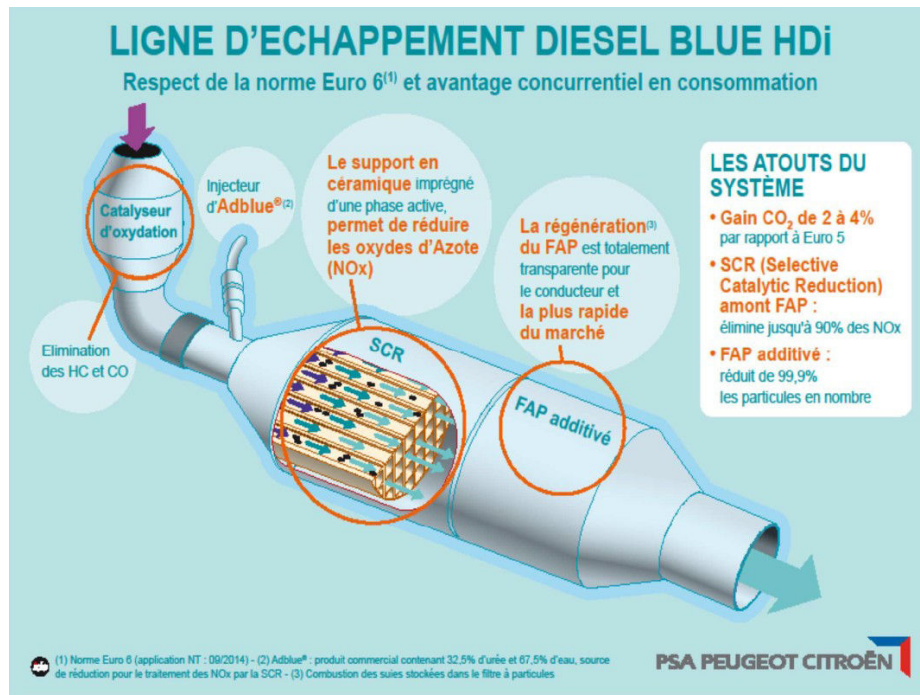
Pour les constructeurs, installer un dispositif qui filtrerait le dioxyde d'azote (NO₂) est certes possible mais engendrerait un coût d'environ 2 000 euros, trop élevé pour la clientèle. Il semblerait néanmoins que ce problème soit en voie de résolution. En effet, Christian Chapelle⁵⁹ du groupe PSA indique que la ligne « *Blue HDi* » (Figure 3-4) sera introduite sur l'ensemble des nouveaux moteurs Diesel dès l'automne (autoactu.com, 18/04/2013). Autoactu.com, site spécialisé dans l'information automobile professionnelle, rapporte que « *PSA installera dès l'automne sur ses véhicules Diesel son système de réduction catalytique sélective (SCR⁶⁰) des NOx pour répondre aux futures normes Euro 6. Le constructeur inaugurerait alors une nouvelle architecture permettant de réduire les NOx tout en réduisant la consommation du véhicule et par conséquent, ses émissions de CO₂* » (autoactu.com, 18/04/2013). « *Nous avons choisi de généraliser cette technologie très rapidement pour bénéficier d'un effet volume qui nous permet d'être compétitif* », conclut Chapelle qui en considérant les économies d'échelle pouvant être réalisées envisage « *une différence de prix de revient d'une centaine d'euros seulement (par rapport aux lignes d'échappement actuelles)* ».

L'obstacle constitué par un surcoût initialement jugé « *insupportable* » par la clientèle est ainsi levé. La technologie développée par le constructeur relève des technologies « *end of pipe* » dans la mesure où elle traite les rejets au moment de leur émission. La ligne d'échappement « *Blue HDi* » se différenciera des procédés « classiques » par son architecture dans la mesure où le SCR sera placé avant le filtre à particules (FAP) et non après. « Dans le cas de PSA, le FAP fait son travail 'en bout de chaîne' et la combustion en amont est optimisée pour réduire la consommation ». Il est fort probable que cette innovation apparaisse dans des informations comparatives destinées aux clients et qui constituera un avantage comparatif pour le constructeur dans la mesure où les gains environnementaux seront quantifiables.

⁵⁹ Directeur des chaînes de traction et châssis du groupe PSA

⁶⁰ Selective Catalytic Reduction

Figure 3-4 - Nouvelle ligne d'échappement pour les véhicules diesel développée par PSA afin de satisfaire à la Norme Euro 6



Source : PSA Peugeot Citroën (<http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/au-coeur-de-l-environnement-industriel/innovation-et-rd/technologie-scr-une-solution-inedite-pour-traiter-les-emissions-d-oxides-d-azote-des-vehicules-diesel-psa-peugeot-citroen-article>)

Alors que le général de Gaulle visait l'indépendance énergétique vis-à-vis des pays producteurs de pétrole, aujourd'hui la France est confrontée à une nouvelle dépendance en important 30% du gazole consommé de Russie. Selon la Direction Générale des Douanes, pour l'année 2010 les importations de diesel ont représenté quelques 9 milliards d'euros alors que seulement 2 milliards d'euros d'essence ont été exportés. En 2011, le coût des importations de gazole s'est élevé à 13 milliards d'euros. Ce déficit n'impacte pas uniquement l'indépendance énergétique du pays mais également la « facture énergétique ». En effet, l'Agence France Presse (AFP) dans un communiqué du 1^{er} mars 2013 faisant état d'un référé rendu public notait : « *la Cour des comptes pointe 'la perte de recettes fiscales' de près de 7 milliards d'euros en 2011, liée aux avantages fiscaux dont bénéficie le diesel* ». Selon le ministre, les moteurs diesel actuels seraient inoffensifs, le problème venant du parc ancien (8 ans et plus).

En visite au Salon de Genève, le ministre du Redressement Productif a annoncé qu'en 2013, il n'y aurait ni réforme de la fiscalité du diesel ni prime de conversion pour les diesel anciens qui serait en fait une prime à la casse destinée à éliminer les véhicules les

plus anciens. Pour le ministre, les moteurs diesel actuels seraient inoffensifs, le problème venant du parc ancien (8 ans et plus).

2.2.2 Les carburants alternatifs : une éco-innovation incrémentale

L'utilisation de la biomasse dans la production de biocarburants est une des voies envisagées pour la production de carburants pouvant être utilisés en complément ou substitués aux carburants d'origine fossile. Leur utilisation dans les moteurs à combustion interne malgré les faibles émissions de GES lors de leur combustion (réduction de 50 à 73% selon PROLEA) conduit néanmoins à les considérer comme une éco-innovation incrémentale.

La filière des huiles et protéines végétales françaises définit la biomasse comme « *l'ensemble des matières organiques (produits, déchets et résidus) issues de l'agriculture, de la sylviculture, de l'aquaculture et de la pêche* » (Livre Blanc) et un biocarburant en tant que « *combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport et produits à partir de la biomasse. Ce terme renvoie principalement aux carburants issus de la production agricole. Depuis peu, certains biocarburants sont issus de déchets organiques d'origine animale ou d'huiles usagées* ».

Cette option permet de valoriser des ressources sans pour autant être confronté à un arbitrage dans l'utilisation des terres agricoles et leur changement d'affectation. Les filières des biocarburants se trouvent ainsi à l'intersection de l'agriculture et de l'énergie, de l'industrie et de la recherche. Selon l'ADEME (2010), « *l'analyse du cycle de vie confirme la bonne performance des biocarburants français : de 50 à 70% de réduction des gaz à effet de serre* », en fonction des matières premières utilisées. La Directive européenne relative aux énergies renouvelables reconnaît par ailleurs, l'effet positif induit par l'utilisation de biocarburants sur les émissions de gaz à effet de serre.

En matière de biocarburants, PROLEA est « *la plateforme de communication de la filière des huiles et protéines végétales françaises. Elle est structurée autour de cinq organismes complémentaires : la FOP⁶¹, l'ONIDOL⁶², le CETIOM⁶³, l'UNIP⁶⁴ et*

⁶¹ Fédération Française des Producteurs d'Oléagineux et de Protéagineux

⁶² Organisation Nationale Interprofessionnelle des Graines et Fruits Oléagineux

⁶³ Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du chanvre

⁶⁴ Union Nationale Interprofessionnelle des Plantes Riches en Protéines

*SOFIPROTEOL*⁶⁵ » (PROLEA, <http://www.prolea.com/index.php?id=1235>). « *En 2010, les biocarburants français ont permis d'éviter l'émission d'environ 6 millions de tonnes d'équivalent CO2* » (Proléa, 2011).

L'intérêt premier des biocarburants est qu'ils peuvent être substitués en tout ou partie, aux carburants fossiles. Ils ont de plus la particularité d'être produits à partir de ressources renouvelables et donc de ne pas puiser dans les ressources naturelles. Les principaux désaccords sur l'utilisation des agrocarburants de première génération sont d'une part la question du « *changement d'affectation des sols indirect* » (CASI) et d'autre part les importations de colza et d'huile de palme qui mettent l'Union Européenne en position d'importateur net de ces matières premières. La CASI concerne des cas de déforestation ou de conversion de zones qui constituent d'importants puits de carbone. Une autre question est également soulevée, « *manger ou conduire* » (actu-environnement.com, 22/04/2013) par l'utilisation de surfaces généralement dédiées à l'alimentation humaine et reconverties pour des productions destinées à la fabrication d'agrocarburants.

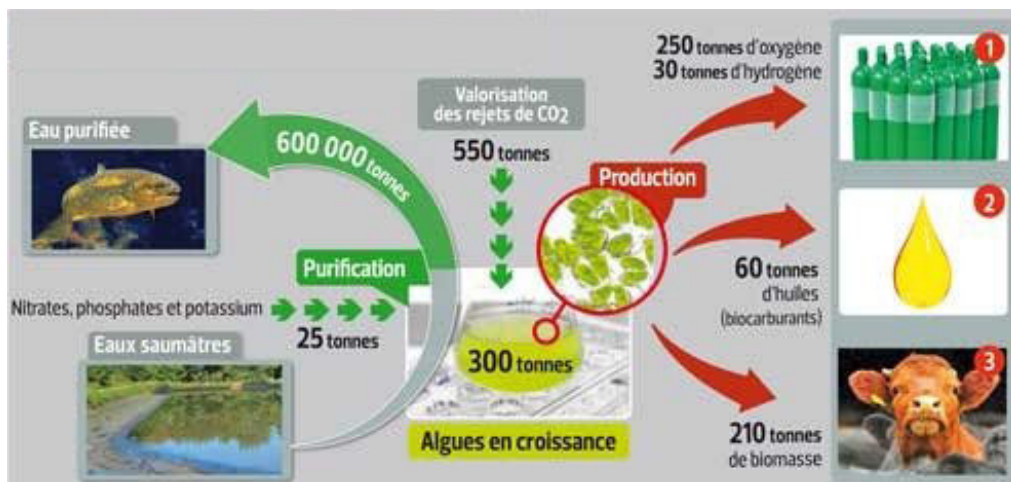
Selon Miranda et al. (2011) le développement des biocarburants a été la manifestation la plus visible de la controverse née de production d'énergie à partir de la biomasse. Le choix fait par l'Union Européenne trouverait sa justification d'une part dans le caractère renouvelable des ressources mobilisées et, d'autre part dans les gains réalisés en matière d'émissions de CO². Miranda et al. notaient que « *les inquiétudes sur l'efficacité des politiques actuelles en matière de biocarburants aux Etats-Unis et dans l'Union Européenne peut faire douter de leur pérennité* » (Miranda et al., 2011 : 11). En effet, le réseau de distribution selon le Syndicat national des producteurs d'alcool agricole (SPAA) (2012) est de seulement 297 pompes (contre près de 2000 pour le GPL). « *Le super éthanol n'a jamais pu décoller. L'objectif minimum fixé pour fin 2008 n'est rempli qu'à 25%* », reconnaît le Syndicat national des producteurs d'alcool agricole (2012). Les véhicules utilisant uniquement les biocarburants n'ont pas non plus rencontré le succès escompté.

⁶⁵ Acteur financier et industriel de la filière française des huiles et protéines végétales

La Commission Européenne (actu-environnement.com, 22/04/2013) « a proposé de limiter le taux d'incorporation des agrocarburants en Europe ». Les agrocarburants font partie de la famille des biocarburants

Une nouvelle voie a été ouverte par les chercheurs qui ont montré qu'à partir des micro-algues, il était possible de produire non seulement du « pétrole vert » mais également de purifier des eaux usées et des bassins d'eau saumâtre. « Les futures taxes sur le CO₂ favoriseront sans aucun doute le développement de l'industrie des micro-algues. Mais les multiples possibilités d'exploitation qu'elles offrent les placent au-delà du strict cadre écologique » (Doucet⁶⁶, 2012). En effet, comme le montre la Figure 3-5, les micro-algues absorbent de grandes quantités de CO₂ au cours de leur croissance, ce qui constitue un premier effet positif. L'auteur indique qu'une tonne de CO₂ permettrait de produire 1,8 tonne de micro-algues.

Figure 3-5 – Les ressources des micro-algues



Source : lefigaro.fr (2012) <http://www.lefigaro.fr/automobile/2012/04/13/03001-20120413ARTFIG00486-la-promesse-de-l-algue.php>

La production de micro-algues serait une alternative à la séquestration du CO₂ dans des réservoirs naturels ou artificiels. En effet, il pourrait être intéressant tant économiquement que sur le plan environnemental d'implanter des centres de production de micro-algues à proximité des unités fortement émettrices de CO₂ afin d'obtenir un « effet de symbiose » comparable à celui mis en œuvre dans des éco-parcs tels que celui développé à Kalundborg.

⁶⁶ Article publié par lefigaro.fr

À partir de ces micro-algues, il est également possible de produire des huiles pouvant être utilisées en tant que biocarburants, de la biomasse, de l'oxygène et enfin de l'hydrogène pouvant servir à alimenter les piles à combustible après purification.

Néanmoins, la production de ces micro-algues ne peut être réalisée sans que des mesures soient prises afin que ces organismes ne puissent se retrouver dans la nature. Larry Sirmans⁶⁷ (2012, lefigaro.fr) rappelle que la plus grande vigilance est requise dans ces processus car il ne s'agit pas de « *créer et ensuite diffuser des espèces dangereuses pour les environnements locaux, comme nous l'avons fait avec certains batraciens et même quelques algues marines, ce serait un vrai drame* ».

Selon des sources « officielles » telles que l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) ou Airparif⁶⁸, deux polluants sont actuellement au cœur du débat, d'une part les particules (en général et les particules fines en particulier) et d'autre part les NOx. Comme le rappelle PSA dans son dossier de presse (2013), concernant les NOx, « *le transport routier est la principale source d'émission au niveau national (55%)* ». Selon les chiffres communiqués par le constructeur, les véhicules particuliers diesel représenteraient 17% du total et les voitures essence 7,3%.

Pour l'automobile, les normes visant à limiter le réchauffement climatique passent par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'un des enjeux consiste donc à baisser les émissions de CO₂ et à réduire dans le même temps la consommation des véhicules - la combustion des carburants d'origine fossile étant source d'émissions de CO₂, ce qui aurait pour effet d'améliorer la qualité de l'air par la réduction de la pollution inhérente aux voitures.

Pour J. Beretta⁶⁹ (CNAM/SIA/IFP, 2010), « *le secteur des transports représente un enjeu stratégique de premier plan sur le long terme en matière de maîtrise de ses émissions de gaz à effet de serre* ». Il n'est plus question uniquement des émissions de CO₂. Pour mémoire, le Grenelle de l'Environnement avait fixé un seuil de 130g de

⁶⁷ Directeur technique de MBD Energy

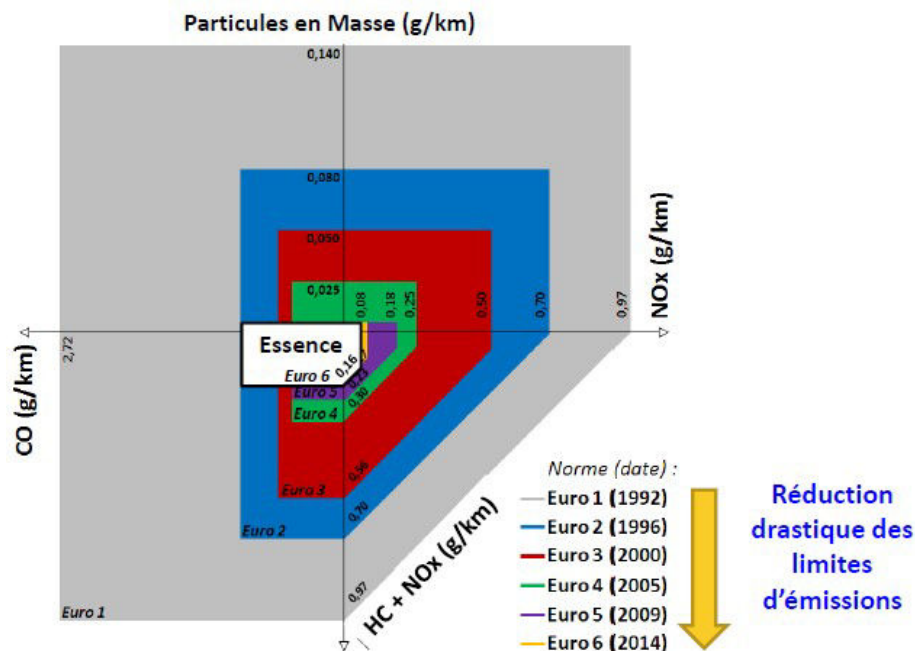
⁶⁸ Association agréée par le Ministère de l'Environnement pour la surveillance de la qualité de l'air en Ile de France

⁶⁹ Direction des Relations Institutionnelles, Responsable Énergies, Technologies et Émissions Automobiles chez PSA Peugeot-Citroën

CO₂/km à l'horizon 2020 alors que l'objectif européen était de 130g en 2012. « Pour réduire les émissions de 10g/km supplémentaires (à 120g/km), il sera nécessaire d'introduire la traction électrique et les véhicules décarbonés » (Beretta, – CNAM/SIA/IFP, 2010).

Le challenge, pour les constructeurs automobiles, consiste à trouver un nouveau modèle formé d'un ensemble de solutions technologiques permettant d'atteindre les objectifs environnementaux fixés. Il s'agit en fait de parvenir à satisfaire à la réduction des émissions au niveau des gaz d'échappement et de réduire la consommation tout en maintenant un niveau de puissance satisfaisant. En effet, comme le souligne le CCFA, à terme, les limites d'émissions devraient évoluer de telles sorte que celles du diesel converge vers celles de l'essence (Figure 3-6). En effet, le nombre de véhicules diesel immatriculés étant supérieur à celui des véhicules essence, il convient d'accorder une attention particulière à ces motorisations.

Figure 3-6 – Sévérisation des limites d'émissions diesel en convergence avec celles de l'essence



Source : CCFA, véhicules particuliers, dossier de presse PSA (2013)

SECTION 3 DES ECO-INNOVATIONS DE RUPTURE A L'ORIGINE D'UN NOUVEAU SENTIER DE DEPENDANCE

Selon Beretta « *l'introduction de véhicules décarbonés (véhicules électriques, hybrides rechargeables, hybrides émettant moins de 60g de CO₂/km) doit être envisagée et il faut évaluer leurs bilans économique et environnemental pour faire les bons choix technologiques* » (Beretta, CNAM/SIA/IFP, 2010). A ces différents types de véhicules décarbonés il convient également d'ajouter les véhicules utilisant l'hydrogène comme source ou comme vecteur d'énergie. « *Il existe plusieurs façons d'utiliser l'hydrogène. [...] soit l'utiliser comme carburant dans un moteur à combustion classique, ou bien le combiner à l'oxygène dans une pile à combustible (PAC). Ce dernier système est au cœur même de la voiture à hydrogène* » (Beuzit, 2007 : 47).

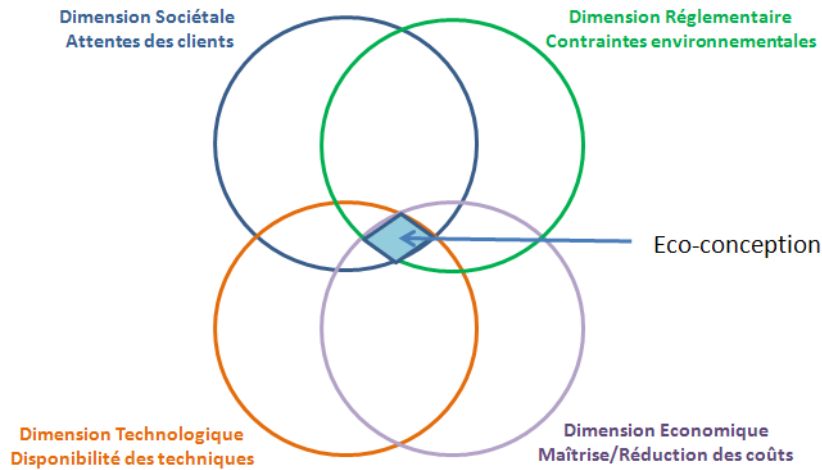
3.1 De l'éco-innovation à l'éco-conception

Afin de mieux comprendre les concepts d'éco-conception et d'éco-innovation, il convient de noter qu'ils font tous deux référence à la notion d'« *éco-friendly* » souvent citée dans la littérature anglo-saxonne et qui fait référence à tout ce qui agit ou intervient en faveur de, est bon pour l'environnement. Il faut également garder à l'esprit que l'automobile est fortement impactée par les contraintes environnementales découlant de la ratification du Protocole de Kyoto et doit donc non seulement réduire ses émissions de CO₂ et autres GES, mais également en raison de la transposition dans le droit français s'inscrire dans une démarche de développement durable qui concerne les voitures tant dans leur mode de fabrication que lors de leur utilisation jusqu'à leur fin de vie.

L'ADEME définit l'éco-conception comme une démarche consistant à « *intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, qu'il s'agisse de biens, de services. Cette intégration repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement et est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits* ». **L'éco-conception se trouve également à l'intersection de plusieurs dimensions : réglementaire en raison de la nécessité de respecter les normes environnementales, économique afin que cette démarche n'impacte pas négativement les coûts en les faisant augmenter, d'où la nécessité de maîtriser les**

coûts, sociale car elle fait référence aux demandes exprimées par les clients, c'est-à-dire leurs attentes et enfin technologique dans le sens où il faut s'interroger sur la disponibilité de la technologie nécessaire pour atteindre ces objectifs.

Figure 3-7 – Les quatre dimensions de l'éco-conception



Source: Réalisé par l'auteur

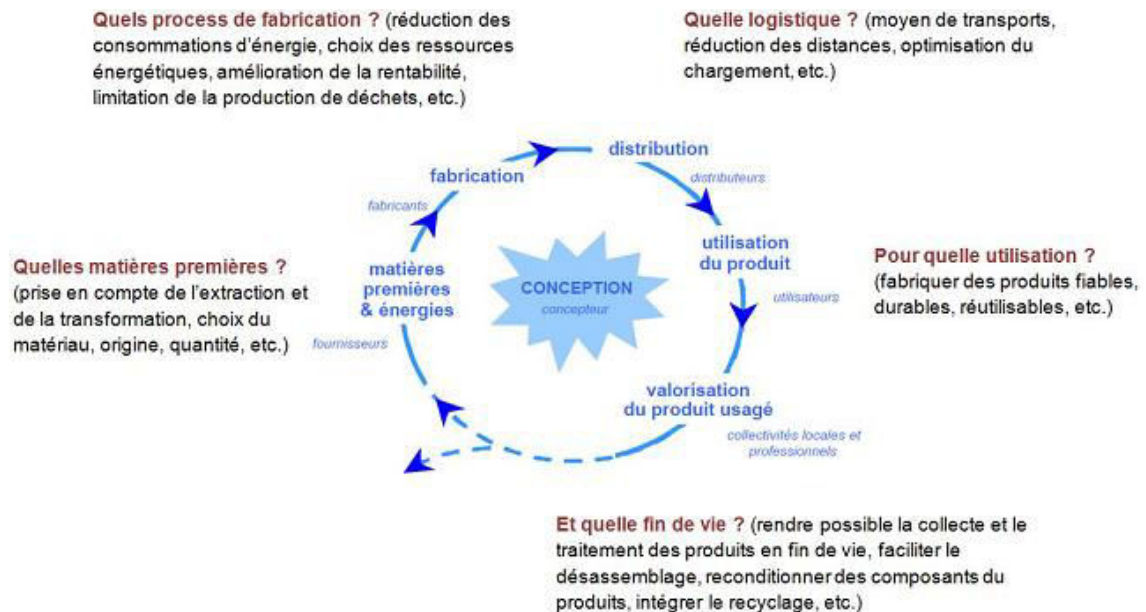
L'éco-innovation s'inscrit dans le prolongement du premier concept et est définie « *eco-innovation is any innovation that reduces the use of natural resources and decreases the release of harmful substances across the whole life-cycle* »⁷⁰.

3.2 L'éco-conception dans l'automobile

L'éco-conception s'appuie sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) du produit évoquée précédemment. Le produit est analysé étape par étape, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à sa fin de vie (recyclage, traitement pour élimination,...). C'est grâce à cette analyse fine qui prend en compte de multiples critères tels que les impacts éventuels du produit sur l'eau, sur l'atmosphère, les sources d'énergie et les quantités consommées, etc., qu'il est possible de définir étapes pouvant faire l'objet d'une optimisation.

⁷⁰ <http://www.eco-innovation.eu/>

Figure 3-8- L'éco-conception



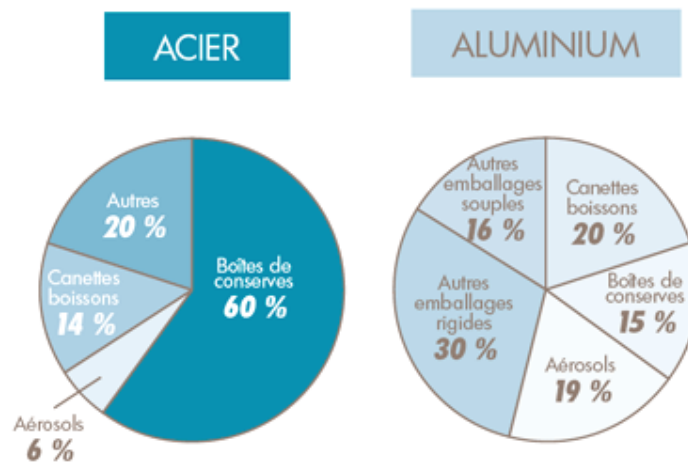
Source : <http://www.notre-planete.info/>

Pour être en mesure de respecter les normes en matière d'émissions de CO₂, les constructeurs, comme le règlement européen (CE) N°443/2009 le précise, sont encouragés à s'engager activement dans la voie de l'éco-innovation. Par ailleurs, le Gouvernement français souhaite que la phase déconstruction soit intégrée dès la conception, afin de pouvoir traiter et recycler le plus grand nombre d'éléments valorisables. Au-delà de cette démarche d'éco-conception, « *les constructeurs seront invités à développer une offre de pièces d'occasion à travers leur réseau commercial, afin d'augmenter les revenus de la filière et le taux de recyclage des véhicules* » (Montebourg, Sapin, 2012 : 7).

En maximisant les processus nécessaires au désassemblage et en favorisant le tri et/ou la réutilisation des divers éléments par un marquage spécifique (code barre ou autre), il serait possible d'augmenter le taux de recyclage, que ce soit des matériaux ou de sous-ensembles. De multiples gains sont possibles, au travers de la diminution de la consommation des matières premières, de la réduction des divers rejets dans l'environnement, etc. Une telle approche nécessite d'intégrer, dès l'amont, la fin de vie du produit. Par ce processus, il sera possible de développer une nouvelle filière, celle des « *matières premières secondaires* ». À titre d'exemple, le recyclage d'une tonne

d'acier issu des boîtes de conserve, de certaines cannettes, d'aérosols permet de nombreuses économies : 1,5 tonnes de minerai de fer, 1,5 tonnes de charbon, sans compter une consommation d'électricité et d'eau non négligeables et des émissions de GES équivalentes à celles qu'émettrait une automobile sur 8 500km (canibal.fr). L'aluminium est de plus en plus présent dans les voitures : éléments de carrosserie, blocs moteurs, etc. Son utilisation est motivée par un gain de poids ayant un effet direct sur la consommation en la réduisant. L'aluminium présent dans de nombreux emballages a le mérite selon éco-emballages, de se recycler à 100% et à l'infini⁷¹. Afin de mesurer l'impact positif sur l'environnement, il semble utile de rappeler qu'une tonne d'aluminium recyclé permet de diminuer les rejets de 6,89 T équivalent CO₂.

Figure 3-9 – Potentiel de recyclage des emballages acier et aluminium



Source : Canibal (<http://canibal.fr/?page=recyclage-cannelles>)

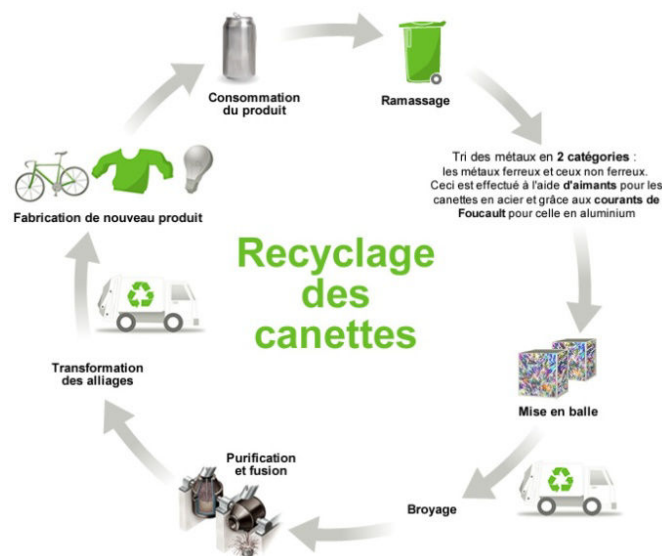
De nombreux produits sont fabriqués à partir de ces matériaux recyclés, tels que des radiateurs de voitures, éléments des moteurs (automobiles, avions), des vélos, des tondeuses à gazon, des patinettes, des ustensiles de cuisine, etc. Selon le site éco-emballages, plus de la moitié de l'acier utilisé dans la construction d'une automobile serait issu du recyclage⁷².

⁷¹ <http://www.ecoemballages.fr/le-tri-des-emballages/du-recyclage-au-recycle/aluminium>

⁷² Environ 19 000 cannettes entreraient dans la construction d'une voiture

L’intérêt du recyclage est multiple : tout d’abord, il limite le prélèvement des matières premières (1 tonne d’aluminium recyclé économise l’extraction de 2,3 tonnes de bauxite). Il participe également à la protection de l’environnement en réduisant significativement les consommations énergétiques (électricité, charbon) et en limitant la consommation d’eau. La production d’aluminium à partir de la bauxite nécessite d’énormes quantités d’électricité. L’utilisation de métal recyclé pourrait économiser jusqu’à 95% sur le plan de l’énergie et au moins 60% en matière de GES⁷³. Selon Aurea France, principal site d’affinage et de recyclage d’aluminium en France, « l’énergie utilisée pour le recyclage est 20 fois inférieure à celle nécessaire pour la production d’aluminium primaire », c’est-à-dire qui serait produit à partir de la bauxite⁷⁴. Par voie de conséquence, le recyclage participe à la réduction des coûts de fabrication en limitant les coûts et s’inscrit dans une démarche « éco-responsable ». Enfin, il est source de création d’emplois par le développement d’une filière, comme le montre la Figure 3-10. En effet, ces matériaux peuvent être recyclés au fur et à mesure de la fin de vie du produit qu’ils constituent, d’où l’appellation de « cycle circulaire ».

Figure 3-10 - Le cycle circulaire du recyclage des cannettes (acier – aluminium)



Source : Canibal (<http://canibal.fr/?page=recyclage-cannettes>)

⁷³ Le recyclage d’une tonne d’aluminium économise jusqu’à 9 tonnes de CO₂ (<http://www.chaquecanettecompte.fr/pourquoi/>)

⁷⁴ <http://www.aurea-france.com/fr/presentation.asp?ID=15>

L'intérêt du recyclage et l'utilisation des « matières primaires secondaires » qu'il crée apparaît ainsi profitable non seulement à l'automobile mais aux industries qui utilisent de l'acier et de l'aluminium. De plus, l'impact positif sur l'environnement incite à encourager cette filière.

L'éco-conception s'inscrit parfaitement dans une démarche orientée « *développement durable* » en étant un élément et un instrument d'une stratégie de développement durable.

L'arrêté « *réglementant l'utilisation des métaux lourds dans les matériaux des véhicules et garantissant leur valorisation en fin de vie* » a fait l'objet d'une refonte qui s'est traduite par la publication d'un nouveau texte (JORF n° 0066 du 17 mars 2012) qui fixe « *les conditions d'utilisation du plomb, du mercure, du cadmium et du chrome hexavalent dans les composants et matériaux des véhicules ainsi que la codification applicable aux composants et matériaux de ces véhicules, afin d'en faciliter l'identification pour leur réemploi et leur valorisation* ». Ce texte a été rédigé dans un double objectif ; tout d'abord, fixer des seuils de recyclage et de valorisation en dessous desquels il ne sera pas possible de descendre, mais également sécuriser la réutilisation de ces matériaux afin qu'elle ne présente pas un risque, que ce soit pour les populations ou pour l'environnement.

3.3 Les enjeux liés aux motorisations alternatives, hybrides, électriques, à hydrogène, à air comprimé. Vers le Zero Emission Vehicle

L'automobile est un secteur dynamique en matière d'innovation. Le nombre de brevets déposés en témoigne. Ainsi, 86 788 brevets soit 12% des brevets déposés au cours de l'année 2011, au niveau mondial sont issus de l'automobile. De plus, malgré la crise qui frappe l'automobile, force est de constater que ce secteur reste innovant, les premiers déposants en terme de nombre de brevets étant les entreprises automobiles, constructeurs et équipementiers (DWPI, 2013). Selon l'Office Européen des Brevets, au niveau mondial 257 744 demandes auraient été émises, les entreprises européennes se classant dans les premières « *dans huit des dix domaines technologiques les plus importants* » (journalAuto.com, 9 avril 2013). Pour Benoît Batistelli⁷⁵ ces résultats

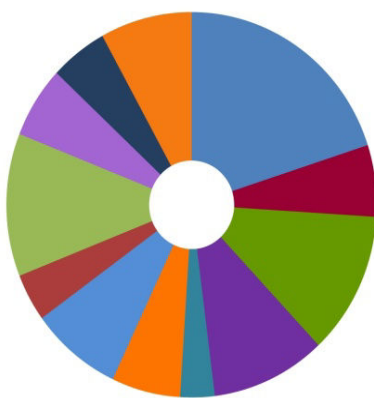
⁷⁵ Président de l'Office Européen des Brevets

seraient le signe « *que celles-ci misent sur l’innovation pour sortir de la crise* ». En France, par exemple, le premier déposant est Peugeot, notamment pour ses technologies « *full hybride essence* » et « *air comprimé Hybrid Air* ». L’INPI souligne que PSA Peugeot Citroën « *conforte sa position de leader en enregistrant 1 348 demandes de brevets en 2012* ».

L’industrie automobile, bassin d’emploi non négligeable, joue également un grand rôle en matière d’innovation, « *l’industrie automobile est le troisième dépositaire mondial de brevets avec 12% des dépôts en 2011* » (CCFA, 2012), et participe à la valeur ajoutée.

Oltra et Saint Jean (2007) soulignent ce fait et précisent que, bien que l’industrie automobile ne soit pas considérée comme une industrie « *high tech* », il n’en demeure pas moins qu’elle est le principal moteur en matière de développement de nouvelles technologies, ce qui est démontré par le niveau élevé des investissements en R&D (Tableau 3-2). Les auteures ajoutent que les investissements en R&D sont protégés par le dépôt de brevets dont le nombre peut être utilisé comme indicateur du dynamisme en matière d’innovation. Il semble pertinent de souligner que les dépôts de brevets relatifs aux motorisations alternatives arrivaient au 1^{er} rang en 2011 avec une progression de 20% par rapport à 2010.

Tableau 3-2 - 2011 Patent Activity : Automotive



	SUBSECTORS	2011 Volume	2010 Volume	% Change
20%	Alternative Powered Vehicles	19 078	15 913	20%
6%	Security Systems	5 840	5 752	2%
12%	Navigation systems	11 279	12 060	-6%
10%	Safety	9 858	10 263	-4%
3%	Entertainment Systems	2 576	3 052	-16%
6%	Steering Systems	6 305	6 327	0%
8%	Seats, Seatbelts and Airbags	8 212	7 769	6%
4%	Braking Systems	4 174	3 908	7%
12%	Transmission	11 413	11 577	-1%
6%	Suspension Systems	6 145	5 924	4%
5%	Engine Design and Systems	5 183	5 336	-3%
8%	Pollution Control	7 548	8 376	-10%

Source: Thomson Reuters Derwent World Patents Index (DWPI), (2012: 8)

Concernant la nature des brevets, les motorisations utilisant des énergies alternatives arrivent au 1^{er} rang avec 5 819 dépôts, ce qui constitue une hausse de 20% par rapport à 2010. Les systèmes de freinage, ont enregistré une hausse de 7% (TRDWPI, 2012 : 8-9). Celle-ci est principalement liée aux recherches menées en matière de récupération d’énergie, pouvant concerner autant les véhicules hybrides qu’électriques. Il faut néanmoins souligner que dans le même temps, les efforts faits en matière de contrôle de la pollution ont diminué de 10%, ce qui amène à s’interroger sur les stratégies menées en matière de lutte contre les GES et de développement des motorisations. Il semble légitime de penser que les constructeurs automobiles ont d’ores et déjà entamé la réorientation de leur R&D vers les énergies alternatives.

Le classement par pays fait nettement ressortir le dynamisme du Japon sur le thème des motorisations alternatives (Tableau 3-3).

Tableau 3-3 - Motorisations alternatives - Classement par pays 2011

Japan	Germany	USA	Korea	France
3684	900	585	456	194

Source : Synthèse établie par l’auteur à partir des données 2011 State of Innovation (2012)

Avec 1669 brevets déposés, Toyota représente plus de 45% de l’innovation japonaise en matière de motorisations alternatives, ce qui place le constructeur nippon loin devant l’allemand Daimler (1^{er} européen) qui a totalisé 286 dépôts. Peugeot Citroën Automobile et Renault arrivent respectivement au 16^{ème} et au 22^{ème} rang mondial avec 101 et 45 dépôts. Au niveau européen, les constructeurs français arrivent respectivement à la 16^{ème} et à la 22^{ème} place (Tableau 3-4).

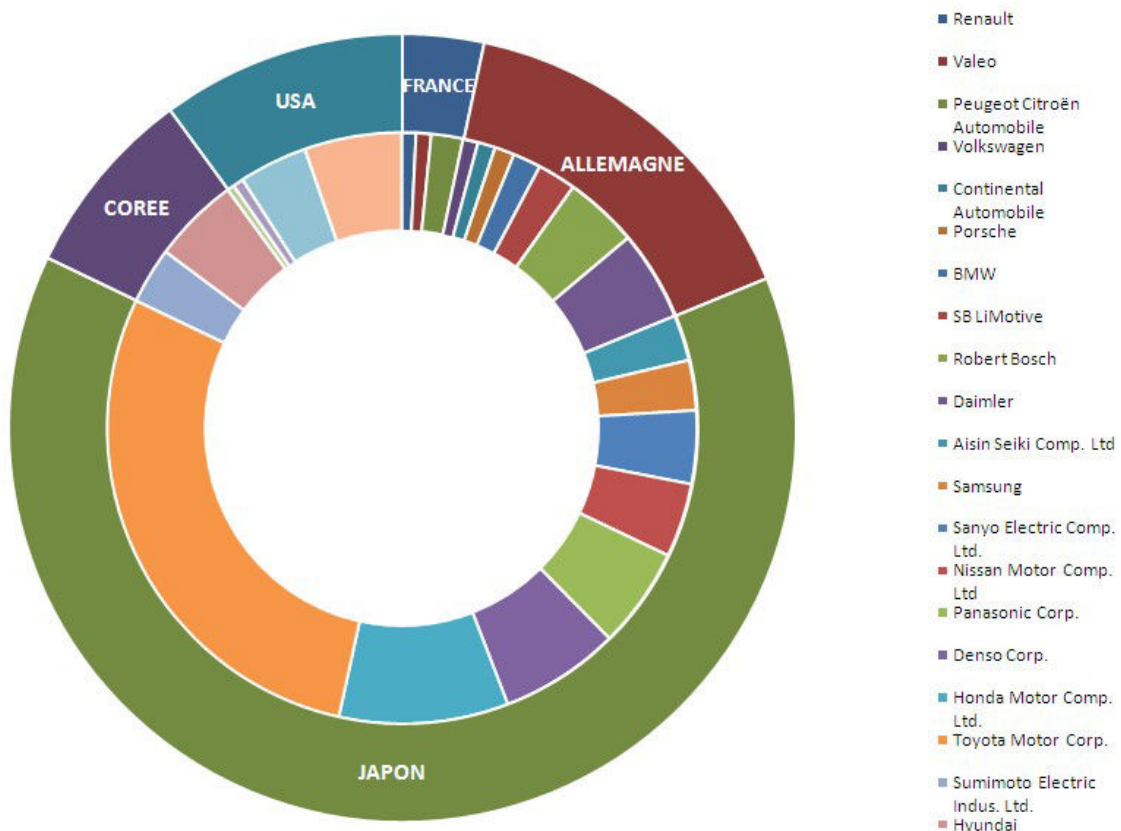
Tableau 3-4 - Classement des constructeurs de motorisations alternatives en 2011

Rank	Company	Country	Number of documents	Rank	Company	Country	Number of documents
1	Toyota Motor Corp.	Japan	1669	13	Samsung	Japan	159
2	Honda Motor Comp. Ltd.	Japan	539	14	Aisin Seiki Comp. Ltd	Japan	146
3	Denso Corp.	Japan	382	15	SB LiMotive	Germany	123
4	Panasonic Corp.	Japan	320	16	Peugeot Citroën Automobile	France	101
5	General Motors	USA	310	17	BMW	Germany	89
6	Daimler	Germany	286	18	Porsche	Germany	63
7	Hyundai	Korea	276	19	Continental Automobile	Germany	56
8	Nissan Motor Comp. Ltd	Japan	236	20	Valeo	France	48
9	Robert Bosch	Germany	235	21	Volkswagen	Germany	48
10	Sanyo Electric Comp. Ltd.	Japan	233	22	Renault	France	45
11	Ford	USA	218	23	General Electric	USA	34
12	Sumimoto Electric Indus. Ltd.	Korea	180	24	Tesla Motors	USA	23

Source : Synthèse établie par l’auteur à partir des données 2011 State of Innovation (2012)

L’analyse de l’ensemble des constructeurs ayant déposé des brevets en matière de motorisations alternatives (Graphique 3-10) prouve de dynamisme en matière de recherche et d’innovation orientée vers l’environnement, classe au premier rang Toyota (Japon/Asie), Daimler (Allemagne/Europe) au second et Général Motors (USA) au troisième. Il est à souligner que la France arrive derrière la Corée et que le constructeur national le plus innovateur est le groupe PSA Peugeot Citroën (16^{ème} rang) loin devant Renault (22^{ème} rang).

Graphique 3-10 - Répartition des dépôts de brevets par les constructeurs de motorisations alternatives



Source : Synthèse réalisée par l’auteur à partir des données 2011 State of Innovation (2012)

Les énergies alternatives et les motorisations qui en résultent constituent un premier axe de la réorientation des constructeurs. Elles sont centrales quant à l’évolution de l’automobile. Ces différentes énergies ou sources d’énergie sont déjà et vont être dans le futur à l’origine de nouvelles technologies dans le domaine des motorisations automobiles. Ces motorisations sont au cœur d’un changement de paradigme dans la mesure où n’étant plus mues par des carburants d’origine fossile, elles introduiront des innovations qui constitueront une rupture par rapport au « dominant design » actuel. Elles ne seront plus produites par les motoristes qui comme le rappelait Marc Giget (CNAM, SIA, IFP, 2008) sont habitués à construire des architectures basées sur les carburants fossiles mais par des équipementiers tels que Bosch, Leroy Sommer, etc. ayant une expérience dans le domaine des moteurs électriques, voire également dans l’électronique. En effet, comme cela avait été évoqué lors des différents cycles de conférences CNAM/SIA, IFP sur « l’utilisation rationnelle de l’énergie dans les moteurs à combustion interne » (2008, 2009, 2010), les ingénieurs (Chaire

turbomachines et moteurs) ne peuvent plus penser les moteurs comme ils l'avaient fait jusqu'à présent. Les enjeux liés à ces nouvelles motorisations sont d'autant plus importants qu'ils détermineront l'avenir des constructeurs et de l'automobile.

Il s'agit bien là d'un changement par rapport à un premier sentier de dépendance.

3.3.1 Véhicules hybrides : « Transition énergétique » entre deux sentiers

L'utilisation de l'électricité combinée à un petit moteur thermique a donné naissance aux premiers véhicules hybrides, sous l'impulsion de Toyota. Une plus large diffusion des véhicules hybrides participerait favorablement à la réduction des émissions de CO₂. S'exprimant sur la percée de cette nouvelle technologie, Alain Morcheoine⁷⁶ (Le Monde, 2004) déclarait « *C'est une véritable rupture technologique [...]. À terme on pourra difficilement faire l'économie de l'hybride pour réduire les émissions de CO₂.* Chanaron et Teske (2007 : 268) concluaient « *even though hybrid technology can not yet being applied profitably yet it seems to be a key technology to the industry due to its current positive perception in the US* » confirmant l'idée selon laquelle le véhicule hybride est une technologie clé susceptible de constituer le « chaînon manquant » entre les anciennes technologies, polluantes et les nouvelles technologies, respectueuses de l'environnement. Les auteurs insistent également sur la nécessité de mettre en place des technologies alternatives telles que celles favorisant la réduction de la consommation, en attendant l'arrivée de véhicules produits en série et équipés de piles à combustible.

Un des obstacles à l'adoption croissante de la technologie hybride par les clients est son prix, supérieur de 15% en moyenne par rapport à un modèle équivalent. Chanaron et Teske (2007) suggèrent que la complexité et le coût élevé de la technologie hybride pourraient constituer des freins à son développement. Néanmoins, le développement par Toyota de la technologie « *Hybrid Synergy Drive* » (HSD) et son utilisation sur différents modèles a permis d'une part d'en réduire le coût grâce aux économies d'échelle, et, d'autre part de réduire l'écart de coût entre des motorisations classiques (essence ou diesel) et le hybrides. Ce différentiel, comme le montre le Tableau 3-5 est en train de se réduire puisqu'il ne représente plus que 950 euros pour la Toyota Auris, soit un surcoût de 4,67% par rapport au modèle essence. La faible consommation du modèle hybride permet d'obtenir un gain de 2,5 litres/100km par rapport au modèle

⁷⁶ Directeur de l'air et des transports à l'ADEME.

thermique (calculs effectués par l'auteur à partir des données du constructeur). A un prix de l'essence SP95 de 1,62euros le litre⁷⁷, le surcoût serait amorti en approximativement 23 400 kilomètres, soit un peu plus d'un an d'utilisation selon les « conditions générales de l'Argus de l'Automobile pour les voitures particulières » qui fixent le kilométrage de référence à 15 000 km pour les voitures à essence.

Tableau 3-5 - Comparaison entre les différentes motorisations

Marque	Modèle	Consommation en cycle mixte l/100km	Prix Catalogue €
TOYOTA	Yaris essence	4,8	14 500
	Yaris hybride*	3,5	18 500
	Yaris diesel	3,9	17 450
	Auris essence	6,3	20 350
	Auris hybride	3,8	21 300
	Auris diesel	5,2	22 600
HONDA	Jazz essence	5,4	15 600
	Jazz hybride	4,5	16 900

Selon le constructeur, l'adaptation de la technologie HSD à la Yaris a nécessité « des efforts sur la miniaturisation de divers composants et a eu pour effet un gain de poids de 42kg. C'est ce qui explique l'écart de prix entre la version essence et l'hybride. L'Auris pour sa part n'a pas nécessité de développements techniques nouveaux ». Il est possible de considérer que les innovations liées à l'hybridation de la Yaris sont incrémentales.

Source : Réalisé par l'auteur à partir des informations fournies par les constructeurs Toyota et Honda (2012)

⁷⁷ Prix au 22 février 2013

La technologie hybride s'est progressivement diffusée et Toyota annonçait en avril 2013 le lancement de 21 nouveaux modèles au cours de trois prochaines années, ce qui permettrait de répondre à l'ensemble des besoins exprimés par les clients. Le succès de l'hybride Toyota en Europe a été tel au cours du premier trimestre 2013 que les ventes de ces véhicules ont réussi à compenser plus que la chute des ventes des véhicules traditionnels. En effet, « avec un bilan en hausse de 82% au premier trimestre, les modèles hybrides compensent la baisse générale des ventes subies par le groupe japonais en Europe lors des trois premiers mois de l'année » (www.journalauto.com, 12/04/2013). Les chiffres publiés par Toyota Motors Europe sont révélateurs : « *les ventes d'hybrides ont progressé de 82,3% au cours de cette période pour représenter 20% des ventes* ». Dans une déclaration, le Groupe Toyota a déclaré que « *les modèles hybrides représenteront au moins 17% des ventes du groupe en Europe cette année, contre 13% en 2012* » (Reuters, 2013).

Chanaron (2008) soulignait qu'« *à l'heure actuelle, il y a une convergence générale des stratégies vers la promotion des véhicules hybrides comme la solution de moyen terme pour des véhicules à long rayon d'action et faiblement polluants. Une telle évolution est largement imputable à la stratégie de Toyota de développement de cette technologie qui lui a permis de créer et d'imposer une "quasi-norme" de voiture propre grâce à sa réputation, largement méritée, de qualité et de fiabilité et ses fortes positions commerciales sur le marché nord-américain*⁷⁸ ». Il est alors possible de s'interroger sur l'émergence d'un phénomène de lock-in en faveur de l'hybride.

Ainsi que Chanaron (2008), Chanaron et Teske (2009) l'avaient analysé, les véhicules hybrides, c'est-à-dire combinant un moteur à combustion interne et des batteries pourraient être le « chaînon manquant » entre les moteurs à combustion interne et la « voiture propre » du futur n'utilisant plus les carburants fossiles tout en ayant des performances comparables. Certes, ainsi que les auteurs le précisent il s'agit d'une étape (« *temporary step* »). Mais il faut néanmoins reconnaître que cette transition a permis l'émergence d'innovations en termes d'accumulateurs, d'électronique de puissance et de moteurs électriques. En effet, qu'il s'agisse de véhicules hybrides ou électriques, ces

⁷⁸ http://energie.lexpansion.com/transports/voitures-hybrides-un-avenir-incertain-_a-40-359.html

technologies ne peuvent s'exonérer des accumulateurs d'énergie que sont les batteries. Cet élément commun à toutes les automobiles a connu de nombreuses évolutions depuis les accumulateurs « plomb-acide ».

Le frein à la diffusion des modèles hybrides, suggéré par Chanaron et Teske (2007) a été fortement atténué par l'introduction du bonus-malus écologique appliqué à chaque véhicule, en fonction de son taux d'émissions de CO₂. En effet le décret relatif à « *la mise en œuvre des bonus pour les véhicules propres est paru et confirme l'application des nouveaux bonus à tous les véhicules facturés à compter du 1er août 2012* » (Décret n°2012-925 du 30 juillet 2012) attribue un bonus de 4 000 euros aux véhicules hybrides. Les voitures électriques bénéficient d'un bonus de 7 000 euros plafonné à 10% du prix du véhicule. Dans le même temps, le seuil à partir duquel un véhicule est frappé de malus est ramené de 140g à 135g de CO₂ par kilomètre. Depuis son lancement en 2000, les techniques d'hybridation ont évolué et le dispositif « *stop and start* » qui coupe le moteur en cas d'arrêt prolongé a été qualifié de « micro-hybridation ». Les différents types d'hybridation et leurs caractéristiques sont résumés dans l'Encadré 2.

Par de telles mesures, l'État manifeste également son soutien aux constructeurs français investis dans des technologies alternatives : Renault sur l'électrique et Peugeot sur les hybrides. Un tel dispositif est de nature à favoriser le marché des hybrides et de l'électrique et à participer à son développement.

Encadré 2- Différents types d'hybridation

▪ **Micro Hybrides** (également dénommé Stop and Start)

Il s'agit du niveau le plus faible en matière d'hybridation. Il concerne des véhicules thermiques équipés d'un dispositif remplissant à la fois les fonctions de démarreur et d'alternateur. Selon les équipementiers, le gain de consommation en ville varie entre 6 et 16% en fonction des conditions de circulation.

▪ **Mild Hybrides**

Le niveau d'hybridation est supérieur au Micro Hybride. Il combine le Stop and Start (micro hybride) à une double propulsion, thermique et électrique. Le moteur électrique participe grâce à un alternateur à la production d'électricité (stockée dans des accumulateurs). De plus l'énergie est produite en continue et est également stockée lors des phases de décélération ainsi qu'au freinage. Les gains de consommation réalisés sur les mêmes bases sont de 10 à 20%.

▪ **Hybrides Parallèles**

C'est la configuration la plus connue grâce à la Toyota Prius. Par rapport au véhicule Mild Hybrid, la version Hybride Parallèle associe un moteur thermique à un moteur électrique, mais de puissance supérieure afin de pouvoir constituer une motorisation capable de mouvoir le véhicule aux vitesses courantes en milieu urbain, dans les encombrements ainsi que lors des manœuvres de stationnement. C'est ainsi que les ingénieurs ont été conduits à développer de petits moteurs thermiques faiblement émetteurs de GES et dotés d'un couple important et qu'est apparue la notion de « chaîne de traction à haut rendement » en remplacement du couple moteur/boîte de vitesses traditionnellement utilisé.

▪ **Hybrides Rechargeables** (Plug-in Hybrid)

Les hybrides rechargeables constituent une évolution qui s'inscrit dans la continuité des hybrides parallèles. Il s'agit d'une innovation incrémentale par rapport au modèle précédent qui constituait, pour sa part, une innovation de rupture). La différence fondamentale réside dans le fait que le véhicule peut être rechargé sur le réseau domestique et que dans le cadre de trajets quotidiens il peut se substituer à un véhicule électrique. L'implantation de bornes de recharges participe à sa diffusion.

▪ **Les véhicules « 100% électriques »**

L'enjeu, pour leur diffusion réside essentiellement dans leur autonomie. Le challenge est donc de produire des batteries capables de stocker la plus grande quantité d'énergie, dans un volume et un poids aussi faible que possible. L'électronique de puissance est également un facteur important car elle intervient entre les batteries et le moteur électrique. Ils sont également équipés pour récupérer l'énergie lors du freinage et de la décélération. Le moteur-roue développé par Michelin semble constituer une solution prometteuse pour leur développement.

Des véhicules tels que la Venturi Fetish ou la Tesla (concept « *véhicule électrique de sport* ») ont atteint des autonomies de l'ordre de 250 à 300 kilomètres avec des performances dignes d'une sportive – 0 à 100km/h couvert en 4 à 5 secondes. Les prix sont de l'ordre de 297 000 euros hors taxes pour Venturi et 84 000 euros pour Tesla. Les constructeurs s'inscrivent ici dans une stratégie classique, à savoir la pénétration du marché par le (très) haut de gamme.

Source : Réalisé par l'auteur à partir des données des constructeurs et des équipementiers

Parallèlement au déploiement des véhicules hybrides, le « Plan Automobile » incite les constructeurs à l'éco-conception et au recyclage des véhicules en fin de vie.

Le « *principe de Responsabilité Elargie du Producteur (REP)* » bien qu'existant en France souffre d'une faiblesse qui a conduit en 2010 l'Union Européenne à condamner la France pour « *non atteinte de ses objectifs de recyclage des véhicules usagés* ».

Le déploiement des véhicules hybrides puis des véhicules électriques représente un levier important pour la recherche et le développement de technologies nouvelles capables d'augmenter de façon significative l'autonomie de ces véhicules. Le Secrétaire Américain de l'Energie, Steven Chu, le sénateur Durbin, le Gouverneur Quinn et le maire de Chicago ont annoncé (IDTechEx, 3 décembre 2012) la mise en place d'un partenariat dont le chef de file serait *Argonne National Laboratory*. La structure sera dotée d'un budget de 120 millions de dollars sur cinq ans et sera dénommée « *Joint Center for Energy Storage Research (JCESR)* ». La mise en place d'un tel dispositif accompagné d'un budget aussi important démontre l'importance des collaborations entre les différents acteurs, industriels, laboratoires, etc. ainsi que l'importance stratégique des dispositifs de stockage que sont les batteries, mais pas seulement. En effet, comme cela a été évoqué précédemment, de nombreuses sources telles que l'éolien ou le solaire produisent de l'électricité de manière irrégulière, voire intermittente. Les « super condensateurs » permettraient de stocker cette énergie et de la restituer tout en évitant les risques de surcharge du réseau de distribution électrique.

3.3.2 Véhicules électriques : l'amorce d'un nouveau sentier

Comme cela a été évoqué précédemment (2.1.2), le Japon a depuis longtemps adopté de l'usage de petites voitures, les *kei-cars*, pour une utilisation urbaine.

Les motorisations électriques sont également un facteur susceptible d'en accroître la diffusion et les constructeurs japonais en collaboration avec le gouvernement et les instituts de recherche japonais se sont engagés dans cette voie avec pour objectif d'améliorer les performances tout en abaissant les coûts : « *The EV industry, academicians and the Japanese government are working closely together on enhancing battery performance while reducing cost* ». La réduction du prix de vente des « *kei cars* » électriques suite à des économies d'échelle verrait une plus grande diffusion de

ces véhicules : « *This will bring down the high cost of electric Kei cars, thus fuelling growth in the market. Automakers in Japan are working towards the electrification of Kei Cars as a market for future expansion due to the increased awareness and orientation towards environment protection. Electric Kei Cars likely to be a growing product segment in Japan due to increased awareness towards environment protection* ». Comme le souligne à plusieurs reprises l'étude de Frost & Sullivan, ces évolutions sont le fait d'une prise en considération croissante des enjeux environnementaux.

Plus récemment, Mitsubishi avec son modèle « i » lancé en 2006 au Japon (connue sous l'appellation i-MiEV⁷⁹ pour la version électrique) a combiné « *kei car* » et « *downsizing* ». Un nouveau marché est en train de s'ouvrir pour les « *kei cars* », celui de la voiture électrique. Selon Vijayendra R. Rao⁸⁰ les principaux constructeurs de « *kei cars* » tels que Suzuki, Daihatsu ou Mitsubishi avaient déjà entrepris le développement de ces nouveaux modèles et entamé les phases de test. Il semblerait que les bons résultats enregistrés par la Mitsubishi i-MiEV soient prometteurs. « *En Europe (en 2011), Mitsubishi est largement en tête. La firme détaille ses chiffres : 4 000 ventes au Japon, 5 800 en Europe. La i-MiEV est vendue dans 15 pays européens, en plus des versions Peugeot et Citroën* » (<http://www.automobile-propre.com/2011/06/20/ventes-voitures-electriques-monde/>).

L'électricité, du moins dans son utilisation n'est pas source d'émissions de GES. La question généralement soulevée concerne sa production et donc son origine : centrales thermiques, centrales nucléaires, solaire, éolien, biomasse, etc. Dans la mesure où la part de l'électricité produite à partir de sources telles que l'éolien ou le solaire augmente, la question du stockage de cette énergie produite de manière discontinue devient prégnante.

⁷⁹ Mitsubishi innovative Electric Vehicle

⁸⁰ Directeur de la recherche « Automotive & Transportation Practice, Asia Pacific » chez Frost & Sullivan

Tableau 3-6 - Impact du mix de production d’électricité sur les émissions de CO2

- Intensité d’émission de CO2 (gCO2/kWh) -			- Émissions de CO2 du puit à la roue d’un véhicule tout électrique -			
	Intensité d’émission			% d’électricité sans CO2	Intensité d’émission (gCO2 / kWh)	Émissions du puit à la roue d’un véhicule électrique * (g/km)
	gCO2/kWh	g/km				
Éolien	5.5	0.9				
Nucléaire	15	2.4				
Hydro-électrique	18	2.9				
Gaz naturel à Cycles Combiné	461	74				
Gaz naturel	653	104				
Charbon	1075	172				

France	90%	75	12
Canada	59%	267	43
Californie	44%	470	75
Etats-Unis	31%	710	114
Chine	20%	950	160

* Équivalent à un véhicule thermique consommant = 9l/100 km => 244g/km

Source : Langlois, 2008

L’électricité peut également être produite par le véhicule et stockée dans des accumulateurs. Différentes options ont été testées et l’une d’entre elles, la batterie lithium-métal-polymère développée par le Groupe Bolloré a fait ses preuves dans le cadre du véhicule électrique en libre-service Autolib’(BlueCar). Les batteries sont actuellement handicapées par leur durée de vie – le nombre de cycles décharge/recharge étant limité, et par un temps de recharge plus ou moins long. Les « *super condensateurs* » (supercapacitors) semblent pouvoir apporter une solution en matière de rapidité de stockage et de restitution de l’énergie (IDTechEx). Chad Hall⁸¹ (2013), évalue le nombre de cycles en millions et rappelle que les « *super condensateurs* » ont non seulement la capacité de fonctionner à des températures de l’ordre de -40°C mais ont un rendement supérieur à 90% alors que celui des batteries ne dépasse pas 70%. Les « *super condensateurs* » n’en sont qu’à leurs débuts mais ont déjà prouvé leur efficacité et leur fiabilité à bord de l’Airbus A380 et à bord de la BlueCar de Bolloré. « *Supercapacitors are taking a tiny market share from lithium-ion batteries, partly by being placed across them so less battery is needed and that battery last longer in the Bolloré BlueCar [...]* » (IDTechEx , 22/03/2013).

⁸¹ Fondateur de la firme Ioxus, fabricant de « super condensateurs »

L'avenir du véhicule électrique ainsi que l'amélioration de son autonomie pourrait se trouver dans la combinaison de ces condensateurs de nouvelle génération alliés à des batteries de technologie évoluée. Mais les batteries ne constituent pas le seul enjeu. Ainsi comme Michelin l'a démontré avec son « moteur-roue » *Active Wheel*, il est encore possible d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs électriques en limitant voire en supprimant les déperditions se produisant au niveau de la transmission. Avec cette technologie, l'énergie est directement transmise à la roue (Figure 3-11). En plaçant les moteurs à l'avant ou à l'arrière voire sur les 4 roues, il est alors possible de concevoir des véhicules à 2 roues motrices (traction ou propulsion) voire à 4 roues motrices pouvant être débrayées en fonction des besoins.

Figure 3-11 - Michelin "Active Wheel"



Source : Michelin (<http://www.michelin.fr/activewheel>)

Enfin, dans la mesure où la direction électrique sera homologuée, le mouvement produit au niveau du volant transmettra directement aux roues les informations leur permettant d'engager un virage.

À la question de savoir si le moteur-roue est une innovation incrémentale ou une innovation de rupture par rapport au moteur électrique, la première réponse qui vient à l'esprit est de qualifier cette technologie d'innovation incrémentale. Néanmoins étant sans rapport avec ce qui a pu être développé jusqu'à son apparition, il semble plus pertinent de la qualifier d'innovation de rupture de par les changements radicaux qu'elle introduit tels que la suppression de la boîte de vitesse, de l'embrayage, de la barre

« anti-roulis », des cardans et du système de transmission d'une part et l'intégration des systèmes de suspension et de freinage d'autre part.

Au fur et à mesure que des évolutions s'opèrent en faveur de sources d'énergie propre, des solutions de stockage émergent. Il semble raisonnable de penser que ces solutions verront leur rôle s'amplifier et leur technologie évoluer vers des solutions « intelligentes » permettant d'utiliser au mieux l'énergie produite.

3.3.3 L'hydrogène et la pile à combustible : un pas plus loin sur le nouveau sentier

Lorsqu'il est question d'hydrogène il est très souvent fait référence à l'incendie du dirigeable allemand, « Hindenburg » qui avait brûlé. Or comme l'expérience menée par la NASA l'a montré, l'hydrogène n'est pas en cause. « *Contrary to popular belief — and the findings of two official investigations — the material used to coat the "skin" of the airship, not hydrogen, was the cause of the disaster* » (Van Vorst⁸², UCLA, 1998 : 1).

Le Dr Karl S. Kruszelnicki (2004) confirme le fait que l'hydrogène ne soit pas responsable de cette catastrophe: « *In the terrible disaster, the Hindenburg burnt with a red flame. But hydrogen burns with an almost invisible bluish flame. In the Hindenburg disaster, as soon as the hydrogen bladders were opened by the flames, the hydrogen inside would have escaped up and away from the burning airship - and it would not have not contributed to the ensuing fire. The hydrogen was totally innocent* ».

Ces faits devraient contribuer à modifier positivement l'image de l'hydrogène tel qu'il est perçu par le grand public et conduire à une plus grande acceptation.

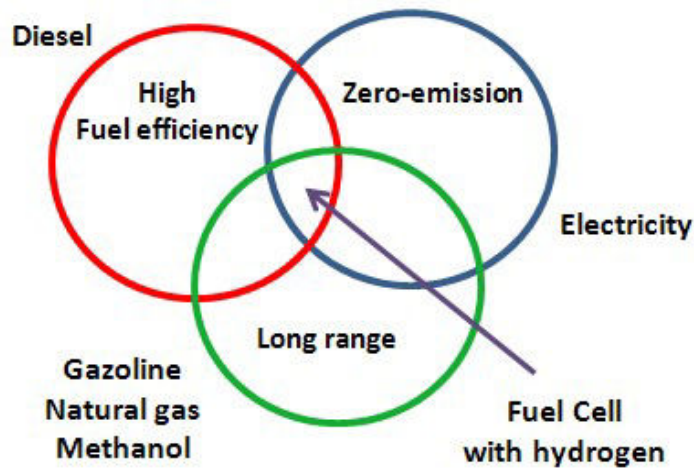
Une des solutions envisagées est produire l'électricité nécessaire à bord du véhicule grâce une « pile à combustible ». « *Une source d'énergie à pile à combustible est un ensemble complexe dont la fonction de base est la conversion d'une énergie de*

⁸² Professor emeritus of chemical engineering at UCLA and Addison Bain, former manager, Hydrogen Programs Kennedy Space Center, NASA.

combustion en énergie électrique, réalisée au sein d'un réacteur électrochimique » (Alphéa⁸³).

Pour Kruse et al. (Figure 3-12) seul l'hydrogène (sous-entendu la pile à combustible à hydrogène) serait de nature à satisfaire les standards en matière de véhicules non polluants. Boucher (2006 : 32) valide cette thèse : « *le partenaire de choix de l'hydrogène est la pile à combustible, convertisseur électrochimique au rendement hors pair. La pile à combustible : 'l'arme antipollution absolue'* ».

Figure 3-12 – Seuls l'hydrogène et les piles à combustible peuvent permettre de respecter les niveaux d'émissions de GES imposés pour des véhicules respectueux de l'environnement

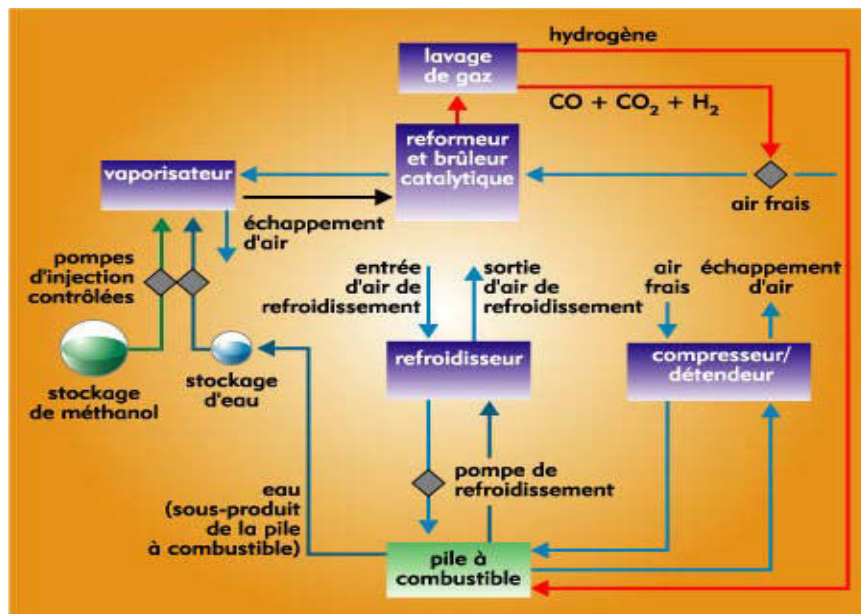


Source : Bjørnar Kruse et al. (2002 : 31)

Les spécificités de la pile à combustible nécessitent un niveau et mobilisent des connaissances techniques propres aux ingénieurs et ne relevant pas de la science économique. Elles sont néanmoins abordées afin de montrer les ruptures technologiques pouvant intervenir dans le domaine de l'automobile. « *Le schéma (Figure 3-13) de la source d'énergie électrochimique du véhicule NECAR 3 de Daimler-Chrysler illustre la complexité de l'ensemble du dispositif en termes de composantes et de connectivité entre les différents circuits* ». (Alpheia).

⁸³ ALPHEA Hydrogène se définit comme « *une équipe de consultants et d'experts qui accompagne les acteurs industriels et institutionnels dans la réalisation de leurs projets et études liés aux nouvelles technologies de l'énergie et plus spécifiquement dans le domaine hydrogène / piles à combustible* » (http://www.alpheia.com/rubrique.php?id_rubrique=1913)

Figure 3-13 - Le système DaimlerChrysler de pile à combustible alimenté au méthanol

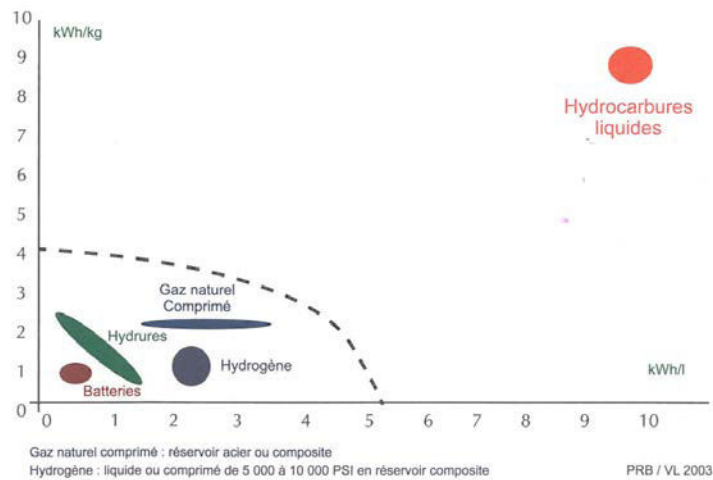


Source : ALPHEA (http://www.alphea.com/upload/e8405_piles_combustible.pdf)

Bien que la pile à combustible puisse présenter de nombreux avantages en matière d'autonomie des véhicules, à l'heure actuelle les avancées les plus significatives se situent au niveau des accumulateurs bien qu'il apparaisse que les « super condensateurs » évoluent plus rapidement que les batteries – « *supercapacitors improving faster than batteries* » (IDTechEx, 22/03/2013), qu'ils ont commencé à remplacer (batteries lithium-ion).

La comparaison des différents « vecteurs énergétiques » utilisés dans les transports en général et dans l'automobile en particulier place les hydrocarbures liquides dans une position nettement favorable par rapport aux vecteurs concurrents (Graphique 3-11). En effet, comme l'avait rappelé Bauquis (2007), « *les hydrocarbures liquides ont une densité énergétique massique 100 fois plus élevée que les batteries. Ainsi, 1kg d'essence contient autant d'énergie que 100 kg de batteries* »

Graphique 3-11 - Les hydrocarbures liquides : une compacité énergétique inégalée



Source : Cahiers Verts de l'Observatoire du Véhicule d'Entreprise (2008 : 23)

Les principales technologies faisant appel à l'électricité, actuellement disponibles sont l'hybride – essence/électrique ou diesel/électrique, dans ses différentes versions et l'électrique « pur ».

Les autres alternatives telles que l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie ou la pile à combustible, si elles constituent des pistes pouvant conduire au « *Zero Emission Vehicle* » (ZEV), sont en cours de développement et encore loin de présenter les avantages des carburants actuels en matière d'efficacité énergétique. Maxton (2004) avait estimé à 100 millions de dollars, le coût de déploiement d'une infrastructure de distribution d'hydrogène sur le territoire américain, ce qui peut constituer un frein à la diffusion d'une telle technologie. À cela vient s'ajouter la nécessité de disposer d'un hydrogène exempt de toutes impuretés car celles-ci sont susceptibles de perturber fortement voire de stopper le fonctionnement de la pile à combustible. Un autre obstacle relevé par l'auteur était que la grande majorité des dispositifs et composants d'une pile à combustible se situaient complètement en dehors du champ de connaissances de l'industrie automobile.

« Seule l'introduction de nouvelles technologies permet de répondre au challenge que représente le respect des normes d'émissions de polluants tout en conservant des véhicules attractifs en termes de consommation donc d'émissions de CO₂ » (PSA, 2013).

Au-delà des voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des voitures suggérées par Beuzit, PSA en janvier 2013 a annoncé la mise au point d'une technologie « *Hybrid Air* » qui selon le directeur de projet Karim Mokaddem offrirait un gain de consommation de 45% en cycle urbain, une efficacité qui tient à une « *physique de gestion de l'énergie* » qui se démarque de la batterie électrique.

Comme cela a été indiqué précédemment, aborder les technologies de rupture conduit à mobiliser les sciences de l'ingénieur sans pour autant quitter le domaine de l'économie et plus particulièrement celui de l'économie de l'innovation. L'explication du fonctionnement du moteur « *Hybrid Air* » s'appuiera donc sur les informations communiquées par PSA Peugeot Citroën lors de la conférence de presse (28/01/2013). « *Schématiquement, le système développé par PSA consiste en une seringue à l'intérieur de laquelle un piston se déplace avec d'un côté de l'huile, de l'autre de l'azote* » (Lagarde, autoactu.com). « *Pendant la décélération, l'énergie qui est perdue est utilisée par les composants hydrauliques pour pousser l'huile et comprimer l'azote. L'accumulateur restituant ensuite l'énergie via l'huile pour faire avancer le véhicule* », explique Karim Mokaddem. Pour le constructeur, il s'agit d'« *une solution innovante full hybride essence. Une étape clé vers la voiture 2l/100 km à l'horizon 2020* ». « *Les hypothèses qui confortent notre business case restent à valider. L'innovation de rupture doit trouver son propre marché. Elle doit être compétitive et correspondre à la demande* » (Mokaddem, 2013).

PSA travaille sur le développement de cette technologie en collaboration avec les équipementiers Bosch et Faurecia. Une des questions qui se pose est celle de sa diffusion. En effet, aussi longtemps que la production se limitera à des « petites séries », le coût en restera élevé. Dans un premier temps PSA pourrait s'inspirer de la stratégie de lancement de la Toyota Prius pour faire découvrir sa nouvelle technologie et en assurer la promotion.

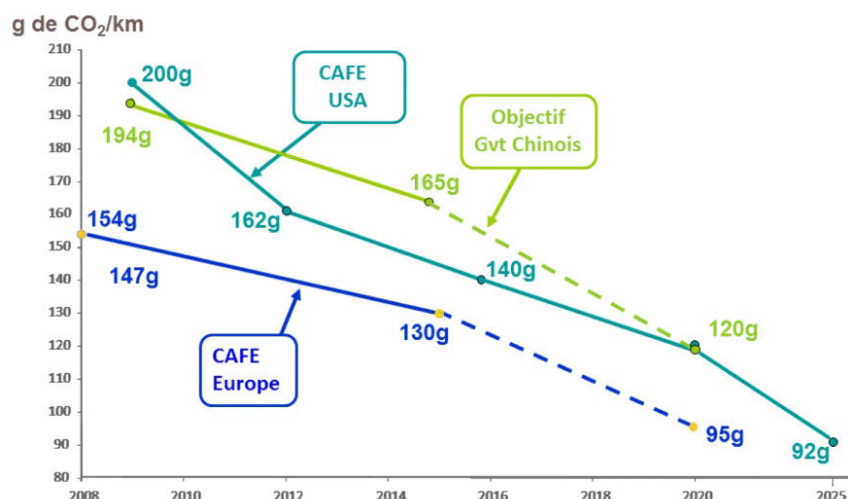
Seule son adoption par d'autres constructeurs et l'adhésion des clients pourra permettre sa diffusion par les rendements croissants d'adoption et en faire baisser le coût grâce aux économies d'échelle. « *L'économie du système dépendra également des séries prévues, ce qui devra inévitablement passer par l'adoption de cette technologie par d'autres constructeurs automobile pour justifier l'investissement des équipementiers* »

(autoactu.com, 28/01/2013). Selon le constructeur, certains freins existaient : « *Les freins dans ce domaine pourraient être l'équipement d'une boîte automatique et d'un moteur essence dans une Europe très diésélisée* ». Les récentes critiques formulées face au diesel et la faible consommation de l'« *Hybrid Air* » sont de nature à lever ce blocage.

« *En 2020, même si les moteurs thermiques représenteront la grande majorité des chaînes de tractions automobiles, l'atteinte des objectifs CAFE nécessitera d'avoir recours aux motorisations full hybrides* » (PSA, Peugeot Citroën, 2013). Les motorisations thermiques utilisant les carburants fossiles ont connu de nombreuses évolutions qui ont abouti à l'amélioration de leur rendement et à la réduction de leurs émissions de GES. L'objectif de 95g de CO₂ à l'horizon 2020 pour l'Europe semble selon les constructeurs, difficile voire impossible à atteindre sans l'introduction de motorisations alternatives.

Comme le souligne Mokaddem, « *il reste des améliorations techniques à réaliser sur les moteurs thermiques mais on ne remplira pas l'objectif européen de 95g en 2020 uniquement avec le moteur thermique* (Graphique 3-12). *Ce serait une erreur stratégique de se focaliser sur une technologie. Nous voulons démontrer avec cette innovation de rupture que nous n'avons pas fini d'explorer tous les moyens de propulsion dans l'automobile* » (Mokaddem 2013).

Graphique 3-12 - Objectifs de réduction des émissions de CO₂ / 2050 – Europe – USA - Chine

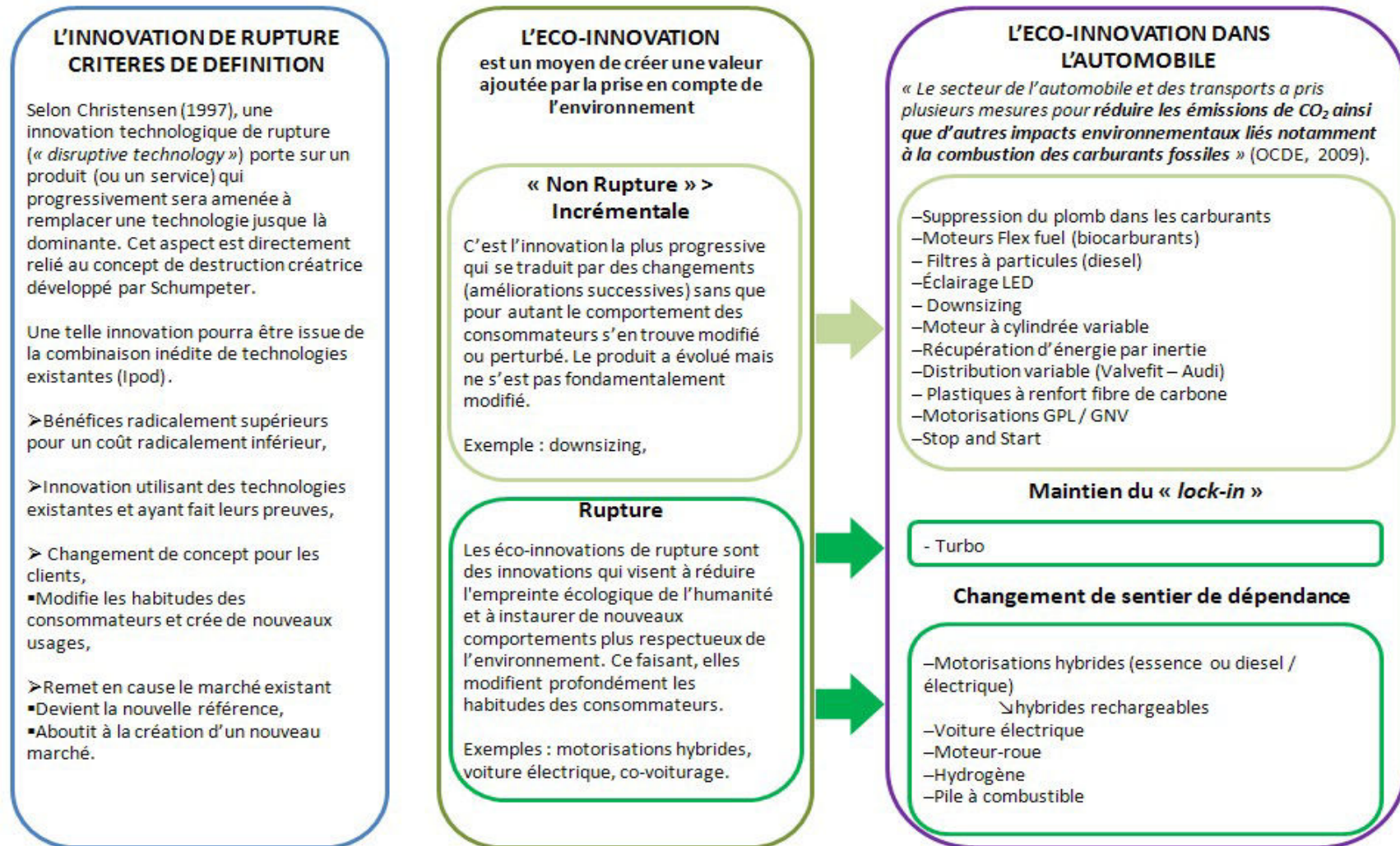


Source : PSA Peugeot Citroën, Dossier de Presse Hybrid Air, 2013 : 2

Cette technologie de rupture a également été conçue en rupture avec les modèles de R&D traditionnels. En effet, comme le souligne le constructeur, « *Hybrid Air a été l'occasion pour PSA Peugeot Citroën d'expérimenter un mode nouveau de pilotage de l'innovation adapté aux besoins d'un projet à fort enjeu* » (PSA, 2013 : 6). Une autre innovation selon l'interprétation schumpétérienne, à savoir une forme d'organisation inédite a été introduite également en rupture, s'est traduite par « *une équipe ' protégée ' pour allier agilité et réussite sur une technologie très en rupture nécessitant de sortir des modes habituels de fonctionnement et des modèles mentaux associés (règles, habitudes, reproduction des acquis, rigidité des cadres managériaux* » (PSA, 2013 : 6).

En guise de conclusion, la figure ci-dessous synthétise l'apport de ce chapitre en rappelant que certaines éco-innovations de rupture sont ici considérées comme à l'origine d'un nouveau sentier de dépendance.

Figure 3-14 – Automobile : Eco-innovation de rupture à l'origine d'un nouveau sentier de dépendance



CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Au terme de ce chapitre, il apparaît que l'automobile tient une place importante dans le paysage industriel tant mondial que français. En faisant de l'automobile un produit de masse, Henry Ford avait souhaité « *the automobile for everybody* ». Si les premières voitures furent électriques, le début du 20^{ème} siècle vit le moteur à combustion interne gagner des parts de marché grâce à l'essence. Bien qu'aujourd'hui l'automobile soit le symbole de l'indépendance et de la mobilité, il faut garder à l'esprit qu'elle joua un rôle décisif pendant la première guerre mondiale, grâce aux Taxis de la Marne.

Les constructeurs, sous la contrainte institutionnelle ont engagé une démarche d'éco-conception visant à intégrer le cycle de vie du produit et à envisager sa déconstruction en vue des opérations de recyclage, dès sa conception. Cette démarche s'inscrit en rupture avec les pratiques existantes, les « casses automobiles » en témoignant. L'étude de la R&D conduite chez les constructeurs et les équipementiers permet de noter que de nombreux brevets portant sur des motorisations alternatives ont été déposés en 2011 et 2012 (Rapport TRDWPI, 2011, 2012).

L'automobile est très fortement dépendante des carburants fossiles dont la combustion est à l'origine des émissions GES et plus particulièrement de CO₂. Elle est amenée à revoir son modèle économique sous la contrainte environnementale. En effet, les émissions de CO₂ ne devraient pas dépasser 95g/km en 2015. L'industrie automobile est également confrontée à la remise en cause de la diésélisation du parc en raison, non seulement du caractère cancérigène des microparticules émises par ces moteurs, mais également compte tenu de l'impact sur la nature (pluies acides, acidification des sols, etc.). Cela conduit à noter l'existence d'un sentier de dépendance vis-à-vis des carburants fossiles.

L'automobile se trouve donc engagée dans une double mutation : d'une part concevoir des véhicules dont le recyclage pourra être effectué de manière simple et dont les matériaux les constituant deviendront des matières premières secondaires, et d'autre part réduire leur consommation pour réduire les émissions de CO₂ qui en résultent. La réduction de la consommation et donc des émissions de GES peuvent résulter de deux actions : la première est le downsizing qui consiste à utiliser des moteurs plus petits (2 ou 3 cylindres), d'une cylindrée inférieure mais dont la puissance est au moins équivalente au moteur remplacé. Le downsizing s'appuie sur l'utilisation du turbo pour

concilier ces différentes contraintes. La deuxième action vise le poids du véhicule. En effet, la réduction de la masse entraîne une réduction de l'énergie consommée pour sa seule mise en mouvement. Ceci peut être obtenu en utilisant des matériaux « allégés » (acier, aluminium) ou composites.

Les pneumatiques du type « *Energy Saver* » de Michelin sont susceptibles de réduire la consommation. Le fabricant de pneumatiques revendique un gain de consommation de 60 litres par rapport à sa précédente génération de pneumatiques et précise qu'il s'agit d'une « *estimation des économies réalisées avec MICHELIN Energy Saver+, par rapport à son prédécesseur, pour un véhicule essence, sur la base des tests TÜV Süd 2012 de résistance au roulement (en 175/65 R 14 T et 195/65 R 15 H) et sur la durée de vie moyenne d'un pneumatique MICHELIN (i.e. 45 000 km - Etude interne 2012)*⁸⁴ ». Il n'en demeure pas moins qu'un pneumatique dont la pression est inférieure aux recommandations du constructeur entraîne une surconsommation outre les risques de dégradation prématurée et d'éclatement.

De même le système « *Stop and Start* » développé par Valéo conduit selon l'équipementier à une réduction de 15% de la consommation en cycle urbain⁸⁵ et de 15% au niveau des émissions de CO₂.

Malgré tous les efforts accomplis et les multiples innovations incrémentales ou de rupture, les véhicules continueront d'utiliser des carburants fossiles et rejeteront toujours des GES et des micro-particules.

Des biocarburants au « pétrole vert » produits à partir des micro-algues, à l'électricité dans ses différentes applications et jusqu'à la pile à combustible, des substituts au « tout pétrole » existent. Des motorisations alternatives ont vu le jour : moteur hybride, électrique, à hydrogène, à air comprimé. Elles constituent toutes des innovations de rupture.

Comment passer d'une industrie automobile en situation de « *lock-in* » dans un « *sentier de dépendance* » marqué par le moteur à combustion interne et les carburants fossiles à une industrie automobile respectueuse de l'environnement ? Il apparaît que le seul

⁸⁴ <http://www.michelin.fr/pneus/michelin-energy-saver-plus#tab-tyres-benefits>

⁸⁵ Le cycle urbain est un cycle normalisé défini par le Règlement 83 de la « United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) ». Il permet de comparer la consommation des véhicules selon des critères identiques.

moyen d'effectuer cette transition soit de quitter le sentier de dépendance actuel pour s'engager sur un nouveau sentier (de dépendance ou d'innovation) basé sur les éco-innovations et que les éco-innovations de rupture seraient le déclencheur de ce changement de sentier.

CONCLUSION GENERALE

L'automobile aux États-Unis plus qu'ailleurs dans le monde est un symbole fort. Alors que le pays était durement frappé par la crise des « *subprime*, », en août 2008, les « *Big Three* » Général Motors, Ford et Chrysler sont intervenus auprès du gouvernement américain afin d'obtenir un prêt de 25 milliards de dollars et de bénéficier du programme d'aide à l'industrie automobile « *Advanced Technology Vehicles Manufacturing Incentive Program* » destiné aux entreprises « *adaptant leurs usines à la construction de véhicules moins gourmands en carburant* », voté par le Congrès en décembre 2007. Afin de soutenir le marché, le Congrès américain avait voté un budget supplémentaire au programme de prime à la casse « *cash for clunkers* »⁸⁶, portant l'enveloppe totale à 3 milliards de dollars.

En 2012, Ford annonçait avoir « *connu sa plus importante progression sur le segment des voitures les plus économes en carburant et les voitures hybrides* ». GM notait « *nos petites voitures ont connu une croissance de leurs ventes de 52%* ». De son côté, Chevrolet indiquait avoir vendu 23 500 modèles « *Volt* » soit trois fois plus que l'année précédente et Toyota reconnaissait avoir plus que doublé ses ventes de Prius avec

⁸⁶ Système comparable à la prime à la casse française. Un rabais pouvant aller jusqu'à 4 500 dollars était offert aux clients qui remplaçaient leur vieille voiture par une neuve.

240 000 véhicules vendus et dépassé le seuil des 3 millions au niveau mondial, faisant de ce modèles un nouveau « standard » en matière de « *véhicule respectueux de l'environnement* » servant de modèles à ses concurrents. Pour le journaliste automobile Nicolas Meunier, (2012) « *C'est un fait. La Toyota Prius s'est imposée dans l'esprit du public comme le paradigme de la voiture écologique. Privilège du pionnier mais aussi fait avéré* ». Que ce soit aux États-Unis, en Europe ou en Asie, force est de constater que les constructeurs automobiles sont désormais trop fortement engagés sur les innovations les plus récentes, lesquelles vont vers le même sens, celui d'une automobile décarbonée. Tous les constructeurs automobiles y compris les américains se sont investis sur l'hybride (Chanaron, Teske, 2007) qui constitue une étape incontournable sur cette voie.

L'objectif de la thèse était de montrer que le secteur automobile confronté à un double défi a été contraint d'amorcer un changement de sentier de dépendance. Tout d'abord, la prise de conscience de la nécessité de ralentir fortement les émissions de gaz à effet de serre qui s'est traduite par la ratification du protocole de Kyoto, a mis l'automobile aux premiers rangs des pollueurs en ce qui concerne le transport de personnes. En effet, ce mode de déplacement, outre le CO₂, est à l'origine de nombreuses pollutions atmosphériques non seulement lors de son utilisation mais également au cours de sa production. En second lieu, l'automobile ne peut ignorer la fin annoncée des ressources pétrolières, les carburants fossiles étant la principale pour ne pas dire la seule source d'énergie utilisée en même temps qu'une source d'émissions de gaz à effet de serre. Les mesures gouvernementales mises en place en faveur d'une transition énergétique sont également de nature à impacter ce secteur. Certains constructeurs, qu'ils s'adressent à des niches comme Tesla, ou qu'ils soient « généralistes » comme Toyota ont anticipé cette transition en mettant sur le marché des modèles constituant des innovations de rupture par rapport au modèle dominant.

En combinant cette double nécessité, réduire les pollutions et trouver des solutions alternatives au pétrole, l'automobile est conduite à changer de sentier de dépendance en engageant des grappes d'éco-innovations de rupture.

- **Le premier chapitre** de la thèse a permis de poser les fondements de l'analyse Schumpétérienne de l'innovation et de définir les différents concepts qui seront utilisés dans cette thèse et d'établir les différences existant entre deux des concepts fondamentaux mobilisés, « *innovation incrémentale* » et « *innovation de rupture* ». Cette distinction est d'autant plus importante qu'elle permet d'appréhender ce qu'est une « *éco-innovation de rupture* ». La pensée de Schumpeter a été reprise par des économistes tels que Nelson et Winter qui souhaitaient inclure la « composante » dynamique dans l'analyse. Ce courant qui s'inscrit dans une analyse économique « évolutionniste » (en référence à Darwin), est à l'origine de plusieurs concepts tels que le « *path dependence* » (sentier de dépendance), les phénomènes de « *lock-in* » (verrouillage), le « *régime technologique* ». Il montre également que la pensée développée par les économistes évolutionnistes complète celle de Schumpeter, ce qui constitue le socle théorique de cette thèse, en raison de la cohérence épistémologique existant entre ces auteurs.

- **Le deuxième chapitre** a permis de montrer que l'automobile ne pouvait plus raisonner uniquement en termes d'innovation mais sous l'angle des « éco-innovations ». De plus, les interactions entre les différents acteurs de la recherche conduisant à des échanges et à des synergies, il est pertinent d'étudier l'insertion de l'innovation dans les systèmes nationaux d'innovation et plus particulièrement dans les systèmes sectoriels d'innovation qui en découlent. Il est intéressant dans ce contexte, de mobiliser les approches développées par les économistes évolutionnistes.

- **Le troisième chapitre** de la thèse, en analysant les innovations apparaissant dans l'automobile a mis en lumière l'émergence d'éco-innovations et plus particulièrement d'éco-innovations de rupture. Si certaines comme le turbo n'ont pas permis de rompre le « lock-in » sur le sentier de dépendance précédent (motorisations à combustion interne/énergies fossiles), d'autres vont permettre au contraire l'amorce d'un nouveau sentier de dépendance vers une automobile décarbonée, la motorisation hybride constituant une phase de transition « énergétique » entre les deux sentiers.

L'actualité récente vient ainsi renforcer les résultats de la thèse. Toyota annonçait en septembre 2013 un prototype électrique basé sur la Yaris, développant 400 chevaux avec une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres.

En matière de batteries, un prix de 3.4 millions de dollars pour récompenser les recherches effectuées et réaliser des avancées significatives sur l'autonomie des véhicules électriques, leur sécurité, réduire les coûts et simplifier les procédures de recharge a été attribué à *l'Illinois Institute of Technology* (IDTechEx, 30 septembre 2013). Parallèlement, de nouvelles technologies de rupture voient le jour afin de renforcer l'autonomie des batteries en attendant de les remplacer. Les « supercapacitors » (super-condensateurs) qui dans l'immédiat augmentent significativement l'autonomie des voitures électriques, devraient permettre à terme de recharger le véhicule dans le même temps que celui nécessaire pour effectuer un plein en carburant (IDTechEx, octobre 2013). Ces composants, selon l'Imperial College of London seraient de nature à apporter un gain d'autonomie de 50% à 100% en fonction des différentes versions. Des essais réalisés par le constructeur nippon Toyota sur une Yaris « *full electric* » ont démontré un gain d'autonomie de 100%. Facteur non négligeable, les supercapacitors auraient une durée de vie équivalente à celle du véhicule. L'optimisation de chacun des systèmes devrait permettre selon les ingénieurs, de parvenir à une autonomie équivalente à celle d'un véhicule thermique. Cette éco-innovation de rupture intéresse de nombreux constructeurs dont SsangYong qui a annoncé à l'occasion du Salon International des Technologies Environnementales et de l'Energie Verte (Envex) 2013, le lancement d'un SUV électrique équipé d'un « prolongateur d'autonomie » pour 2015, sa gamme complète devant être équipée en 2016 (autoactu.com, 11 juillet 2013).

Enfin, et bien qu'il soit encore difficile de connaître l'avenir de cette technologie, le graphène (dérivé du graphite) semble pouvoir avec les supercapacitors constituer une alternative aux batteries actuelles dont les électrolytes constituent une au nombre de recharges et par voie de conséquence à la durée de vie des batteries.

Il est désormais possible d'affirmer qu'une voiture électrique peut afficher une autonomie comparable à celle d'un véhicule équipé d'un moteur thermique. En effet, le « Véhicule de l'Année américain 2013 » est une Tesla « S » dont la carrosserie en

aluminium – en raison des gains de poids, offre une autonomie de 502 kilomètres⁸⁷. Selon le constructeur, les batteries occupent un volume si faible que la voiture est dotée de deux coffres outre un haut niveau de confort. Celles-ci bénéficient d'une garantie à vie et ne nécessitent aucun entretien⁸⁸. Tesla affirme qu'en raison de son autonomie, il est aisé pour tout utilisateur de brancher son véhicule la nuit, « *comme il le ferait pour son téléphone portable* ». Certes le prix reste un obstacle à la diffusion d'un tel modèle – de 50 à 70 000 US dollars, mais pourrait séduire des clients à la recherche d'un modèle d'exception⁸⁹.

Au-delà du caractère particulièrement innovant d'un tel véhicule surtout sur le plan environnemental, il faut se souvenir que de nombreuses innovations ont vu le jour sur des véhicules « de niche » avant de se diffuser.

Le 19 septembre 2013, BPI France, l'ADEME et le Ministère du Redressement Productif ont annoncé le lancement du « *Cinquième appel à projets destiné à soutenir des projets collaboratifs d'éco-innovations synonymes de plus grand respect de l'environnement et susceptibles de faire l'objet de lancements commerciaux d'ici à 2016 ou 2018* ». Il est intéressant de noter que cet appel souligne que les thématiques retenues devront porter soit sur « *l'anticipation de la préservation des ressources naturelles, soit la réduction des impacts et la gestion des ressources naturelles [...] soit enfin l'éco-conception et la production industrielle durable* » et précise que « *les projets attendus doivent apporter des réponses à des enjeux environnementaux et associer au minimum deux entreprises (PME ou ETI) et un laboratoire ou un organisme public de recherche* ». Le budget total de 8,2 millions d'euros a été mobilisé par l'ADEME d'une part et BPI France d'autre part.

⁸⁷ Version équipée de batteries 85kw/h

⁸⁸ http://www.teslamotors.com/fr_FR/models/features#/battery

⁸⁹ Par comparaison le prix de la 911 turbo, 2013 est de 163 000 euros

BIBLIOGRAPHIE

- Abernathy, W.J., Utterback, J.M., 1978. Patterns of Industrial Innovation. *Technology Review* 80, p.40–47.
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., Hemous, D., 2009. The Environment and Directed Technical Change. *NBER Working Paper*, n°15451. 66 p.
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., Hemous, D., 2012. The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, n°102, p.131–166.
- AFSSET, 2009. *Émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel - Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel et aspects sanitaires associés*, Saisine n°2006-009). Maisons Alfort.
- Aghion, P., 1989. A model of growth through creative destruction, *Econometrica*. p.323-351.
- Aghion, P., 2011. *Repenser l'état: pour une social-démocratie de l'innovation*. Seuil, Paris, 119p.
- Aghion, P., Bureau, D., Pertuis, C.D., Giraud, P.-N., Godard, O., Guesnerie, R., Schubert, K., 2009. *Les économistes peuvent-ils sauver la planète?* Éditions La Découverte, 260 p.
- Aghion, P., Hemous, D., Veugelers, R., 2009. Quelles politiques pour encourager l'innovation verte?, *Regards Croisés sur l'Économie*, La Découverte, p.165-174.
- AIRPARIF, 2011. Rapport particules [Document électronique]. URL <http://www.airparif.fr/_pdf/publications/rapport-particules-110914.pdf> (accessed 10.5.11). 172 p.
- Al-Saleh, Y., 2010. Systems of innovation as a conceptual framework for studying the emergence of national renewable energy industries. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development* 7, p.309–334.
- Alleau, T., 2007. *L'hydrogène, énergie du futur ?*, Bulles de sciences. EDP sciences, Les Ulis, 206 p.
- Amable B. (dir.), 2003. « Les systèmes d'innovation », in P. Mustar et H. Penan, *Encyclopédie de l'innovation*, éditions Économica, 749 p.

- Amable, S., Boudrandi, S., Mathieu, A., 2011. L'adoption d'Eco-Innovations: approche par les figures imposées des référentiels gestionnaires. *XXe conférence de l'AIMS, Nantes*, 26 p.
- Ambec, S., Lanoie, P., 2008. *L'innovation au service de l'environnement et de la performance économique*. INRA Sciences Sociales, n°6/07, 4p.
- Andersen, E.S., 1996. *Evolutionary economics: post-Schumpeterian contributions*. Pinter, 238 p.
- Andersen, M.M., 2004. *An Innovation System approach to Eco-innovation – Aligning policy rationales*. Presented at the The Greening of Policies - Interlinkages and Policy Integration Conference, 3-4 décembre 2004, Berlin, Germany, 28 p.
- Andersen, M.M., 2010. Eco-innovation Dynamics - Creative Destruction and Creative accumulation in green Economic Evolution, in: *Innovation, Organization, Sustainability and Crises. Presented at the Schumpeter Conference 2010*, Aalborg June 21-24, 2010, Aalborg, Denmark, 26 p.
- Arena, R., Lazaric, N., 2003. La théorie évolutionniste du changement économique de Nelson et Winter. *Revue économique*, 54,329–354.
- Arthur, W.B., 1988. Self-Reinforcing Mechanisms in Economics, in: *The Economy as an Evolving Complex System*. Addison - Wesley, p 9–29.
- Arthur, W.B., 1989. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The Economic Journal*, 116–131.
- Arthur, W.B., 1999. Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal* 99, 116–131.
- Arundel, A., Kemp, R., 2009. Measuring eco-innovation. United Nations University - *MERIT, Working Paper Series*.
- Bardou, P., Chanaron, J.-J., Fridenson, P., Laux, J.M., 1977. *La Révolution automobile*, A. Michel, Paris, 384 p.
- Bartels, G. C, Nelissen, W.J.A., 2002. *Marketing for sustainability towards transactional policy-making*. IOS Press; Ohmsha, Amsterdam; Washington, D.C.; Tokyo, 550 p.
- Baumol, W.J., Panzar, J.C., Willig, R.D., June1982. *Contestable markets and the theory of industry structure*. Harcourt College Pub, New York, 510 p.
- Baupin, D., 2007. *Tout voiture, no future*. Archipel, Paris, 240 p.

- Bauquis, P.-R., 2007. Pétrole, Gaz et énergie nucléaire : défis et idées reçues. *Conférence "Visiatome,"* Marcoule, 15 mars 2007 34 p.
- Belin, J., Horbach, J., Oltra, V., 2011. Determinants and Specificities of Eco-innovations – An Econometric Analysis for the French and German Industry based on the Community Innovation Survey. *Cahiers du GREThA*, 21 p.
- Belis-Bergouignan, M.-C., 2009. Analyse évolutionniste de la dynamique sectorielle. *Cahiers du GREThA*, 2009-18. 28p.
- Belis-Bergouignan, M.-C., Bordenave, G., Lung, Y., 1990. Ford est-il toujours «fordiste?». *Revue d'Economie Industrielle*, 52, 23–38.
- Bélis-Bergouignan, M.-C., Jullien, B., Lung, Y., Yildizoglu, M., 2011. *Industries, innovations, institutions éléments de dynamique industrielle*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux.
- Bergeron, L., Maiullari-Pontois, M.-T., 2000. *Le patrimoine industriel des États-Unis*. Hoëbeke. 288 p.
- Bernard, J., Catin, M., 1998. *Les conditions économiques du changement technologique*. Éditions L'Harmattan, 306p.
- Berthaud P. (1992) *Essai sur l'évolution de l'économie globale à partir de l'étude de sa composante pétrolière*, Thèse, UPMF.
- Berthaud, P., Cavard, D., Criqui, P., 2004. Le régime international pour le climat, vers la consolidation ou l'effondrement? *Revue Française d'Économie*, 19, p.163–188.
- Beuzit, P., 2007. *Hydrogène, l'avenir de la voiture*. L'Archipel, Paris, 203 p.
- Bisson, M., Bureau, J., Del Gratta, F., Lefevre, J.P., Levilain, A., 2011. *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques - Oxydes d'azote NOx*. INERIS.
- Bisson, T.A., 1976. Zaibatsu dissolution in Japan. *The Far Eastern Quarterly* , 14- 1, p.115-117 Greenwood Press, Westport, Conn.
- Bolloré, V., 2013. La BlueCar, une vitrine pour les batteries Bolloré. http://www.lesechos.fr/21/02/2013/lesechos.fr/0202581416954_la-bluecar--une-vitrine-pour-les-batteries-bollore.htm, consulté le 21 février 2013
- Bonnafos de, G., Chanaron, J.J., Mautort de, L., 1983. *L'industrie automobile*. Éditions La Découverte/Maspero, Paris, 127 p.

- Borloo, J.-L., Estrosi, C., 2010. *Plan de développement des véhicules électriques et hybrides: engagement de 12 collectivités à installer les premières prises dès 2010 et lancement de la première commande de 50.000 véhicules électriques*. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer – Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, 4 p.
- Boucher, S., 2006. *La révolution de l'hydrogène: vers une énergie propre et performante ?* Éditions du Félin-Kiron, Paris, 158 p.
- Boulding, K.E., 1991. What is evolutionary economics ? *Journal of Evolutionary Economics* 1, p.9–17.
- Bourgue, V., 1978. L'automobile : problème d'aujourd'hui et de demain. *Futuribles*, 16, 387-399
- Boussena, S., 2011. Problématique pétrolière mondiale : coopérations, conflits. *Conférence du 21 Mars 2011-Grenoble* (France).
- Boutillier, S., Djellal, F., Laperche, B., 2012. L'Innovation verte de la théorie aux bonnes pratiques, in : *Business Innovation*. P.I.E Peter Lang, 401 p.
- Breschi, S., Malerba, F., Orsenigo, L., 2000. Technological Regimes and Schumpeterian Patterns of Innovation. *The Economic Journal* 110, p.388–410.
- Brodagh, C., Breuil, F., Gondran, N., Ossama, F., 2004. *Dictionnaire du développement durable*, MultiMondes. ed. AFNOR.
- Carlos Ghosn, 2012- *Cité de la Réussite 2010 - 1/3*.
- CCFA, 2012. *L'industrie automobile française - Analyse et Statistiques 2012*.
- Chanal, V., Mothe, C., 2005a. Concilier innovations d'exploitation et d'exploration. Le cas du secteur automobile. *Revue Française de Gestion* 31, 173–191.
- Chanal, V., Mothe, C., 2005b. Comment concilier innovation d'exploitation et innovation d'exploration: une étude de cas dans le secteur automobile. *Revue Française de Gestion* 31, p.173–191.
- Chanaron J.J., 1981. Contribution méthodologique à la mesure des emplois directement et indirectement impliqués par l'automobile, *Notes de travail*, IREP-D, Grenoble,
- Chanaron, J.-J., Lung, Y., 1995. *L'Économie de l'automobile*, Collection Repères n°171, La Découverte, Paris, 125 p.

- Chanaron, J.J., Teske, J., 2007. Hybrid vehicles: a temporary step. *International Journal of Automotive Technology and Management* 7, 268-288
- Chatelain, A., 1950. L'industrie automobile française. *Revue Géographique – Bulletin de la Société de Géographie de Lyon et de la région lyonnaise*, 25, 106–112.
- Chatriot, A., Duclert, V., 2006. *Le gouvernement de la recherche : histoire d'un engagement politique, de Pierre Mendès France au général de Gaulle (1953-1969)*. La Découverte, Paris, 418 p.
- Chevalier J.M. (2004) *Les grandes batailles de l'énergie*, Gallimard, 472p.
- Christensen, C.M., 1997. *The Innovator's Dilemma: The Revolutionary Book That Will Change the Way You Do Business*, Reprint 2011. ed. HarperBusiness, 336 p.
- CITEPA, 2008. *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – séries sectorielles et analyses étendues, rapport d'inventaire national*, SECTEN, rapport d'Inventaire National, 289 p.
- CITEPA, 2009. *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – séries sectorielles et analyses étendues, rapport d'inventaire national*, SECTEN, rapport CITEPA, 305 p.
- CITEPA, 2010. *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – séries sectorielles et analyses étendues, rapport d'inventaire national*, SECTEN, rapport CITEPA. 316 p.
- Cohen, W.M., Levinthal, D.A., 1990. Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35, p.128–152.
- Cooper, R., 1998. *Product leadership : creating and launching superior new products*. Perseus, Reading Mass.; Oxford.
- Coriat, B., 1979. *L'Atelier et le chronomètre : essai sur le taylorisme, le fordisme et la production de masse*, Cibles. C. Bourgois, Paris, 302 p.
- Coriat, B., 1986. Le grand laboratoire de l'après-taylorisme. *Le Monde Diplomatique*, p.13–14.
- Coriat, B., 1992. *“Penser à l'envers” : travail et organisation dans l'entreprise japonaise*. Bourgois, Paris, 185 p.
- Cornaert, J.-J., 2010. *L'avenir de l'automobile, 25 questions décisives*. Armand Colin, Paris, 160 p.

- Coulibaly, T., Dantec, R., 2007. *Il y a un siècle, l'automobile*. Éd. Ouest-France, Rennes, 138 p.
- Crow, M., Saviotti, P., Bellon, B., Niosi, J., 1992. Les systèmes nationaux d'innovation: à la recherche d'un concept utilisable. *Revue Française d'Économie* 7, 215–250.
- D'Angelo, R., Zarbo, R., 2007. The Henry Ford Production System: Measures of Process Defects and Waste in Surgical Pathology as a Basis for Quality Improvement Initiatives. *American Journal of Clinical Pathology*, 128, 423–429.
- Daron, A., Philippe, A., Leonardo, B., David, H., 2010. The Environment and Directed Technical Change., Institute for International Economic Studies, Stockholm University, *Seminar Papers*, N°. 0762, 58 p.
- David G., 2013. *Valoriser la chaleur fatale dans les procédés industriels grâce à la technologie du Cycle Organique de Rankine* [Document électronique]. URL <<http://www.actu-environnement.com/ae/news/gilles-david-chaleur-fatale-cycle-organique-de-rankine-17896.php4>> (accessed 2.27.13).
- David, P., A., 1985. Clio and the Economics of QWERTY. *American Economic Review*, 75, 332–337.
- David, P.A., 1988. *Path-dependence: Putting the Past Into the Future of Economics*, National Science Foundation. ed., 62p.
- Depret, M.-H., Hamdouch, A., 2009. Quelles politiques de l'innovation et de l'environnement pour quelle dynamique d'innovation environnementale ? *Innovations*, 29, 127-147.
- Devalan, P., 2006. *L'innovation de rupture : clé de la compétitivité*. Lavoisier ; Hermes, Paris, 192 p.
- Dibiaggio, L., Nasiriyar, M., 2008. Entrepreneurship and innovation - Organizations, institutions, systems and regions, in: *Technological Regime and Innovative Pattern in the semiconductor industry*. Presented at the DRUID 25th Celebration Conference, Copenhagen, CBS, Denmark, 33 p.
- Diemer, A., 2012. La technologie au cœur du développement durable : mythe ou réalité ? *Innovations*, 37, 73–94.
- Diemer, A., Labrune, S., 2007. L'écologie industrielle : quand l'écosystème industriel devient un vecteur du développement durable. *Développement durable et territoires*. 22 p.

- Direction Générale du Trésor et de la Politique Economique, 2010. *La Performance de l'Industrie Automobile* (Notes Bleues). Minefi.
- Dopfer, K., 2005. Evolutionary economics: a theoretical framework, in: *The Evolutionary Foundations of Economics*. Cambridge University Press, 3–56.
- Dosi, G., Nelson, R.R., 1994. An introduction to evolutionary theories in economics. *Journal of Evolutionary Economics* 4, 153–172.
- Doucet, P., 2012. La promesse de l'algue. *Le Figaro.fr*, <http://www.lefigaro.fr/automobile/2012/04/13/03001-20120413ARTFIG00486-la-promesse-de-l-algue.php>, consulté le 15 avril 2012.
- Dresner, S., 2008. *The principles of sustainability*. Earthscan, London; Sterling, VA, 224 p.
- Durand, T., 1992. *Encyclopédie du Management - Stratégie et Technologie*. Vuibert.
- Congrès européen « Eco-technologies pour le futur », 2011, Lille, 7 juin.
- Erkman, S., 2004. *Vers une écologie industrielle*. Editions Charles Leopold Mayer, 251 p.
- Ernult, J., Ashta, A., 2007. Développement durable, responsabilité sociétale de l'entreprise, théorie des parties prenantes : évolution et perspectives. *Cahiers du CEREN*, 21, p. 4–31.
- Ettlie, J.E., 2006. *Managing Innovation*, Second Edition: New Technology, New Products, and New Services in a Global Economy, 2nd ed. Taylor & Francis, 528 p.
- European Environment Agency, 2012. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report*, No. 12/2012, 304p.
- Faber, N., Jorna, R., van Engelen, J., 2005. The sustainability of “unstainability” - a study into the conceptual foundations of the notion of “sustainability”. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 7, 1–33.
- Fagerberg, J., 2002. A Layman's Guide to Evolutionary Economics. Industrial R&D and innovation Policy learning, in *Evolutionary Perspectives and New Methodes for Impact Assesment*, Leangkollen, Asker, 50 p.
- Fagerberg, J., 2003. Schumpeter and the revival of evolutionary economics: an appraisal of the literature. *Journal of Evolutionary Economics*, 13-2, p.125–159.

- Fagerberg, J., Mowery, D., Verspagen, B., 2008. Innovation-systems, path-dependency and policy: The co-evolution of science, technology and innovation policy and industrial structure in a small, resource-based economy. *Prime-Latin America Conference, Mexico City*, 27p.
- Faucheux, H. Joumni (2005) « *Economie et politique des changements climatiques* », coll. Repères, La Découverte, 128 p.
- Figuière, C. Météreau, R. (2013 à paraître) Au carrefour de l'écologie industrielle et du Syal, *Développement durable et territoires*, dossier spécial Ecologie industrielle.
- Figuière, C., Rocca, M. (2011). Quatre propositions pour préciser le projet de socio-économie politique du développement durable, Colloque "*Le Développement durable vu par les économistes : débats et controverses*", Université Blaise Pascal, IUFM Auvergne, Chamalières, 15-16 décembre 2011, 14 p
- Ford, H., 1925. *Ma vie et mon oeuvre*. Payot.
- Ford, H., Crowther, S., 1922. *My Life and Work*. Doubleday, Page & Company, 31 1p.
- Foxon, T., Andersen, M.M., 2009. The Greening of Innovations for Eco-innovation towards an Evolutionary Climate Mitigation Policy, in: *Innovation and Knowledge*. Presented at the DRUID Summer Conference 2009, Copenhagen, 36 p.
- Freeman, C., 1987. *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. Pinter Pub Ltd, 168 p.
- Freeman, C., Perez, C., 1986. The diffusion of technological innovations and changes of techno-economic paradigm. *Conference on Innovation Diffusion*, Venice.
- Freyssenet, M., 1996. Du Toyotisme réel à un nouveau Toyotisme? *Actes du Gerpisa- 8*, p.9-27
- Fujimoto, T., 1999. *The evolution of a manufacturing system at Toyota*. Oxford University Press, USA, New York, 400 p.
- Fussler, C., James, P., 1996. *Driving eco-innovation : a breakthrough discipline for innovation and sustainability*, Financial Times/Prentice Hall. ed. Pitman, London, 384 p.
- Futuribles, 2003. La civilisation automobile. In : *Étude prospective des évolutions de la société française (1950-2030)*. Ed. Futuribles, Paris, 297-310.

- Gallois, L., 2012. Le problème en France, c'est le diesel [Document électronique]. *Le Point.fr*. URL <http://www.lepoint.fr/auto-addict/strategie/competitivite-gallois-le-probleme-en-france-c-est-le-diesel-07-11-2012-1526371_659.php> (accessed 6.28.13).
- Geels, F.W., 2004. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems. *Research Policy* 33, p.897–920.
- Georghiou, L., Metcalfe, S.J., Gibbons, M., Ray, T., Evans, J., 1986. *Post-innovation performance: technological development and competition*. Palgrave Macmillan, Basingstoke, 315 p.
- Ghosn, C., 2012. *Comment se réinventer pour durer?*
<http://www.renault.com/fr/Groupe/Pages/industrie-automobile-se-reinventer-pour-durer.aspx>
- Godard, O., 2002. Le Développement Durable et les entreprises. *Revue des Deux Mondes*. 101–128.
- Graham, E.M., Richardson, J.D., 1997. *Global competition policy*. Institute for International Economics, Washington DC, 235-269.
- Gray, W.B., Shadbegian, R.J., 1998. Environmental regulation, Investment timing and Technology choice. *The Journal of Industrial Economics*, 46, 235–256.
- Griliches, Z., 1957. Hybrid Corn: An Exploration in the Economies of Technological Change. *Econometrica*, 25-4, 501-522.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Organisation météorologique mondiale.; Programme des Nations Unies pour l'environnement., Pachauri, R., 2008. *Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse*. GIEC, Genève, 114 p.
- Grübler, A., 1998. *Technology and Global Change*. Cambridge University Press, 464 p.
- Hall, B.H., Khan, B., 2002. Adoption of a new technology, in: *New Economy Handbook*.
- Hanusch, H., Pyka, A., ed. *Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*. Edward Elgar Publishing, 1229 p.
- Harrop, P., Das, R., 2012. Electric Vehicles 2012-2022. *IDTecEx*.
- Hayek, F.A., 1945. The Use of Knowledge in Society. *American Economic Review* XXXV-4, 519–530.

- Hekkert, M., van den Hoed, R., 2004. Competing Technologies and the Struggle towards a new dominant design: the emergence of the hybrid vehicle at the expense of the fuel cell vehicle? *Greener Management International* 47, 29–43.
- Hekkert, M.P., Suurs, R.A.A., Negro, S.O., Kuhlmann, S., Smits, R.E.H.M., 2007. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 413–432.
- Hellström, T., 2007. Dimensions of environmentally sustainable innovation: the structure of eco-innovation concepts. *Sustainable Development*, 15, 148–159.
- Hindenburg & Hydrogen [Document électronique], 2004. URL <<http://www.abc.net.au/science/articles/2004/02/26/1052864.htm>> (accessed 5.2.13).
- Holweg, M., 2007. The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, 25, 420–437.
- Horbach, J., Rammer, C., Rennings, K. 2012. Determinants of Eco-innovations by Type of Environmental Impact The Role of Regulatory Push/Pull, Technology Push and Market Pull. *Ecological Economics*, 78, 112-122
- Huber, J., 2004. *New Technologies and Environmental Innovation*. Edward Elgar Publishing, 384 p.
- Iachini, J., 2003. Starting the “fire” under an unmotivated employee. *Occupational Health and Safety*, 72, 18–20.
- IDTechEx, 2013. *Boeing Dreamliner: Implications for electric vehicles - Electric Vehicles Research* [Document électronique]. URL <<http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/boeing-dreamliner-implications-for-electric-vehicles-00005110.asp?sessionid=1>> (accessed 3.18.13).
- IDTechEx, 2013. *Supercapacitors increase range of electric vehicles* [Document électronique]. URL < <http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/supercapacitors-increase-range-of-electric-vehicles-00005861.asp> > (accessed 10.05.13).
- Ili, S., Albers, A., Miller, S., 2010. Open Innovation in the Automotive Industry. SSRN eLibrary, *R&D Management* 40, 246–255.

- Imai, M., 1986. *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill New York, 259 p.
- Innovations*, 2013. À propos..., n°40, p. 213–231.
- INRA, 2008. L'innovation au service de l'environnement et de la performance économique, *INRA Sciences Sociales*, 6/07-02.
- Institut Charles De Gaulle., 1992. De Gaulle en son Siècle, Actes des Journées internationales tenues à l'Unesco Paris, 19-24 novembre 1990 3, *Moderniser la France*. La Documentation Française. Plon, Paris.
- Jacot, J., 2002. La fonction d'entrepreneur: Schumpeter revisité. *2ème Congrès de l'Académie de l'Entrepreneuriat*, Université Montesquieu – Bordeaux IV, 9 p.
- Jacot, J.-H, 1990. *Du fordisme au toyotisme?: les voies de la modernisation du système automobile en France et au Japon*. La Documentation Française, Paris, 438 p.
- Joller, L., 2012. Eco-innovation in business models—theoretical considerations. *DRUID Academy Conference*, University of Cambridge, UK, 1–10.
- Jolly, D., 2008. A la recherche du design dominant. *Revue française de gestion*, 34, 13–31.
- Journal Officiel*, 2012. Arrêté du 9 mars 2012 concernant les dispositions relatives à la construction des véhicules, composants et équipements visant l'élimination des véhicules hors d'usage.
- Jullien, B., Lung, Y., 2011. *Industrie Automobile – La croisée des chemins*. La Documentation Française, 132 p.
- Kaspi, A., 1990. Henry Ford, le roi de l'automobile. *L'Histoire*-136, 34–46.
- Kemp, R., 1994. Technology and the transition to environmental sustainability. The problem of technological regime shifts. *Futures* 26-10, 1023–1046.
- Kemp, R., Pearson, P., 2007. *Final Report MEI project about measuring eco-innovation*, 120 p.
- Keynes, J.M., 1930. *Essays in persuasion*. W.W. Norton & Company, London, 208 p.
- Kline, D., 2001. Positive feedback, lock-in and environmental policy. *Kluwer Academic Publishers, Policy Sciences* 34, p.95–107.
- Komiyama I., Kraines, S., 2008. *Vision 2050 - Roadmap for a Sustainable Earth*, Springer Verlag. ed., 176 p.

- Kruse, B., Grinna, S., Buch, C., 2002. *Hydrogen: status og muligheter* (No. 6-2002). Bellona Foundation, 53 p.
- Kurz, H.-D., 2010. *Innovation, knowledge and growth: Adam Smith, Schumpeter and the moderns*. Routledge, London, 201 p.
- L'Usine Nouvelle, 1997. Le "Toyotisme", la référence de l'organisation industrielle. *L'Usine Nouvelle* n°2620.
- La question politique en économie internationale, 2006. , Collection Recherches. La Découverte, Paris.
- Lacey, R., 1987. *Ford: la fabuleuse histoire d'une dynastie*. Presses de la Cité, Paris, 433p.
- Lachat, S., Lachat, D., 1997. *Stratégies de rupture et innovations dans la firme*. Éditions L'Harmattan, 353 p.
- Laforest, V., 1999. *Technologies propres: Méthodes de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents. Application aux ateliers de traitement de surface*. Thèse de Doctorat, 293p.
- Laforest, V., Berthéas, R., 2005. Ambiguïté entre technologies propres et meilleures techniques disponibles. *VertigO - La Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*, p. 6-22.
- Langlois, P., 2008. *Rouler sans pétrole*. Éditions MultiMondes, 293 p.
- Laperche, B., Lefebvre, G., 2012a. Stratégie environnementale, innovation et mutation des firmes. *Innovations* 37, p.127–154.
- Laperche, B., Lefebvre, G., 2012b. The globalization of Research & Development in industrial corporations: Towards "reverse innovation"? *Journal of Innovation Economics* n°10, p.53–79.
- Laperche, B., Uzunidis, D., 2007. Le Système national d'innovation russe en restructuration. *Innovations* n° 26, p.69–94.
- Laperche, B., Uzunidis, D., Lefebvre, G., 2011. Eco-innovation, knowledge capital and the evolution of the firm. *Le développement durable: débats et controverses*, IUFM Dunkerque.
- Lazaric, N., 2010. *Les théories économiques évolutionnistes*. La Découverte, Paris, 125 p.

- Le Bas, C., 2001. Expectations, interactions between agents and technological regimes. *European Journal of Economic and Social Systems* 15, p.77–87.
- Leblanc, B., 2010. Toyota passe au tout-électrique avec Tesla. *L'Usine Nouvelle*.
- Lefevre, M., 2004. Les firmes multinationales face au risque climatique : sauver le capital en sauvant la terre ?, *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol 5, N°2.
- Lefevre, M., 2008. L'« écologisme d'entreprise » : inscrire la considération écologique au cœur de la firme ? *Écologie & Politique* 37, p.153–163.
- Leiponen, A., Drejer, I., 2007. What exactly are technological regimes? *Research Policy* 36, p.1221–1238.
- Lemoigne, R., Paulré, B., 1999. *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie : théories et analyses empiriques*. [colloque tenu à la Sorbonne [Paris], en septembre 1996. L'Harmattan, Paris.
- Leydesdorff, L., 2010. The Knowledge-Based Economy and the Triple Helix Model. *Annual Review of Information Science and Technology* 367–417.
- Liker, J.K., 2003. *The Toyota way fourteen management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill.
- Lockwood, W.W., 1954. Zaibatsu Dissolution in Japan. *The Far Eastern Quarterly* 14, p.115–117.
- Loos, F., 2005. *Symposium sur les Politiques d'Innovation en France et au Japon – 27/30 novembre 2005*.
- Loubet, J.-L., 2009. *La maison Peugeot*. Perrin, Paris, 576 p.
- Lundvall, B.-Å., 2010. *National Systems of Innovation: Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning*. Anthem Press.
- Maës, M., 1996. *Technologies propres et sobres*, Tome I, L'économie émergente. Johanet.
- Magnusson, L., Ottosson, J., ed., 2009. The Evolution of Path Dependence. Edward Elgar Publishing, 239 p.
- Magnusson, T., Berggren, C., 2011. Entering an era of ferment – radical vs incrementalist strategies in automotive power train development. *Technology Analysis & Strategic Management* 23, 313–330.

- Malerba, F., 2002a. Sectoral system of innovation and production. *Research Policy* 31, 247–264.
- Malerba, F., 2002b. New challenges for sectoral systems of innovation in Europe, in: *Industrial Dynamics of the New and Old Economy - Who Is Embracing Whom? DRUID Summer Conference 2002*, Copenhagen, Denmark, 1–42.
- Malerba, F., 2005. Sectoral systems of innovation: a framework for linking innovation to the knowledge base, structure and dynamics of sectors. *Economics of Innovation and New Technology* 14, 63–82.
- Malerba, F., 2006. Innovation, Industrial Dynamics and Industry Evolution: Progress and the Research Agendas. *Revue de l'OFCE*, n°97bis, 21–46.
- Malerba, F., Nelson, R., 2011. Learning and catching up in different sectoral systems: evidence from six industries. *Industrial Corporate Change* 20, 1645–1675.
- Malerba, F., Orsenigo, L., 1993. Technological Regimes and Firm Behavior. *Industrial Corporate Change* 2, 5–71.
- Malerba, F., Orsenigo, L., 1996. Schumpeterian patterns of innovation are technology-specific. *Research Policy* 25, 451–478.
- Malerba, F., Nelson, R., Orsenigo, L., Winter, S., 1999. “History-friendly” models of industry evolution: the computer industry. *Industrial and Corporate Change* 8, 3–40.
- Mallein, P., Picq, P., Royer, P., Paget, J., Nussbaum, B., 2010. Aux sources de l'innovation. Rupture, diversité des savoirs, libre exploration. *Pluriel* – 3, 36 p.
- Mangolte, P.A., 1992. *Le renouveau du paradigme évolutionniste*. Mémoire de DEA sous la Direction de B. Coriat, 142 p.
- Marchandon, G., Noailles, P., 1993. *De Gaulle & la technologie*. Éditions Seillans, Paris, 303 p.
- Marchwinski, C., Shook, J., Schroeder, A., Lean Enterprise Institute., 2008. *Lean lexicon: a graphical glossary for lean thinkers*. Lean Enterprise Institute, Cambridge, MA, 125 p.
- Marsden, D., 1985. *The Car industry: labour relations and industrial adjustment*, Social science paperback. Tavistock, London; New York, 210 p.
- Marsili, O., 2002. Technological Regimes and Sources of Entrepreneurship. *Small Business Economics* 19, 217–231.

- Marx, K., 1872. *Le Capital*. Dietz, Berlin.
- Masaaki, I., 1986. *Kaizen: (Ky'zen): the key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill, New York, 259 p.
- Mass, W., 1996. From Textiles to Automobiles: Mechanical and Organizational Innovation in the Toyota Enterprises, 1895-1933. *Business and Economic History* 25, p.1-37.
- Matagne, P., 2012. Écologie, économie et incitations au changement. *Innovations* n°37, p.55-72.
- Mathieu, A., 2008. L'Eco innovation ou la contribution de la firme au développement durable dans sa sphère d'influence. *XVIIème Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique*, Nice, 28-30 mai 2008.
- Mathieu, A., Chandon, J.-L., Reynaud, E., 2010. Le Développement Durable en action: approche par l'éco innovation. *19ème Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique*, CERAG, Luxembourg.
- Maxton, G.P., Wormald, J., 2004. *Time for a Model Change*. Cambridge University Press, 294 p.
- Mc Cormick, J., 2001. *Environmental Policy in the European Union*. Neil Nugent, William E. Paterson, Vincent Wright. Ed., The European Series. Palgrave, 347 p.
- McCraw, T., 2009. *Prophet of innovation : Joseph Schumpeter and creative destruction*, 1st Harvard University Press ed. ed. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge MA, 719 p.
- McKinsey Global Institute, 2013. *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy*, McKinsey & Company, 162 p.
- Méot T., 2009 L'industrie automobile en France depuis 1950, in: *l'Économie Française*, INSEE, 103-120.
- Meral, P., Petit, O., 2000a. *Analyse et prise en compte de la mondialisation des ressources et de la globalisation des rejets dans une stratégie de recherche technologique*. Mondialisation et technologies propres L'importance des partenariats public/privé dans le secteur automobile (MENRT, Direction de la Technologie, Département Énergie, Transports, Environnement et Ressources naturelles).
- Meral, P., Petit, O., 2000b. *Mondialisation et technologies propres L'importance des partenariats public/privé dans le secteur automobile*. Rapport MENRT, Direction de la Technologie, Département Énergie, Environnement, Ressources Naturelles.

- Metcalfe, S., 1994. Evolutionary Economics and Technology Policy. *The Economic Journal* 104, 931–344.
- Metcalfe, S., 1995. The economic foundations of technology policy: equilibrium and evolutionary perspectives, in: *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change*. Blackwell, 409–512.
- Metcalfe, S., 2012. *The Evolution of Evolutionary Economics : Clouds or Clocks*. International Schumpeter Society Conference, Brisbane, Australia.
- Meunier, F., 1982. Un deuxième choc pétrolier plus éprouvant pour l'économie française. *Économie et Statistiques*, 149-1, p.31–45.
- Miranda, S., Swinbank, A., Yano, Y., 2011. Biofuel Policies in the EU, US and Brazil. *EuroChoices* 10, p.11–17.
- Montebourg, A., Sapin, M., 2012. *Plan automobile : pour un redressement de la filière automobile*. Ministère de la Formation Professionnelle et du Dialogue Social.
- Moore, C.F., 1986. Understanding Entrepreneurial Behavior: A Definition and Model. *Academy of Management Best Papers Proceedings* 8, 66–70.
- Mousli, M., 2013. Steve Jobs, l'innovateur. L'actualité du management et de la gestion. *Alternatives Internationales*, Dossier web 055. [Document électronique] <http://www.alternatives-internationales.fr/index.php?lg=fr&controller=article&action=html&id_article=55596&id_parution=634&inscription=ok&oubli=ok> Consulté le 14 février 2013.
- Mukoyama, T., 2003. *A Theory of Technology Diffusion*. EconWPA. (Macroeconomics No. 0303010), 38 p.
- Naoun, A., 2011. L'éco-innovation, une opportunité de développement. *Colloque Régional Aquitaine Eco-Conception*, Saint Etienne, 6 décembre 2012.
- Negri, A., 1978. *La classe ouvrière contre l'Etat*. Éditions Galilee, Paris, 313 p.
- Nelson, R.R., 1987. *Understanding technical change as an evolutionary process*. North-Holland; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., Amsterdam; New York; New York, N.Y., U.S.A, 136 p.
- Nelson, R.R., 1992. National Innovation System : A Retrospective on a Study. *Industrial and Corporate Change*, 1, 2, 347-374
- Nelson, R.R., 1993. *National Innovation System : A Comparative Analysis*. Oxford University Press, 552p.

- Nelson, R.R., 1995. Recent Evolutionary Theorizing About Economic Change. *Journal of Economic Literature* 33, 48–90.
- Nelson, R.R., Winter, S.G., 1977. In search of useful theory of innovation. *Research Policy* 6, 36–76.
- Nelson, R.R., Winter, S.G., 1982. *An evolutionary theory of economic change*. Harvard University Press, 456 p.
- Nieuwenhuis, P., Vergragt, P.J., 2001. Technological Change and Regulation in the Car Industry. *Greener Management International*, 5–11.
- Niosi, J., 2002. National system of innovation are “x-efficient” (and x-effective). Why some are slow learners. *Research Policy*, 291–302.
- Niosi, J., 2012. *Building national and regional innovation systems: institutions for economic development*. Edward Elgar, Cheltenham, 264 p.
- Noailles, P., 2010. Les fondements théoriques d’une politique de “l’écosystème” innovateur. *Journées Réseau de Recherche sur l’Innovation*, Dijon, 1–9.
- Nunes, B., Bennett, D., 2009. Green Innovation Management in the Automotive Industry. *Managing Innovation - Case Studies*, Aston University, UK, 8 p.
- Obama, B., 2011. *Obama on Steve Jobs: The world has lost a visionary*.
- OECD, 1999. *Managing National Innovation System*.
- OECD, 2009. *La production durable et l’éco-innovation au service d’une économie verte*.
- OECD, 2009. *Sustainable Manufacturing and Eco-Innovation*. Framework, Practices and Measurement. OECD.
- OECD, 2010. *L’éco-innovation dans l’industrie favoriser la croissance verte*. OECD Publishing, Paris.
- OECD, 2011. *Fostering innovation for green growth*. OECD, Green Growth Studies, Paris.
- OECD, 2011. Factors and policies determining green innovation, in: *OECD Green Growth Studies*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 45–114.
- OECD, 2005. *Manuel d’Oslo - Principes directeurs pour le recueil et l’interprétation des données sur l’innovation*.

- OECD, 2010. *Politique de l'environnement et innovation technologique* [Document électronique]. URL <<http://www.oecd.org/fr/env/consommation-innovation/innovation.htm>> (accessed 10.9.12).
- OECD, Forum International des Transports, 2010. Perspectives des Transports 2010. Le potentiel de l'innovation. *Transport et Innovation : Libérer le potentiel*, OECD-FIT, Leipzig, Allemagne.
- Oltra, V., 2008. Environmental innovation and industrial dynamics: the contributions of evolutionary economics. *Cahiers du GREThA* 2008-28, 27 p
- Oltra, V., Jean, M.S., 2005. Environmental innovation and clean technology: an evolutionary framework. *International Journal of Sustainable Development* 8, 153–172.
- Oltra, V., Saint Jean, M., 2009. Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change* 76, 567–583.
- Oltra, V., Saint Jean, M.S.J., 2009. Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs) : a patent analysis. *Journal of Cleaner production*, 17-2, 201-213.
- Oltra, V., Saint Jean, M.S.J., 2007. Incrementalism of environmental innovations versus paradigmatic change: a comparative study of the automotive and chemical industries. *Cahiers du GREThA* 2007-19, 22 p.
- Oltra, V., Saint Jean, M.S.J., 2009. Innovations environnementales et dynamique industrielle. *Cahiers du GREThA* 2009-22, 37 p.
- Orsato, R., Wells, P., 2007. The Automobile Industry and Sustainability. *Journal of Cleaner Production* 15, 989–993.
- Parlement Européen, Conseil de l'Union Européenne, 2009. Règlement (CE) N° 443/2009 du Parlement Européen et du Conseil du 23 avril 2009 établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers, 5.6.2009 FR.
- Patel, P., Pavitt, K., 1994. The nature and economic importance of National Innovation Systems. OECD, *Science, Technology, Industry Review* 14, 9–32.
- Pavitt, K., 1984. Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory. *Research Policy*, 343–373.
- Peaucelle, J., 2007. *Adam Smith et la division du travail : la naissance d'une idée fausse*. L'Harmattan, Paris, 276 p.

- Peaucelle, J., 2008. Les innovations techniques et organisationnelles dans la fabrication des épingles. *Innovations* 27, 27–44.
- Pelata, P., Matheu, M., Midler, C., Hirtzman, P., 2010. Le véhicule électrique va-t-il enfin démarrer ? *Le journal de l'École de Paris du Management* 84, 14–23.
- Perquis, C., Vallais, H., Ravache, J.-F., Gicquel, J., 2011. *Handicapé(e)s, ils travaillent pour la 508 en "juste à temps"*.
<http://www.largus.fr/actualite-automobile/handicapees-ils-travaillent-pour-la-508-en-juste-a-temps-507366.html> consulté le 18 février 2011.
- Perrin, J., 2001. *Concevoir l'innovation industrielle : méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS éditions, Paris, 166 p.
- Perroux, F., 1993. *Théorie et histoire de la pensée économique. Marx, Schumpeter, Keynes*. Presses universitaires de Grenoble, Grenoble, 424 p.
- Perroux, F., 1965. La pensée économique de Joseph Schumpeter - Les dynamiques du capitalisme, 259 p.
- Perroux, F., 1963. Les industries motrices et la croissance d'une économie nationale. *Économie Appliquée*, 2, 147-193.
- Pettersen, J., 2009. Defining lean production: some conceptual and practical issues. *The TQM Journal* 21, 127–142.
- Porcher, T., 2012. Le diesel a-t-il été une erreur stratégique majeure pour l'économie française ? [Document électronique]. *Atlantico.fr*.
URL<<http://www.atlantico.fr/decryptage/diesel-t-ete-erreur-strategique-majeure-pour-economie-francaise-thomas-porcher-538587.html>> (accessed 6.28.12).
- Porter, M.E., Linde, C. van der, 1995. Toward a New Conception of the Environment Competitiveness Relationship. *The Journal of Economic Perspectives* 9, 97–118.
- Porter, M.E., Van der Linde, C., 1995. Green and Competitive :Ending the Stalemate. *Harvard Business Review*, 120–134.
- Portnoff, A.-Y., 2004. Sentiers d'innovation - Pathways to innovation, Perspectives. *Futuribles*, Paris, 63 p.

- PSA, n.d. *PSA Peugeot Citroën - Industriel et coopérations* [Document électronique]. URL<http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/psa_groupe/outil_industriel_b1.php> (accessed 2.20.12).
- PSA - Directoire, 2012. CP NOMINATION1238346807.pdf [Document électronique]. URL<http://www.psa-peugeot-citroen.com/document/presse_communique/CP%20NOMINATION1238346807.pdf> (accessed 2.29.12).
- PSA - DRH, 2013. *Signature de la convention nationale de chômage partiel entre l'Etat et PSA Peugeot Citroën. PSA Peugeot Citroën, 2013. Moteurs automobiles et qualité de l'air. L'offensive technologique de PSA Peugeot Citroën.*
- PSA Peugeot Citroën, 2013. *Hybrid Air, une solution innovante full hybrid essence.* Dossier de Presse
- Rammel, C., Van den Bergh, J.C.J.M., 2001. Evolutionary Economic Theories of Sustainable Development. *Growth and Change* 32, 110–134.
- Rammel, C., Van den Bergh, J.C.J.M., 2003. Evolutionary policies for sustainable development: adaptative flexibility and risk minimizing. *Ecological Economics*, 121–133.
- Recent Developments in Evolutionary economics*, 2008. Edward Elgar, Cheltenham; Glos, UK Northampton, MA, 560 p.
- Recent advances in neo-Schumpeterian economics: essays in honour of Horst Hanusch*, 2009. Edward Elgar, Cheltenham; Glos, UK Northampton, MA, 253 p.
- Remy, M., 2011. L'Europe encourage l'innovation dans l'automobile. *L'Usine Nouvelle*.
- Rennings, K., 1998. Towards a Theory and Policy of Eco-Innovation - Neoclassical and (Co-) Evolutionary Perspectives. *Methods Paper* 98-24, 21 p.
- Rennings, K., 2000. Redefining innovation — eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics* 32, 319–332.
- Reuters 2012. *UKH2 Mobility: New Government and Cross Industry Partnership to Make Hydrogen Powered Travel in The UK a Reality.* <http://www.reuters.com/article/2012/01/18/idUS83492+18-Jan-2012+BW20120118> consulté le 20 janvier 2012

- Ricardo, D., 1821. *Des principes de l'économie politique et de l'impôt*: édition anglaise de 1821.
- Robin, M., Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'Observation des Statistiques, 2010. La motorisation des ménages continue de s'accroître au prix d'un vieillissement du parc automobile. *La Revue*, 99-122.
- Robinson, A., 1990. *Modern approaches to manufacturing improvement: the Shingo system*. Productivity Press, Cambridge, Mass, 424 p.
- Rochet, C., 2007. *L'innovation, une affaire d'État: gagnants et perdants de la troisième révolution industrielle*. L'Harmattan, Paris, 426 p.
- Rochet, C., 2009. Carlota Perez' Contribution to the research program management: Understanding and managing the process of creative destruction in public institutions and organizations. *Techno-Economic Paradigms*, 373–393.
- Rosenberg, N., 1974. Science, Invention and Economic Growth. *Economic Journal* 84, 90–108.
- Rosenberg, N., 1982. *Inside the black box: technology and economics*. Cambridge University Press, Cambridge; New York, 304 p.
- Rosenberg, N., 1985. *Perspectives on technology*. Cambridge University Press, 353 p.
- Rothwell, R., Gardiner, P., 1988. Re-innovation and robust designs: Producer and user benefits. *Journal of Marketing Management* 3, 372–387.
- Sahal, D., 1981. *Patterns of technological innovation*. Addison-Wesley Pub. Co., Advanced Book Program/World Science Division, 408 p.
- Saviotti, P., 1996. *Technological Evolution, Variety, and the Economy*. Edward Elgar Pub, 250 p.
- Schiederig, T., Tietze, F., Herstatt, C., 2011, What is Green Innovation? – A Quantitative Literature Review. *The XXII ISPIM Conference 2011*.
- Schumpeter, J., 1984. *Impérialisme et classes sociales*. Flammarion, Paris, 290 p.
- Schumpeter, J.A., 1939. *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, 1095 p.
- Schumpeter, J.A., 1954. *Capitalisme, Socialisme, Démocratie*. Payot, 451 p.

- Schumpeter, J.A., 1911. *Théorie de l'Evolution Economique* [Document électronique]. URL<http://classiques.uqac.ca/classiques/Schumpeter_joseph/theorie_evolution/theorie_evolution_1.doc>
- Šemeta, A., 2011. *Revising the Energy Taxation Directive for a more efficient, greener and competitive EU economy* (No. SPEECH/11/265). Commission Européenne, Brussels.
- SESSI, 2006. Un quart des entreprises innovent. *Le 4 pages des statistiques industrielles*, n°222.
- Shimizu, K., 1993. Système du salaire toyotien. Une analyse qualitative et quantitative. « Mode de régulation au Japon et relation internationales: de l'histoire longue aux transformations récentes », *CEPREMAP*.
- Shimizu, K., 1999. *Le Toyotisme*. La Découverte, Paris, 128 p.
- Shimizu, K., 2000. *Toyota dans l'histoire* 岡山大学経済学会雑誌 31, 153-175.
- Shimizu, K., 1995. Kaizen et gestion du travail chez Toyota Motor et Toyota Kyushu: un problème dans la trajectoire de Toyota. *Actes du Gerpisa* 13 – 42, 30 p.
- Shimizu, K., Nomura, M., 1993. Trajectoire de Toyota. Rapport Salarial et Système de Production. *Actes du Gerpisa* – 8, 29-66.
- Shingo, S., 1985. *A revolution in manufacturing: the SMED system*. Productivity Press, Stamford, Conn, 384 p.
- Shingo, S., 1992. *The Shingo production management system: improving process functions*. Productivity Press, Cambridge, Mass, 238 p.
- Shingo, S., 1996. *Quick changeover for operators: the SMED system*. Productivity Press, Portland, Or, 96p.
- Smith, A., 1776. *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations, 1*. Guillaumin.
- Smith, A., 1995. *Enquête sur la nature et les causes de la richesse des nations*. Presses universitaires de France, Paris.
- Smith Adrian, 2003. Transforming technological regimes for sustainable development : a role for alternative technology niches ? *Science and Public Policy*, vol. 30, p.127-135
- Sosa, E., 1999. *Are human rational?_Cognition, Agency and Rationality, Philosophical Studies Series Volume 79*, 1999, 1-8.

- Spear, S., Bowen, H.K., 1999. Decoding the DNA of the Toyota Production System. *Harvard Business Review*, September-October 1999, 97–106.
- Stern, N.H., 2007. *The Economics of Climate Change : the Stern Review*. Cambridge University Press. 712 p.
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., Uchikawa, S., 1977. Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15, 553–564.
- SwissRe, 2012. *Catastrophes naturelles et techniques en 2011: des dommages historiques suite à des séismes et des inondations record*, SIGMA, 2/2012.
- Teece, D.J., 1986. Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy. *Research Policy*, p. 285–305.
- Temri, L., 2011. Innovations technologiques environnementales dans les petites entreprises : proposition d'un modèle d'analyse. *Innovations* 34, p.426.
- Thomson Reuters, 2012. *Derwent World Patents Index-2011*. State of Innovation.
- Thuderoz, C., 2006. *Histoire et sociologie du management : Doctrines, textes, études de cas*. PPUR Presses Polytechniques, 410p.
- Tidd, J., Bessant, J., 2011. *Managing innovation: integrating technological, market and organizational change*. Wiley, Chichester, 638p.
- Tidd, J., Bessant, J.R., Pavitt, K., 2006. *Management de l'innovation: intégration du changement technologique, commercial et organisationnel*. De Boeck Université, Bruxelles, 593p.
- Timmons, J.A., 1995. *New venture creation*. McGraw-Hill/Irwin, Homewood, IL, 815p.
- United Nations - World Commission on Environment and Development, 1987. *Our common future*. Oxford University Press, Oxford, 400 p.
- Uzunidis, D., Gabus, A., 2009. Le “développement durable” comme champ d'accumulation et d'innovations. L'exemple de la réduction de la pollution atmosphérique. In B. Laperche et al. *Développement Durable : Pour Une Nouvelle Économie*. P. Lang, 273–292.
- Van Berkel, R., Zhang, D.K., Institution of Chemical Engineers (Australia), 2000. Cleaner production for process industries, *Chemeca 2000*, 28th Australasian Chemical Engineering Conference, Perth, July 9-12.

- Van den Hoed, R., Vergragt, P.J., 2004. *Institutional Change in the Automotive Industry. Greener Management International*, Greenleaf Publishing, 47, 1-17.
- Van Dieren, W., 1995. *Taking nature into account: a report to the Club of Rome: toward a sustainable national income*. Copernicus, New York, 350 p.
- Vergragt, P.J., 2006. How Technology Could Contribute to a Sustainable World. *GTI Paper Series* 28.
- Vergragt, P.J., Brown, H.S., 2007. Sustainable mobility: from technological innovation to societal learning. *Journal of Cleaner Production* 15, 1104–1115.
- Weaver, P., Jansen, L., Grootveld, G.V., Grootveld, G. van, Spiegel, E. van, Vergragt, P., 2000. *Sustainable Technology Development*. Greenleaf Publishing, 256 p.
- Winter, S., Teece, D., Dosi, G., 1990. Les frontières des entreprises: vers une théorie de la cohérence de la grande entreprise. *Revue d'Économie Industrielle*, 51, 238–254.
- Witt, U., 2002. How Evolutionary is Schumpeter's Theory of Economic Development? *Industry and Innovation* 9, 7–22.
- Witt, U., 2008. What is specific about evolutionary economics? *Journal of Evolutionary Economics*, 18, 547–575.
- Witt, U., 2013. *The power of evolutionary thinking in economics: essays on economic change and its theory*. Edward Elgar Publishing.
- Womack, J.P., Jones, D.T., Roos, D., 1991. *The machine that changed the world :: the story of lean production*. Harper Perennial, New York, N.Y., 352 p
- World Bank, 2012. *Why a 4°C Warmer World Must Be Avoided?*
- Yildizoglu, M., 2009. Approche évolutionniste de la dynamique économique. *Cahiers du GREThA* 2009-16, 31p.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	5
Sommaire	9
Liste des Acronymes et Abréviations	11
Liste des Figures, Tableaux et Graphiques	13
Introduction Générale	19
Chapitre 1 L’innovation de Schumpeter aux Évolutionnistes : Un processus incrémental	31
Section 1 : La vision Schumpétérienne : fondement de la pensée contemporaine de l’innovation	35
1.1 L’innovation selon Schumpeter : éléments de cadrage.....	37
1.2 La destruction créatrice	40
1.3 Innovations incrémentales et grappes d’innovations	43
1.4 Les innovations de rupture.....	48
Propos d’étape – Chapitre 1 – Section 1.....	54
Section 2 : La vision évolutionniste de l’innovation : prolongement des propositions schumpétériennes ..	56
2.1 Régime technologique : un concept cadre	58
2.2 « <i>Path dependence</i> » (Sentiers de dépendance) et « <i>lock-in</i> » (verrouillage) : des concepts à la pratique	62
2.2.1 Deux concepts clés « connexes ».....	63
2.2.2 « Sentiers de dépendance » et « lock-in » : Cas stylisés	68
2.3 Modèles de diffusion technologique et rendements croissants d’adoption.....	71
2.3.1 Les modèles de diffusion technologique.....	72
2.3.2 Les rendements croissants d’adoption	75
Propos d’étape – Chapitre 1 – Section 2.....	80
Conclusion du Chapitre 1	82

Chapitre 2	Innovation et Environnement : Eco-innovations incrémentales, éco-innovations de rupture	
Section 1	De la fin annoncée du pétrole à la prise en compte de l'environnement.....	87
1.1	Un pétrole plus rare et plus cher	87
1.2	La prise en compte des considérations environnementales dans l'innovation.....	89
1.2.1	Le « développement durable » : une contrainte incontournable	90
1.2.2	Le Protocole de Kyoto : un nouveau contexte pour l'innovation.....	97
1.2.3	Un cadre normatif qui s'affirme	102
1.3	Innovation et environnement : un processus contraint.....	106
1.3.1	De l'innovation à l'éco-innovation	106
1.3.2	Innovation environnementale, éco-innovation, innovation verte : définitions et précisions sémantiques.....	107
1.3.3	Choix technologiques : vers la fin du « end of pipe ».....	110
	Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 1.....	118
Section 2	Les accélérateurs de l'innovation.....	120
2.1	Politiques publiques et éco-innovations	121
2.1.1	Système national d'innovation (National System of Innovation)	126
2.1.2	Système sectoriel d'innovation (Sectoral System of Innovation)	130
2.2	Les moteurs de l'éco-innovation.....	136
2.3	Les éco-innovations : un prolongement des concepts schumpétériens et évolutionnistes	141
2.3.1	Les éco-innovations incrémentales	141
2.3.2	Les éco-innovations de rupture	143
2.4	Eco-innovation : élément constitutif du développement durable.....	145
	Propos d'étape – Chapitre 2 – Section 2.....	148
	Conclusion du Chapitre 2.....	149

Chapitre 3	Eco-Innovation et Automobile : amorce d'un nouveau sentier	153
Section 1	Environnement : L'automobile face à une double contrainte	155
1.1	L'automobile dans l'économie française : un secteur incontournable	155
1.2	Un secteur sous contraintes	161
Section 2	Un phénomène de « lock-in » jusqu'à la fin du 20^e siècle.....	166
2.1	Motorisation : résistance de la combustion interne.....	167
2.1.1	Les voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs	168
2.1.2	La réduction du poids des voitures	173
2.2	Carburants : le lock-in de la motorisation.....	174
2.2.1	La « diésélisation » du parc automobile.....	175
2.2.2	Les carburants alternatifs : une éco-innovation incrémentale	182
Section 3	Des éco-innovations de rupture à l'origine d'un nouveau sentier de dépendance	187
3.1	De l'éco-innovation à l'éco-conception.....	187
3.2	L'éco-conception dans l'automobile	188
3.3	Les enjeux liés aux motorisations alternatives, hybrides, électriques, à hydrogène, à air comprimé. Vers le Zero Emission Vehicle ers le Zero Emission Vehicle.....	192
3.3.1	Véhicules hybrides : « Transition énergétique » entre deux sentiers	197
3.3.2	Véhicules électriques : l'amorce d'un nouveau sentier.....	202
3.3.3	L'hydrogène et la pile à combustible : un pas plus loin sur le nouveau sentier	206
	Conclusion du Chapitre 3	214
	Conclusion Générale	217
	Bibliographie	223
	Table des matières	247