UNIVERSITE MONTPELLIER I

FACULTE DES SCIENCES ECONOMIQUES

Ecole Doctorale « ECONOMIE GESTION »
Equipe d'accueil : **CREDEN – LASER**

L'ANALYSE EVOLUTIONNISTE DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES : L'EXEMPLE DES ENERGIES SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIENNE

Thèse présentée pour obtenir le grade

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER I

soutenue le 29 janvier 2005

Formation Doctorale :
POLITIQUES ECONOMIQUES ET ECONOMIE INDUSTRIELLE

Groupe des Disciplines Sciences Economiques du CNU
Section 05
Par

Pierre TAILLANT

Jury :

- Monsieur Jean-Marie BOUCHERREAU, Chargé de mission Analyse et Prospective, Service Economie, ADEME, Paris,
- Monsieur Jean-Alain HERAUD, Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (Rapporteur),
- Madame Catherine LOCATELLI, Chargée de recherche au CNRS (HDR) à l'Université Pierre Mendès France de Grenoble (Rapporteur),
- Monsieur Jacques PERCEBOIS, Professeur à l'Université Montpellier I (Directeur),
- Monsieur Henri WANKO, Maître de conférences à l'Université Montpellier I.

« La Faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur »

SOMMAIRE

Introduction Générale p.1

CHAPITRE 1. Les technologies de l'Energie : Aspects Systémiques, Innovations et Enjeux Environnementaux p.6

Section 1. Le système énergétique : évolutions de longues périodes et enjeux technologiques p.9
1.1. Définition du système énergétique et manifestations du changement technique p.9
1.2. L'intensité énergétique et ses tendances de longue période p.17
1.3. Les évolutions de longue période du système énergétique dans les pays industrialisés p.22

Section 2. Mesure et définitions des innovations énergétiques et environnementales p.40
2.1. La mesure des innovations énergétiques p.40
2.2. Nature et modalités des innovations technologiques de l'énergie p.47

Conclusion du Chapitre 1 ..... p.57

CHAPITRE 2. Théorie Economique Standard et Innovations Technologiques Environnementales p.58

Section 1. Le schéma linéaire de l'innovation : une simplification excessive d'un processus complexe p.61
1.1. Les activités de R&D, relais entre l'invention et l'innovation p.62
1.2. Le modèle linéaire et le débat « technology push » versus « demand pull » p.66

Section 2. La technologie assimilée à de l'information : conséquences en termes d'incitations privées et justification des interventions publiques p.71
2.1. Quelle représentation de la technologie dans le modèle néo-classique ? p.71
2.2. Le modèle fondateur de Arrow [1962a] : la technologie assimilée à de l'information p.73
2.3. Les développements à partir de l'analyse d'Arrow : les comportements stratégiques pour innover p.86

Section 3. Des mécanismes de correction des externalités pointés sur les « *market failures* » p.94
3.1. Quelle place pour les politiques d'innovation et industrielle dans la théorie standard ? p.94
3.2. Les politiques de soutien : le dilemme entre les incitations à innover et la diffusion optimale p.98

Section 4. Fondements et portée des incitations à innover des instruments de politique environnementale p.119

4.1. L'internalisation par la voie réglementaire p.119
4.2 L'internalisation via les instruments économiques p.122

Conclusion du Chapitre 2 ..... p.144

CHAPITRE 3. Analyse économique évolutionniste et innovations technologiques environnementales p.146

Section 1. Les fondements de l'analyse évolutionniste de l'innovation et ses hypothèses p.149
1.1. La critique des « fondations de l'orthodoxie contemporaine » p.149
1.2. Les inspirations positives p.155
1.3. Les principes de l'approche évolutionniste p.168
1.4. Le modèle schumpétérien de compétition technologique de NELSON et WINTER [1982] p.178

Section 2. La conception évolutionniste de l'innovation p.186
2.1. Quel changement de modèle d'innovation ? p.186
2.2. Le modèle interactif de l'innovation de KLINE et ROSENBERG [1986] : la conception au centre du processus d'innovation p.187
2.3. Les faits stylisés de l'innovation technologique dans l'optique évolutionniste . p.192
2.4. Une nouvelle approche des externalités de connaissances et ses implications .. p.197
2.5. Les régularités du changement technique p.208

Section 3. Une reformulation des politiques technologiques et environnementales dans le cadre évolutionniste p.223
3.1. L'intervention de l'Etat dans l'analyse évolutionniste p.223
3.2. L'intervention publique pour sélectionner une technologie environnementale . p.234

Conclusion du Chapitre 3 ..... p.268

CHAPITRE 4. La Dynamique Technologique et Industrielle des Energies Renouvelables : les Exemples du Solaire Photovoltaïque et de l'Eolien p.270

Section 1. L'évolution technologique de l'énergie solaire photovoltaïque p.272
1.1.La croissance du marché mondial du solaire PV p.272
1.2. La compétition technologique dans le secteur solaire PV p.280
1.3. La dynamique technologique et industrielle de l'industrie solaire PV p.290

Section 2. Les systèmes techonologiques : l'exemple du développement de l'énergie solaire photovoltaïque en Allemagne p.319
2.1. Les systèmes d'innovation p.319
2.2. Les systèmes nationaux d'innovation p.320
2.3. Les systèmes technologiques p.325
2.4. Le système technologique allemand de l'énergie solaire PV p.329

Section 3. Le système technologique de l'éolien au Danemark p.344
3.1. Les politiques de R&D pour l'éolien : évolution internationale et au Danemark p.344
3.2. Le Programme éolien danois : deux sous-systèmes technologiques p.347
3.3. Les instruments économiques et réglementaires de soutien à l'éolien p.359

Conclusion du chapitre 4 ..... p.369

Conclusion générale p.371
Références bibliographiques p.374
Table des figures p.409
Liste des tableaux p.412
Annexe 1. ..... p.414
Annexes 2. 3. 4. ..... p.415
Annexe 5. ..... p.416
Annexe 6. ..... p.417
Annexe 7. ..... p.418
Annexes 8. 9. ..... p.419
Annexe 10. ..... p.421
Annexe 11. ..... p.422
Annexe 12. 13. ..... p.424
Annexe 14. ..... p.425
Annexe 15. ..... p.427
Table des matières p.42

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies la problématique liée à la sécurité des approvisionnements en énergie, c'est-à-dire en hydrocarbures, au meilleur coût a dominé les débats sur la situation énergétique internationale dans les pays de l'OCDE. Répondant aux chocs pétroliers des années 1970, ces derniers ont cherché à diversifier leurs approvisionnements, en investissant de gros budgets dans la mise au point de nouvelles technologies énergétiques et dans les mesures d'amélioration énergétique, et en créant des réserves d'urgence pour se prémunir des perturbations internationales. Depuis quelques années les préoccupations suscitées par les problèmes environnementaux locaux, comme la pollution de l'air, et mondiaux, comme le changement climatique, ont revêtu une importance croissante. Dans ce contexte, de par les bénéfices environnementaux qu'elles peuvent apporter, les énergies renouvelables (ER) suscitent un intérêt grandissant. La nécessité de satisfaire les engagements internationaux sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Protocole de Kyoto de 1997) s'est traduite notamment dans l'Union européenne par l'adoption de la Directive européenne sur la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables (CE [2001]). La Directive a fixé comme objectif pour les Etats membres de doubler la part des ER dans la consommation d'énergie brute d'ici 2010 (22% en 2010 contre 17% en 1997). Au niveau de l'Union la réalisation de cet objectif peut apparaître ambitieuse compte tenu des obstacles qu'il est nécessaire de surmonter.

Le premier est lié à l'hétérogénéité des différentes sources d'ER, au niveau des rendements énergétiques effectivement constatés. Les différentes technologies employées par les ER doivent s'adapter à des contraintes techniques et naturelles fortes, comme le caractère stochastique de la ressource qu'elles captent. Par exemple, les énergies éolienne et solaire photovoltaïque (PV) sont des énergies de flux, à la différence des énergies fossiles qui sont des énergies de stock. La puissance et la disponibilité de ces flux ne sont pas liées aux activités humaines et la quantité d'énergie qui est exploitée à une période donnée ne compromet pas la consommation des périodes suivantes, et ce dans un horizon temporel théoriquement considéré comme infini ;

l'énergie solaire est souvent définie comme une *« backstop technology »*, continue et inépuisable (NORDHAUS [1973]).

Ensuite, les ER, en fait les flux qu'elles utilisent, sont abordées dans l'analyse économique comme des biens libres[1], dénués de droit de propriété (FAUCHEUX et NOËL [1995]). On peut les assimiler à des biens publics consommés sans rivalité et sans exclusion. *Ceteris paribus* ces flux de ressource étant gratuits, leur allocation optimale ne passe pas par un optimum paretien issu d'un système de prix sur un marché concurrentiel. Mais, la vente de l'énergie (électricité, chaleur) produite à partir des ER sur le marché rencontre deux autres obstacles. En premier lieu, les prix n'intègrent pas, ou peu, les coûts environnementaux qui sont directement assimilés aux coûts de production des sources énergétiques traditionnelles. La non prise en compte du bénéfice environnemental des ER biaise la comparaison avec les énergies fossiles. En second lieu, les technologies des ER n'ont pas la maturité pour concurrencer actuellement les moyens de production énergétiques classiques s'appuyant sur des systèmes centralisés bénéficiant d'importants effets d'apprentissages. Les effets d'apprentissages ne peuvent donc provenir que d'une diffusion en série à grande échelle.

A un niveau plus général, la constitution et l'évolution des systèmes énergétiques et des technologies qui les composent relèvent d'une dimension de longue période. Les systèmes énergétiques actuels des pays industrialisés sont marqués par une absence de flexibilité et un «verrouillage » sur les technologies des énergies fossiles traditionnelles (UNRUH [2000]). Pour l'heure, l'absence de perspective d'un épuisement des ressources fossiles ne pousse pas à un changement de trajectoire technologique et les ER apparaissent dans ce schéma comme des innovations environnementales radicales.

L'analyse de leur développement, nécessite d'expliciter la nature des externalités en présence. La technologie peut être perçue comme une arme à «double tranchant » qui peut donner lieu à la fois à des externalités positives et négatives. Les externalités positives sont induites par les nouvelles connaissances, favorisant la croissance économique et l'amélioration du bien-être. L'utilisation de nouvelles connaissances peut également engendrer des externalités environnementales négatives, comme la dégradation de l'environnement. La technologie a souvent porté la responsabilité des

[1] Dans le sens juridique de « *res nullius* ».

externalités environnementales négatives, ce qui a parfois constitué un obstacle à la recherche de solutions pour tirer parti des externalités économiques positives de l'innovation en faveur de l'environnement.

La théorie économique reconnaît que les effets de *spillovers* des connaissances dissuadent les firmes de consacrer des niveaux d'investissement optimaux à la création de nouveaux savoirs. De ce fait selon la théorie économique néo-classique les investissements privés consacrés à la R&D restent sous-optimaux (ARROW [1962]). En outre, en raison du caractère de « bien public » des bénéfices environnementaux, faisant que les firmes ne peuvent pas s'approprier totalement le rendement des investissements environnementaux, le niveau des investissements privés pour améliorer l'environnement reste insuffisant. Ainsi, plus directement, les innovations environnementales sont pénalisées par une «double défaillance » du marché, ce qui justifie d'autant plus les interventions publiques (JAFFE *et al.* [2003]). Du côté de l'analyse évolutionniste, la technologie n'est pas considérée comme une donnée, mais comme un processus local, cumulatif, dynamique qui évolue en fonction des effets d'apprentissage (NELSON et WINTER [1982]). La problématique générale, récente dans ce courant, entre la technologie et l'environnement est représentée par le développement de paradigmes et de trajectoires technologiques « verts ». Ces concepts inscrivent le développement technologique dans un contexte historique, économique, social et institutionnel.

L'architecture de la thèse

L'objet de notre thèse consiste à étudier la constitution et le développement de technologies d'ER, définies comme des innovations radicales environnementales, et telles que peuvent apparaître les technologies des énergies renouvelables dans le paysage énergétique actuel des pays industrialisés. La spécificité des innovations technologiques du secteur de l'énergie tient à leur temps long de constitution. Notre hypothèse générale est que les mécanismes du développement technologique (création, appropriation, diffusion) sont structurants de la dynamique d'une filière industrielle. Compte tenu de ces éléments, notre démarche consiste d'abord à interroger la littérature économique afin d'opter pour la conception de la technologie qui nous apparaît la plus appropriée, avant de nous intéresser aux exemples du développement des énergies solaire photovoltaïque et éolienne. L'intérêt pour ces technologies peut être perçu à travers une certaine singularité : elles sont considérées comme « nouvelles » dans leurs

formes modernes pour la production d'électricité, mais elles se sont constituées à partir d'inventions anciennes, voire séculaires dans le cas des principes élémentaires de l'éolien.

Dans le Chapitre 1, à visée introductive, nous remettrons en perspective les aspects systémiques, d'innovation et les enjeux environnementaux attachés aux technologies de l'énergie. Nous retracerons les principales évolutions de longue période des systèmes énergétiques en soulignant les enjeux technologiques associés. Nous aborderons ensuite les questions des mesures et des définitions des innovations énergétiques et environnementales.

Dans le Chapitre 2 nous appréhenderons les incitations à innover pour des technologies environnementales radicales dans le cadre général de la théorie économique néo-classique. Après avoir rappelé le modèle linéaire et le traitement purement allocatif de l'innovation prévalant dans la théorie standard, nous poserons les concepts fondamentaux de l'analyse des activités de R&D, justifiant l'intervention de l'Etat dans ce domaine, et ses prolongements récents. Nous essaierons ensuite de repérer la place qui est accordée aux politiques publiques d'innovation et industrielle, avec leurs principes et leurs limites. Une dernière section nous permettra de poser les fondements théoriques des politiques de l'environnement et de présenter les résultats des modèles traitant des incitations à innover induites par ces politiques. Au terme de ce chapitre nous serons alors en mesure de ne pas retenir la représentation technologique de la théorie économique standard.

Le Chapitre 3 a pour but de présenter le cadre théorique de l'analyse évolutionniste de l'innovation et du changement technique pour le confronter à notre problématique. Nous présenterons les fondements et les hypothèses de ce courant, et la conception de l'innovation qu'il retient. A un niveau plus macro-économique nous aborderons les types de régularités technico-économiques, structurant la dynamique des industries, reconnues par les auteurs évolutionnistes. Cela nous permettra de déboucher sur une reformulation des politiques technologiques et environnementales pour soutenir le développement de technologies comme celles des ER. A travers l'apport des modèles de compétition technologique nous essaierons de tirer des principes de politiques publiques pour guider le développement de technologies vertes.

Le Chapitre 4 sera l'occasion d'utiliser les apports conceptuels de la théorie évolutionniste de l'innovation pour illustrer le développement de technologies

énergétiques environnementales, au travers des exemples de l'énergie solaire PV et de l'énergie éolienne. Nous aborderons les tendances récentes du marché mondial du solaire PV, pour analyser ensuite la situation de compétition technologique que connaît ce secteur. Nous tenterons d'évaluer les possibilités de *lock-out* par le développement de la variété technologique. Nous ferons un rapide tour d'horizon théorique des approches par les systèmes d'innovation et les systèmes technologiques pour analyser ensuite l'évolution du système technologique du solaire PV en Allemagne. Enfin, dans la même démarche méthodologique nous exposerons la particularité du développement du système technologique de l'énergie éolienne au Danemark.

CHAPITRE 1

Les Technologies de l'Energie : Aspects Systémiques, Innovations et Enjeux Environnementaux

Introduction

En conditionnant la disponibilité, l'efficacité de conversion, la qualité et le prix fourniture de l'énergie, la flexibilité des systèmes et leur compatibilité environnementale, les technologies de l'énergie apparaissent comme un des déterminants essentiels de la satisfaction des besoins humains les plus fondamentaux et de la croissance économique. A un niveau plus général, la technologie, et l'innovation, jouent un rôle de plus en plus crucial dans la viabilité écologique de la croissance. Cette problématique est cristallisée, depuis la fin des années 1980, par la notion de *développement durable* (BRUNTLAND [1987])[2]. Le développement durable fait l'objet de deux approches. Dans l'approche de la « soutenabilité forte », les processus de production deviennent moins intensifs d'un point de vue environnemental et la contribution de la technologie et de ses changements sont fondamentaux (DALY [1991]). Dans celle de la «soutenabilité faible », les enseignements de la théorie du capital sont étendus au capital naturel[3] et il est considéré que le jeu du marché concurrentiel finira toujours par rendre rentable le développement de *« backstop technologies*[4] *»*, comme l'énergie solaire ou la fusion nucléaire (NORDHAUS [1973]). On peut alors souligner que les potentialités et les conceptions du changement technologique sont au cœur de ces deux approches, particulièrement lorsque l'on s'intéresse au domaine de l'énergie. Ce

---

[2] Le rapport BRUNTLAND [1987] contient plusieurs définitions du développement durable. Celle qui est le plus largement citée le définit comme *« un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs »* (*ibid*. p. 51). Mais il le définit également comme *« (…) un processus de transformation dans lequel l'exploitation des ressources, la direction des investissements, l'orientation des techniques et les changements institutionnels se font de manière harmonieuse et renforcent le potentiel présent et avenir permettant de mieux répondre aux besoins et aspirations de l'humanité. »* (*ibid*. p. 55) Même si la notion de développement durable demeure assez floue, ses diverses interprétations se rejoignent sur quelques points fondamentaux : l'idée de croissance économique n'est pas remise en cause, les interactions entre le système économique et l'environnement naturel ne peuvent plus être ignorées, de même que leurs conséquences sur l'équité intra et intergénérationnelle.

[3] Le capital naturel intègre tout actif naturel fournissant un flux de services économiques ou écologiques au cours du temps.

[4] La notion de *« backstop technology »* est souvent utilisée par les théories des ressources épuisables. N'ayant pas de véritable traduction en français, on peut la concevoir comme une technologie « limite », ou une technologie « de la dernière chance », qui pourrait permettre à l'économie de s'affranchir de la contrainte naturelle.

premier chapitre, à visée introductive, a pour objectif de rappeler la prégnance du facteur technologique sur le fonctionnement et l'évolution des systèmes énergétiques.

Dans la Section 1, nous rappellerons d'abord les enjeux technologiques sous-tendant la définition et le fonctionnement des systèmes énergétiques. Dans un second temps, nous évoquerons l'évolution des grands régimes énergétiques depuis le début du XIXème afin d'y situer les technologies correspondantes.

La Section 2 nous permettra d'apporter un certain nombre d'éléments afin de mieux appréhender la mesure et la définition des innovations énergétiques et, en référence au développement durable, des innovations environnementales.

Section 1. Le système énergétique : évolutions de longues périodes et enjeux technologiques

Appréhender l'évolution du système énergétique au cours du développement des sociétés industrielles nécessite dans un temps préalable de rendre compte de ses composantes et de ses articulations, mais également des manifestations du changement technique au regard de l'accomplissement de ses fonctions. Il convient ensuite de retracer les caractéristiques et les enjeux du système énergétique sur la longue période dans le but de repérer les grandes régularités et d'y situer les technologies correspondantes. Enfin, nous nous pencherons plus précisément sur les changements technologiques intervenus au cours des trois dernières décennies afin d'étudier les orientations des technologies de l'énergie dans un contexte institutionnel en mutation.

1.1. Définition du système énergétique et manifestations du changement technique

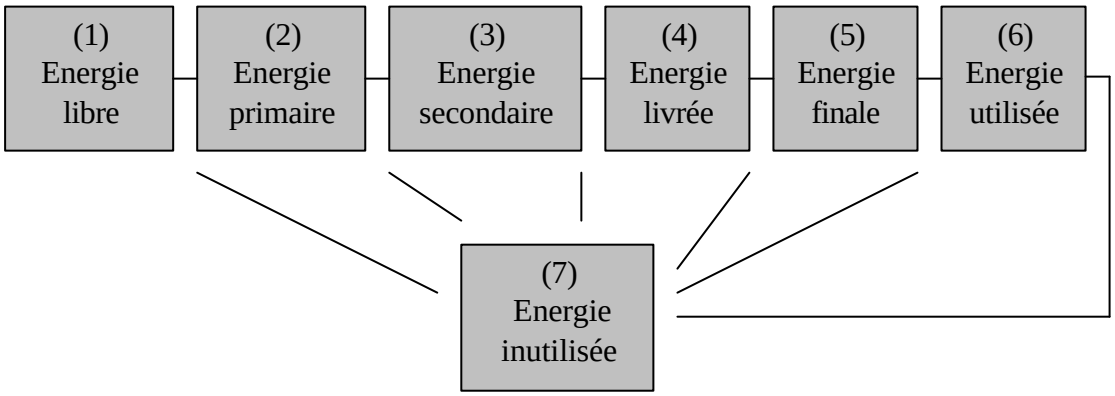
Avant de dresser un panorama de longue période des différentes phases énergétiques et de mettre plus précisément en évidence le rôle des technologies de l'énergie dans l'activité économique, il nous paraît nécessaire d'apporter certaines définitions à propos du système énergétique et sur certains concepts afférents.

1.1.1. La définition du système énergétique

Définir la notion de système énergétique, prise dans son acception organisationnelle, permet immédiatement de s'appuyer sur les éléments qui révèlent plus sa cohérence que son hétérogénéité. CHEVALIER *et al.* [1986, p. 115] définissent le système énergétique *« comme l'ensemble des processus technologiques, économiques et sociaux mis en action pour transformer l'énergie* « sauvage » *en énergies* « domestiques »*, afin de satisfaire les besoins en chaleur, lumière, force motrice et impulsion électrique »*. Le système énergétique, à défaut d'être marqué par l'homogénéité de son contenu (de part la diversité des énergies et des industries qui le composent), se caractérise par une cohérence d'ensemble quant à son fonctionnement (à l'image d'un processus itératif) et quant aux fonctions qu'il accomplit (la satisfaction de

besoins déterminés). Cette cohérence s'exprime schématiquement à travers trois niveaux interdépendants : un niveau physico-économique (i), un niveau technico-économique (ii) et un niveau monétaire (iii).

(i) Dans un premier sous-système physico-énergétique le système énergétique est constitué d'un ensemble de flux physiques. Le processus conduit *l'énergie libre* captée dans l'environnement naturel à travers une chaîne de conversion de laquelle elle ressort en *énergie utile* pour les consommateurs. Alors qu'elle est souvent traitée de manière schématique, duale, dans la littérature de l'économie de l'énergie, c'est-à-dire par *l'énergie primaire* qui « entre » dans le système énergétique et *l'énergie finale* qui en «sort », CHEVALIER *et al.* [1986, p. 128] décomposent plus finement le processus intervenant dans le système énergétique en un cycle de sept étapes :



En reprenant chacune de ces étapes, on peut définir (1) *l'énergie libre* comme l'ensemble des formes d'énergies présentes dans la nature sous forme de matière, de mouvement, de rayonnement ou de chaleur. Notons dans cette définition qu'en dehors de la matière, toutes les autres formes d'énergies libres peuvent être considérées comme des énergies renouvelables ne résultant en définitive que de deux sources (DESSUS, PHARABOD [1996], VERNIER [1997]) : le soleil, qui est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées et de la croissance des végétaux, et la terre, qui dégage notamment de la chaleur à travers des sources géothermiques. (2) *L'énergie primaire* représente la quantité d'énergie libre captée par l'Homme dans la nature[5]. Selon PERCEBOIS [1989, p.

[5] Dans une approche plus « globalisante » intégrant la biosphère on pourrait également concevoir que l'énergie primaire est représentée par la quantité d'énergie libre captée par tous les organismes vivants, comme par exemple le soleil absorbé par les plantes.

80] si l'on se limite aux énergies commercialisées on peut considérer qu'il existe quatre formes principales d'énergies primaires :

- le charbon et les différents combustibles minéraux solides (la houille, le lignite) ;
- le pétrole brut ;
- le gaz naturel, qu'il soit sec ou associé selon qu'il se trouve mêlé ou non à du brut ;
- l'électricité primaire[6], principalement d'origine hydraulique et nucléaire ;
- et nous plaçons volontairement en aparté les énergies renouvelables : la chaleur produite par les panneaux solaires thermiques et par les sources géothermiques, l'électricité produite à partir des éoliennes et des panneaux solaires photovoltaïques.

Ces formes d'énergie primaires peuvent être employées telles qu'elles ou après quelques modifications physiques mineures[7], mais elles sont souvent transformées par voie physique, chimique ou biochimique en (3) *énergies secondaires* (ou *énergies dérivées*) qui est la forme sous laquelle l'énergie primaire sera consommée[8]. D'un point de vue quantitatif l'énergie secondaire correspond à l'énergie primaire de laquelle on déduit les pertes énergétiques liées à la transformation. Dans le même principe (4) *l'énergie livrée* représente la quantité d'énergie secondaire moins les pertes dues au transport, et (5) *l'énergie finale* est la quantité d'énergie livrée effectivement et consommée au cours d'une période donnée[9]. Enfin, (6) *l'énergie utilisée* (ou *énergie utile*) est la quantité d'énergie ayant servi à satisfaire les besoins des différents consommateurs compte tenu des pertes des appareils de transformation. Depuis l'énergie libre jusqu'à l'énergie utilisée, cette chaîne de transformation laisse apparaître un certain nombre de pertes entre chaque maillon. La quantité de cette (7) *énergie inutilisée* va être directement liée à la fois à la chaîne énergétique qui, selon sa longueur, va occasionner plus ou moins de pertes « fatales » inhérentes au second principe de la

[6] Pour ce qui concerne l'électricité on dénomme par convention « primaire » la production d'origine hydroélectrique, nucléaire, géothermique, éolienne et solaire photovoltaïque, c'est-à-dire celle qui ne provient pas de la combustion d'énergie fossile (MARTIN [1992]).

[7] C'est le cas du charbon, du gaz naturel et de l'électricité.

[8] C'est le cas par exemple du pétrole brut qui peut être transformé en différents produits pétroliers (l'essence, le fuel lourd, le fuel domestique), ou du charbon qui peut être transformé en gaz manufacturé.

[9] La comptabilité énergétique intègre alors à l'énergie finale les variations de stocks.

thermodynamique[10], et au rendement moyen affiché par les technologies de conversion. En conséquence, la quantité d'énergie finale (et donc la quantité d'énergie primaire) nécessaire à la satisfaction d'un besoin particulier va varier assez sensiblement selon la nature de l'énergie utilisée et le rendement des appareils de production et d'utilisation.

Ce cycle énergétique permet donc de donner une vision générale du système énergétique selon une approche physico-économique. Cette dernière présente un intérêt particulier pour les systèmes de comptabilités énergétiques puisque c'est à partir de cette trame qu'ils sont élaborés. En fonction de leurs objectifs, ils retracent au minimum une étape de ce cycle, souvent plusieurs, mais intègrent rarement la totalité des étapes. De manière plus pratique, les économistes de l'énergie s'intéressent essentiellement à l'énergie utile, c'est-à-dire à l'énergie réellement disponible à la sortie du système énergétique, au niveau du besoin satisfait. Cependant il est très difficile de connaître avec précision la structure complète du parc des équipements et des technologies de production / transformation et d'utilisation qu'ils intègrent, ce qui contraint à limiter la comptabilisation de l'énergie consommée là où son repérage est statistiquement possible, c'est-à-dire au niveau de l'énergie primaire et au niveau de l'énergie finale. Concrètement cette comptabilisation passe par la construction du bilan énergétique[11].

(ii) Le système énergétique comprend à un deuxième niveau un sous-système technico-économique. Il met en évidence l'ensemble des technologies de conversion de l'énergie employé dans les activités de prospection / exploration, de production, de transformation, de transport / distribution et de consommation et jusqu'au service rendu. Ce sous-système reflète un ensemble de flux techniques et financiers, supportant les

---

[10] Les transformations énergétiques sont soumises aux deux premiers principes de la thermodynamique. Le premier principe de « conservation de l'énergie » énonce que la quantité d'énergie soumise à un processus de transformation se retrouve intégralement sous d'autres formes à la fin de ce processus. Selon le second principe de « dégradation de l'énergie » la quantité d'énergie utilisable sous forme mécanique, après transformation dans un système fermé, diminue obligatoirement, c'est la loi d'entropie. Pour une présentation des principes de la thermodynamique voir notamment CHEVALIER *et al.* [1986, p. 118], et FAUCHEUX et NOEL [1995, p. 39]).

[11] Le bilan énergétique peut être défini comme *« une représentation comptable de la façon dont est produite, importée, transformée et utilisée l'énergie consommée par une nation* [ou toute autre zone géographique] *au cours d'une période de temps donnée, l'année généralement »* (PERCEBOIS [1989, p. 81].

flux physiques et fondant une certaine cohérence du système énergétique à travers un découpage en filières, elles-mêmes articulées en termes de technologie, de marchés et de capitaux (HOURCADE et LABROUSSE [1987]). Les analyses en termes de filières auxquelles nous pourrons nous référer par la suite peuvent servir également à mettre l'accent sur les dimensions micro et macro-économiques et les contraintes, notamment écologiques et sociales, du développement d'un type de technologie de l'énergie particulier.

(iii) Enfin à travers le sous-système des prix, la diversité des filières explique les écarts de coûts des produits énergétiques selon les formes d'énergie, les conditions naturelles d'exploitation et les technologies utilisées. Sur les marchés énergétiques lorsque les prix de produits substituables s'égalisent, les écarts de coûts se monétarisent pour traduire des formes de rentes (minières, de qualité, de position). Par ailleurs, comme l'ensemble des ressources naturelles sont essentiellement non reproductibles, elles peuvent être détenues par des propriétaires « non-producteurs ». Ainsi les propriétaires de droit ou de fait peuvent profiter de cette situation pour capter sur les utilisateurs de ressources des rentes de monopoles. Les rentes monétarisées déterminent le niveau de surplus des offreurs, alors que les rentes non-monétarisées représentent le surplus des demandeurs. D'une manière générale l'appropriation du surplus est à la source des conflits pouvant affecter profondément les relations hiérarchisées liant les différents groupes d'agents entre eux (les individus, les entreprises, les groupes sociaux ou les pays)[12].

---

[12] On retrouve également cette articulation dans la définition du système énergétique donnée par DEBEIR *et al*. [1986, p. 24]. Ils conçoivent un système énergétique comme *« (…) la combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en œuvre de sources d'énergies déterminées et par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux, lesquels se développent et se renforcent sur la base de ce contrôle ».* Ainsi une première série d'éléments de la définition d'un système énergétique concerne ses caractéristiques écologiques et techniques : *« (…) l'aire et les techniques d'approvisionnement de l'énergie primaire, les modes de sa collecte et de son extraction, de son transport et de son stockage, les types de convertisseurs et les formes d'énergie finale, enfin et surtout, les rapports mouvants de concurrence et de complémentarité entre les diverses filières »*. Une deuxième série d'éléments, indissociable des précédents concerne : *«(…) les formes d'appropriation, qui commandent elles-mêmes l'agencement des convertisseurs et les modes de consommation de l'énergie »*.

A travers cette rapide présentation nous voyons que ces trois niveaux d'analyse du système énergétique possèdent en fait un degré d'autonomie suffisante pour constituer un domaine de connaissances propre avec ses outils et « ses lois ». Cependant, compte tenu des liens très étroits qu'il existe entre la réalité physique de l'énergie, sa réalité industrielle et sa réalité monétaire, on ne peut pas analyser un seul de ces sous-systèmes sans se référer aux deux autres. Finalement rendre compte de la dynamique du système énergétique revient à analyser les trois sous-systèmes à travers leur autonomie et leur interdépendance.

1.1.2. Les manifestations du changement technique sur les systèmes énergétiques

1.1.2.1. L'accroissement de la variété technologique des systèmes énergétiques

Les diverses innovations des technologies de l'énergie, par exemple sur les procédés d'extraction ou de conversion, ont pour conséquence de transformer les systèmes énergétiques. Ces derniers sont alors modifiés dans le sens d'une plus grande variété technologique. Selon SAVIOTTI [1991,1994] le concept de variété est utile pour compléter les effets quantitatifs d'une innovation habituellement retenus, par la prise en compte des aspects qualitatifs. Ainsi l'augmentation de la variété va devenir une caractéristique du développement d'un système économique, tout comme l'augmentation de la croissance de la productivité, les deux tendances ne s'excluant pas mais allant de pair. Si on s'en tient à la définition de la variété comme *« the number of distinguishable types of actors, activities, and outputs required to characterize an economic system »* (SAVIOTTI, [1994, p.27]), il est nécessaire de la compléter par un critère de distinction plus fin. En effet, s'il est commode d'établir des différences entre des artefacts techniques distincts, comme une centrale nucléaire et une centrale thermique alimentée au charbon, la tâche est moins aisée pour distinguer les objets d'une même filière technique découlant tous d'un même principe, par exemple les différents types de turbines à gaz. Deux méthodes, le calcul de l'entropie et la mesure de la diversité de WEITZMAN [1992], permettent toutefois de calculer la « distance » technique d'objets appartenant à une même population[13]. Dans ce cadre, on peut en conclure immédiatement que la variété des systèmes énergétiques s'est accrue dans

[13] Voir DE ALMEIDA [1999] pour une application de ces deux méthodes de calcul de la diversité à l'évolution de l'industrie des moteurs électriques.

diverses directions au cours de ces trente dernières années : des technologies énergétiques entièrement nouvelles sont apparues (l'énergie nucléaire, le solaire photovoltaïque), des procédés traditionnels concernant certaines énergies renouvelables (l'éolien, le solaire thermique, la combustion de la biomasse) ont été réactivés, modernisés et réincorporés dans les systèmes énergétiques grâce à l'ouverture de niches très localisées, des nouveaux procédés d'utilisation finale de l'énergie (chauffage électrique) se sont substitués à d'autres à travers un renouvellement complet des technologies. Ces quelques exemples suffisent à donner les signes certains d'un accroissement de la variété des systèmes énergétiques au cours des dernières décennies. Selon MARTIN [1999, 2000] les systèmes énergétiques sont devenus ainsi plus « compliqués » dans le sens où désormais de plus en plus d'*outputs* deviennent des *inputs* d'une même opération ou d'une opération se situant plus en amont, mais aussi plus « complexes » (GONOD [1991]), à chaque fois que les relations entre les éléments constitutifs ne s'inscrivent plus dans un ordre hiérarchique et sont bouclantes, ce qui est le cas avec les cycles combinés ou la bi (ou tri) génération .

1.1.2.2. L'accroissement de l'efficacité des systèmes énergétiques

En fonction des définitions que nous avons apportées sur le système énergétique et ses composantes, il est possible d'évaluer un taux global d'efficacité de conversion de longue période[14] en rapportant le volume de tous les *inputs* du système (les ressources naturelles renouvelables et non renouvelables) à celui de tous les *outputs.* L'amélioration de l'efficacité énergétique fait référence à une réduction de l'énergie consommée pour un service rendu ou un niveau d'activité donné. Cette réduction de la consommation d'énergie est en général associée à des changements techniques : on parle dans ce cas de gains d'efficacité technique. Elle peut aussi résulter d'une meilleure organisation, d'une amélioration de l'efficacité économique du secteur, voire des changements globaux dans la structure de l'économie. LAPILLONE [1997] remarque que l'efficacité énergétique a donc un sens plus large que ce qui est généralement compris lorsqu'on fait référence implicitement à l'efficacité technique : elle englobe tous les changements qui accompagnent la diminution de la quantité d'énergie utilisée pour produire une unité d'activité économique, ou pour obtenir un niveau donné de confort.

[14] Pour ce faire il est nécessaire d'opter au préalable pour un système d'unités physiques harmonisé.

En cela, l'efficacité énergétique s'apparente à l'efficacité économique et inclut les changements économiques et technologiques.

MARTIN [2000] évoque les travaux sur l'efficacité énergétique qu'avait entrepris PUTNAM [1953] dans les années cinquante. Ce dernier avait entrepris de calculer un taux d'efficacité en discernant très finement les flux d'énergie d'une opération à l'autre puis en agrégeant sous forme d'une efficacité globale (*economic efficiency*) les rendements de conversion (*technical efficiency*) de l'ensemble des opérations de transformation. PUTNAM était arrivé ainsi à établir que le système énergétique des Etats-Unis affichait une efficacité globale de 30% en 1950, le Royaume-Uni 24%, l'URSS 23%, la France et l'Allemagne 20%, le Japon 13% et l'Inde 6%. Ces résultats devaient être replacés sur des tendances de longue période révélant elles-mêmes des variations significatives depuis le milieu du siècle précédent selon les pays : forte décroissance de l'efficacité du système énergétique de l'URSS, faible croissance de celle du Japon, doublement pour la France et l'Allemagne, quadruplement pour les Etats-Unis. Deux facteurs étaient à l'origine de l'explication de ces tendances : un facteur structurel qui découlait de la répartition de l'énergie utilisée entre la force motrice et entre la chaleur à basse et à haute température, un facteur technologique que traduisait l'efficacité technique de l'ensemble des opérations de transformation de l'énergie.

Même si aujourd'hui l'ordonnancement des systèmes énergétiques selon l'efficacité globale a été bouleversée, et bien que les estimations de PUTNAM n'aient jamais été vérifiées ni actualisées, il semble cependant que les extrapolations qu'il avait calculées jusqu'à l'an 2000 ont été largement dépassées. Dans les pays importateurs de sources fossiles l'efficacité globale des systèmes énergétiques s'est améliorée depuis les années 1950. Dans un premier temps par la substitution des hydrocarbures aux combustibles solides pour les usages de combustion, dans une deuxième période, au cours des années 1970, par des améliorations sans précédent des rendements techniques des opérations de transformation physiques des flux d'énergie suite à la hausse des prix relatifs des sources fossiles. Cette pression sur les prix s'étant atténuée depuis les années 1980, ces évolutions n'ont pas été remises en cause, au contraire, elles ont été consolidées et rendues quasiment irréversibles par un ensemble de progrès technologiques, comme l'informatisation ou l'utilisation de nouveaux matériaux, et par les politiques de protection de l'environnement. Cependant cette efficacité s'est très

inégalement diffusée selon les régions du monde, comme dans les pays d'Europe centrale et orientale et dans de nombreux pays en développement (PED) où un large potentiel d'efficacité reste encore à exploiter. Faute de pouvoir précisément le mesurer, on peut l'estimer au moins partiellement en comparant les variations de l'intensité énergétique de l'activité économique sur la longue période, dont la majeure partie peut être attribuée à l'élévation de l'efficacité des systèmes énergétiques.

1.2. L'intensité énergétique et ses tendances de longue période

L'intensité énergétique peut être définie comme le ratio entre une consommation d'énergie (mesurée en unité énergétique : tonne équivalent pétrole, joule…) et un indicateur d'activité mesuré en unité monétaire à prix constants (PIB[15], valeur ajoutée…). C'est un indicateur privilégié utilisé chaque fois que l'on veut évaluer l'efficacité énergétique au niveau économique, et pas seulement sur le plan technique[16].

La relation entre l'efficacité technologique et l'intensité énergétique s'atténue au fur et à mesure que s'accroît le niveau d'agrégation retenu[17] (soit une usine, une branche ou l'ensemble de l'économie) (BIROL et KEPPLER [2000a]). L'intensité est utilisée chaque fois que l'efficacité énergétique est mesurée à un haut niveau d'agrégation dans l'économie tout entière ou dans un secteur.

---

[15] SUN [2001] s'est interrogé sur la pertinence d'utiliser soit le lien *PIB*-énergie, soit le lien *PNB*-énergie pour calculer l'intensité énergétique d'un pays. Partant du constat que, même si de nombreuses études se sont basées sur le lien PNB-énergie consommée, notamment aux Etats-Unis avant 1980 et que la différence entre les montants du PIB et du PNB est en moyenne faible (moins de 3% pour l'exemple des Etats-Unis entre 1970 et 1981), il est approprié d'utiliser le PIB. En effet, d'une part «l'espace» statistique du PIB et de la consommation d'énergie est le même, à savoir le territoire sur lequel l'énergie est utilisée pour la création de richesses, alors que le PNB enregistre également les activités des nationaux à l'étranger. D'autre part, dans un contexte de globalisation de l'économie, les firmes des pays industrialisés délocalisent de plus en plus d'activités vers les pays en développement ou émergents, déplaçant de ce fait une part de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre liées. Il en conclut que la relation PNB-consommation d'énergie est inopérante.

[16] Pour une revue critique du concept d'intensité énergétique voir PERCEBOIS [1979].

[17] Théoriquement, au niveau d'une machine et pour la production d'une unité d'*output*, tant que les proportions de chaque facteur de production restent invariables l'efficience énergétique et l'intensité énergétique sont égales.

Le rapport de la consommation totale d'énergie (*E*) au PIB (*Y*) permet ainsi d'évaluer le « contenu énergétique » de la production d'un pays ou d'une zone économique. Pour un niveau et une structure donnés de PIB, la quantité d'énergie primaire consommée par un pays pendant une année sera fonction des technologies utilisées aux différents niveaux de la chaîne énergétique. Inversement, pour une technologie donnée le volume d'énergie primaire requis pour obtenir un certain volume de PIB sera directement lié à la structure de cette production. Celle-ci est déterminée par le poids relatif des grands secteurs de l'économie (notamment le secteur industriel), par la nature du système de transport (plutôt collectif ou individuel) et, d'une manière plus générale, par l'ensemble des habitudes socio-économiques des consommateurs d'énergie. Il apparaît donc qu'une marge de manœuvre existe dans l'ensemble des choix qui agissent sur l'intensité énergétique, même si les prix de l'énergie jouent un rôle important.

1.2.1. Les déterminants temporels de l'intensité énergétique

L'intensité énergétique a longtemps été considérée comme rigide dans les modèles économiques qui faisaient l'hypothèse d'une élasticité constante égale à 1 $\left(\frac{\Delta E / E}{\Delta Y / Y} \cong 1\right)$. Mais comme le souligne PERCEBOIS [1989, p. 85] *« Il n'y a pas de fatalisme dans la relation énergie-croissance économique, ni fatalisme technologique, ni fatalisme socio-économique »*. Les analyses rétrospectives faites à partir du développement des pays industrialisés[18], et plus récemment des pays en développement, ont montré des élasticités variables. L'évolution de longue période de l'intensité énergétique présente deux phases caractéristiques[19] représentées par une courbe en accent circonflexe : elle augmente dans la phase d'industrialisation pour atteindre un maximum et décroît dans un second temps (l'élasticité est alors inférieure à 1). Le maximum de l'intensité énergétique est quant à lui décroissant en fonction de l'époque à laquelle il a été atteint par un pays : 1,08 pour le Royaume-Uni en 1880, 0,99 pour les

[18] A titre d'exemple, le PIB de la zone OCDE s'est accru de plus de 30% entre 1973 et 1986 alors que la consommation d'énergie primaire n'a augmenté que de 4% (chiffres cités par PERCEBOIS [1993, p.7]).

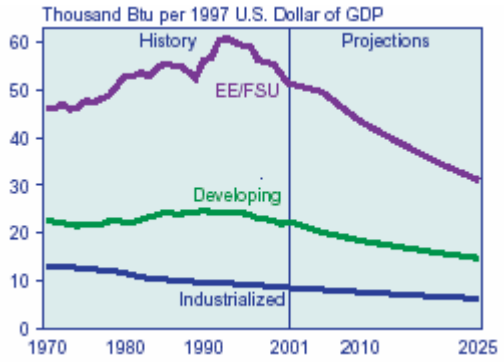
[19] L'intensité énergétique peut connaître toutefois des périodes de stabilisation comme celle observée entre 1960 et 1975 aux Etats-Unis, au Royaume-Uni, en RFA et en France. Pour cette période plusieurs explications peuvent être avancées dont le ralentissement des améliorations des rendements énergétiques ou les prix bas de l'énergie (voir PERCEBOIS [1989]).

Etats-Unis et 0,88 pour l'Allemagne en 1920, 0,60 pour la France en 1930 (MARTIN [1992]). VILLA [1998, p. 10] considère que la ligne reliant l'ensemble des maxima de l'intensité énergétique représente *« la "vraie" courbe de progrès technique au niveau mondial »* en ce qui concerne les technologies de l'énergie.

Les grands pays industrialisés se sont signalés par une baisse séculaire de leur intensité énergétique[20]. Au cours des dernières décennies celle-ci a connu une décroissance de 1,4% en moyenne par an de 1970 à 2001. Les prévisions établies jusqu'à 2025 confirment quasiment la même tendance, avec une baisse moyenne de 1,3% par an (EIA [2003]).

Ces tendances de longue période sont principalement attribuées aux améliorations progressives apportées aux technologies utilisées tout au long de la chaîne énergétique, aux substitutions inter-énergétiques, à la disparition progressive des énergies non marchandes et à la tertiarisation de la structure du PIB (retrait des industries lourdes au profit des activités de services moins *energy intensive*).

Figure 1. Evolution de l'intensité énergétique (1970-2001, projections 2025)
Source : IEA [2003]



Les économies d'Europe de l'Est, ayant historiquement opté pour des formes extensives de croissance peu soucieuses d'économie d'énergie, possèdent toujours les intensités les plus élevées. Notons toutefois que depuis l'an 2000 une nette décroissance

[20] Toutefois, les pays anglo-saxons, dont le décollage de la production industrielle est intervenu plus tôt que les autres, montrent une tendance à la décroissance à partir d'un niveau très élevé d'intensité énergétique. Les pays dont la révolution industrielle a été plus tardive ont eux connu une évolution beaucoup plus « plate ».

a débuté, tendant à rattraper dans un premier temps le niveau prévalant au début des années 1990. Les projections jusqu'à 2025 font apparaître une baisse moyenne de l'intensité de 2,1% par an. L'intensité énergétique observée dans les PED est supérieure à celle des pays industrialisés, *a fortiori* si l'on comptabilise l'énergie non commerciale (voir la Figure 1). Les PED consomment en moyenne entre 0,2 et 0,7 tonnes équivalent pétrole / habitant / an[21]. Cependant l'efficacité de leur système énergétique appréhendée à travers l'intensité est plus faible que dans les pays industrialisés. Il n'y a donc pas de corrélation entre la consommation énergétique *per capita* et l'intensité. Par contre la corrélation est plus clairement établie entre la consommation d'énergie par habitant et la productivité apparente du travail. On peut établir alors que les PED consomment une faible quantité d'énergie par habitant, cette dernière étant en partie gaspillée : les faibles revenus par habitant et les rendements peu élevés du système énergétique expliquent la valeur relativement élevée de l'intensité énergétique.

1.2.2. Les déterminants géographiques de l'intensité énergétique et les choix technologiques

Concernant les déterminants géographiques, pour une période donnée, la consommation d'énergie nécessaire à l'obtention d'une unité monétaire de PIB varie beaucoup dans l'espace, même lorsque l'on compare des pays de même niveau de développement économique[22]. Compte tenu de ses habitudes socio-économiques un pays consommera d'autant plus d'énergie que son climat est en moyenne froid et que son territoire est très vaste. C'est pourquoi la branche «transports» a un poids plus important dans l'intensité énergétique du PIB des Etats-Unis qu'en Europe ou au Japon (NAGATA [1997]).

Par ailleurs, les choix des technologies de l'énergie peuvent être, à structure productive égale[23], à l'origine d'écarts importants quant au niveau de l'intensité. A tout

[21] Données extraites du site internet de la Banque Mondiale, www.worldbank.org/energy.

[22] Par exemple, en 2000 il fallait deux fois plus d'énergie primaire pour produire 1 000 $ de PIB aux Etats-Unis qu'au Japon (IEA [2001]).

[23] Typiquement la relation énergie-capital-travail est établie dans les fonctions de production de type *K.L.E.M.* (*K* étant le capital, *L* le travail, *E* l'énergie, *M* les matières premières non énergétiques). Elles permettent de mettre en évidence à la fois les différentes combinaisons de facteurs de production en

moment il existe, pour rendre un même service énergétique, un éventail de technologies disponibles n'affichant pas la même efficacité énergétique. Les choix effectués vont dépendre du prix relatif de chaque technologie. Au cours des périodes de prix peu élevés[24] de l'énergie les choix seront fait avec une moindre considération des rendements énergétiques des appareils (en dehors des branches «énergivores »), alors qu'en période de hausse des prix les choix tendront à minimiser les coûts des équipements maximisant les économies d'énergie (BIROL et KEPPLER [2000b]). Les prix de l'énergie (comprenant ou pas une taxe environnementale) apparaissent ici comme la variable déterminante, puisqu'un changement dans les prix relatifs entraîne des changements technologiques « induits » au sens de HICKS[25].

Enfin, de manière distincte, additionnelle ou autonome aux facteurs décrits précédemment, un « effet de rebond[26] » peut intervenir. Il se manifeste suite à l'adoption de nouveaux équipements améliorant l'efficacité énergétique. *Ceteris paribus* une quantité d'énergie moindre est nécessaire pour fabriquer le même produit, entraînant une baisse du coût de production. Si cette baisse est effectivement répercutée dans le prix de vente, il s'en suivra une hausse de la demande qui suscitera une augmentation de la production du bien et donc de la consommation d'énergie, annihilant les gains d'efficacité de départ.

---

fonction de leur substituabilité (*« putty-putty », « clay-clay », « putty-clay »*) et les caractéristiques de la demande d'énergie (PERCEBOIS [1989]).

[24] On observe toutefois que si les prix de l'énergie baissent après une période au cours de laquelle ils ont été élevés, un effet de cliquet maintient les technologies à un certain niveau d'efficience.

[25] L'idée de changement technologique induit est une version « moderne » de l'hypothèse formulée par HICKS à propos des « innovations induites » : *« (…) a change in the relative prices of the factors of production is itself a spur to invention, and to invention of a particular kind – directed to economising the use of the factor which as become relatively more expansive »* (HICKS [1932]).

[26] Pour un *survey* sur ce thème et un état des débats, voir le numéro spécial de *Energy Policy*, Issue 6-7, Volume 28, 2000.

1.3. Les évolutions de longue période du système énergétique dans les pays industrialisés

Comprendre les caractéristiques et les enjeux du système énergétique actuel nécessite de se rapporter au moins brièvement à l'évolution de longue période des modes de fonctionnement énergétiques passés. Le propos n'est pas ici de s'engager dans une reconstruction historique détaillée de très longue période pour expliquer la succession de toutes les structures énergétiques passées[27], mais de repérer les grands régimes énergétiques et les retournements majeurs intervenus depuis le début du XIXème siècle afin d'y situer les technologies correspondantes.

1.3.1. Les grands régimes énergétiques : repères historiques

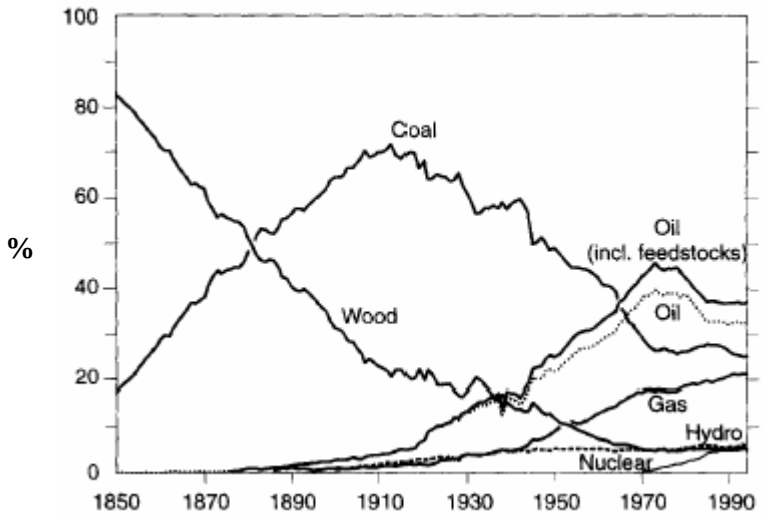
Avant la révolution industrielle les systèmes énergétiques reposaient sur les ressources traditionnelles renouvelables (bois, biomasse, eau, moulins à vent) exploitées localement. La densité et la disponibilité de ces ressources énergétiques étaient marquées par de fortes contraintes de sites. Les seules formes de conversion énergétique consistaient essentiellement à produire de la chaleur et de la lumière. En moyenne la consommation énergétique ne dépassait pas 0,5 tep/pers/an (GRUBLER et NAKICENOVIC [1996]).

Le premier « régime énergétique » marqué par la domination d'une source primaire commerciale est celui du charbon. Ce régime, né en Grande-Bretagne de la nécessité de trouver un substitut au bois, a alimenté la révolution industrielle du XIXème siècle et ses principales innovations : la machine à vapeur, le haut fourneau, l'éclairage à partir du gaz de charbon. Mais *« l'industrie charbonnière n'a pas suscité la révolution industrielle, elle s'est contentée de satisfaire la demande qui lui était adressée »* (CHEVALIER *et al.* [1986, p.45]). L'entrée du charbon dans les bilans énergétiques s'est effectuée à des rythmes variables selon les pays et a été fonction de quatre facteurs portant sur la demande : la diffusion des machines à vapeur, la production de

[27] Sur ce thème DEBEIR *et al.* [1986] analysent selon une perspective historique un certain nombre de structures énergétiques depuis celles de l'Antiquité occidentale jusqu'aux sociétés industrialisées d'Europe et d'Amérique du milieu des années 1980.

fer, la création et l'extension des réseaux de gaz de ville et la banalisation des poêles à charbon. Cependant l'utilisation du cycle de la vapeur représente la première transformation d'une source d'énergie fossile en force de travail. Plus tard, le développement des principaux secteurs industriels comme la sidérurgie ou les chemins de fer vont reposer quasi exclusivement sur le charbon. A titre d'illustration la consommation énergétique moyenne s'est élevée à 2 tep/pers/an au milieu du XIXème siècle en Angleterre. Durant la période 1800-1913, et à la suite d'une multitude d'innovations technologiques dans les procédés d'exploitation et de transformation, les seules ressources charbonnières ont fourni de 10 jusqu'à plus de 60% des consommations d'énergies commerciales mondiales (PODOBNIK [1999]) (voir la Figure 2 ci-après). Après la seconde guerre mondiale le charbon occupe encore 80% du bilan énergétique des pays d'Europe occidentale, du Japon et de l'Union soviétique. Cette prépondérance ne s'est toutefois pas étendue aux pays en développement où 70% de leur consommation d'énergie provenait à la même époque de la biomasse (bois déchets végétaux ou animaux) (MARTIN [1992]).

Figure 2. Evolution de la part des ressources dans la production d'énergie primaire
Source : GRUBLER et NAKICENOVIC [1996]



Une transition à partir de ce premier régime s'est opérée dans un premier temps par une augmentation de la diversification à la fois des technologies d'utilisation finale et des sources d'énergie primaires. La principale innovation a été l'introduction et le développement de l'électricité comme vecteur énergétique facilement convertible en chaleur, en lumière ou en force de travail. Mais il faut citer également le développement

du moteur à combustion interne qui a ensuite révolutionné les transports individuels et collectifs. Concernant les énergies primaires, c'est à partir de l'entre-deux guerres que la production de charbon commence à stagner dans le bilan énergétique mondial. Les causes sont multiples : de la concurrence croissante de l'hydroélectricité dans certains pays, aux facteurs techniques et économiques qui ont empêché le développement d'un véritable marché mondial. Débute alors le basculement vers un nouveau modèle énergétique fondé sur les hydrocarbures ; aux Etats-Unis en particulier où le « fordisme », avec le développement de la production et de la consommation de masse de produits manufacturés, entraîne une forte augmentation de la consommation de produits pétroliers et d'électricité. La part de l'énergie mondiale fournie par le pétrole passera ainsi de 5% en 1910 à 50% en 1973 (PODOBNIK [1999]). Dès sa constitution[28] l'industrie du pétrole a concurrencé l'industrie charbonnière, tout en bénéficiant de ses avancées technologiques, et a cherché à s'approprier de nouvelles utilisations comme l'a montré par la suite la monopolisation du marché des carburants automobiles. Suivant la croissance de la demande d'énergie, le pétrole, bénéficiant de facilités techniques de transport et de stockage, remplacera progressivement le charbon pour devenir la source d'énergie dominante dans les pays industrialisés, malgré la chute consécutive aux deux chocs pétroliers. N'ayant pratiquement pas d'usages captifs et soumis à des obstacles techniques et économiques liés à son transport et à sa distribution, le gaz naturel, apparu d'abord comme un sous-produit du pétrole, fera une percée significative dans le bilan énergétique des pays industrialisés, en particulier en tant que facteur de diversification (voir le Tableau 1 ci-dessous). La technologie des réacteurs nucléaires a connu une très forte croissance de 1970 à 1985. Durant cette période la capacité installée a augmenté en moyenne de 18% par an, passant de 17 à 238 GW. Malgré des prévisions très optimistes à son égard dans les années 1970, sa diffusion est restée limitée pour atteindre 380 GW en 2000.

[28] La naissance de l'industrie pétrolière contemporaine est souvent datée du 27 août 1859, jour de la découverte d'un gisement peu profond à Titusville en Pennsylvanie aux Etats-Unis (STOBAUGH et YERGIN [1983], DEBEIR *et al.* [1986]).

Tableau 1. Part de chaque ressource dans la fourniture d'énergie primaire mondiale en 1973 et en 2000 (% et total en millions de tep).
Sources : à partir de MARTIN [1992], IEA [2002]

	Pétrole	Charbon	Gaz	Biomasse Et déchets	Hydro.	Nucléaire	Energies renouv.	Elec. primaire	Total en M tep
1900	2,07%	52,4%	0,7%	44,4%	-	-	-	0,3%	965
1950	24,01%	45,11%	7,2%	19,61%	-	-	-	3,6%	2099
1973	45,0%	24,9%	16,2 %	11,1%	1,8%	0,9%	0,1%	2,8%	6 040
2000	34,9%	23,5%	21,1 %	11,0%	2,3%	6,8%	0,5%	9,6%	9 963

Ce panorama a mis en évidence les principaux changements structurels du système énergétique mondial et les technologies qui lui sont associées. Cela nous conduit d'abord à remarquer que, hormis la transition initiale des énergies renouvelables traditionnelles vers les combustibles fossiles, le principal retournement de la période « moderne » s'est opéré entre le charbon et le pétrole, c'est-à-dire entre sources d'énergies fossiles. A chaque phase ces évolutions ont été soutenues par de nombreuses innovations tant du côté des technologies d'exploitation/production de l'énergie, que des technologies concernant la consommation finale. Suivant PODOBNIK [1999] on peut également souligner la relative rapidité du passage d'un système énergétique à un autre. En termes de proportion dans le bilan énergétique mondial, le charbon a été supplanté par le pétrole en « quelques » décennies, ce qui, compte tenu de l'ampleur des transformations structurelles (technologiques, économiques, institutionnelles et sociales) que cela implique, est relativement « court » (50-80 ans ?).

1.3.2. Des prémices d'une diversification des technologies de l'énergie à la consolidation de l'industrie pétrolière

Après avoir dressé ce panorama historique des régimes énergétiques, il convient d'analyser plus spécifiquement les changements technologiques survenus durant les trois dernières décennies. Au cours de cette période nous considérons les aspects systémiques du développement des technologies particulièrement importants dans le

domaine de l'énergie. Ils nous permettent de suivre l'évolution des stratégies technologiques des firmes résultant des changements de perception de leur environnement institutionnel.

1.3.2.1. Un contexte technologique et institutionnel porteur de nouveaux signaux

Depuis le début des années cinquante le contexte technologique des industries de l'énergie n'a été marqué que de quelques innovations majeures, excepté l'énergie nucléaire civile soutenue depuis son émergence par de puissantes politiques technologiques fortement orientées vers des objectifs militaires. MARTIN [1996] dénombre : les turbines à vapeur surcritiques (Etats-Unis), le transport sur longue distance de l'électricité (Suède), les turbines à gaz de haute puissance (Suisse), la gestion assistée par informatique des centrales électriques (Etats-Unis), les centrales nucléaires électriques (Royaume-Uni) et l'extraction hydraulique du charbon (Etats-Unis).

Dans les industries du charbon, du pétrole, du gaz naturel et de l'électricité la plupart des technologies de production, de distribution et de conversion ont essentiellement bénéficié d'un certain nombre d'améliorations incrémentales. Cependant, certaines technologies semblent avoir atteint des limites quant à une progression de leurs performances. Tel a été le cas pour les turbines à vapeur qui ont permis une rapide progression de la production d'électricité dans les pays aux ressources hydrauliques limitées. Après un demi-siècle d'augmentation constante de l'efficacité de conversion due aux progrès faits sur certains composants (générateurs, pales des turbines, systèmes de refroidissement), les niveaux de conversion se stabilisent autour de 35% dans les années 1960 (ISLAS [1999]). Les améliorations des performances des centrales électriques thermiques ne reposent plus que sur des gains d'économies d'échelles, mais là aussi les tailles limites des turboalternateurs semblent avoir été atteintes aux alentours des 600 MW de puissance.

L'industrie pétrolière a suivi un sentier technologique similaire. Les activités d'exploration ont considérablement progressé dans les années 1950 avec l'introduction de l'enregistrement magnétique. Les années 1960 ont vu le passage des technologies

analogiques vers les technologies digitales, ce qui n'a pas toutefois accru le nombre de canaux d'enregistrement sismique compte tenu des limites rencontrées dans le traitement d'un nombre plus important de données. Les performances de forage ont également progressé avec la généralisation du forage *rotary* (BOURGEOIS [2000]). Néanmoins, les explorations sont restées centrées sur les zones déjà prospectées, comme les champs *off-shore* les plus accessibles dans le golfe persique et le golfe du Mexique. Depuis le développement des procédés de craquage catalytique des huiles lourdes au début des années 1940, le secteur du raffinage n'a pas connu d'innovations majeures dans la période suivante.

Ce contexte de relative stabilité technologique n'était pas uniquement lié à la rencontre de limites dans l'utilisation de technologies génériques (automatisation, traitement et stockage des données) dont les technologies de l'énergie dépendaient, mais résultait également d'un marché pétrolier offrant une ressource abondante et peu chère depuis les découvertes faites au Moyen-Orient. En conséquence, les compagnies pétrolières se sont principalement préoccupées de s'ouvrir et de consolider de nouveaux marchés, ainsi que de remplacer les ressources charbonnières par du pétrole, plutôt que de perfectionner encore de nouveaux procédés. Cependant, l'attitude des sociétés pétrolières allait changer à la suite de la perception des risques que pouvait impliquer cette inertie technologique dans un environnement institutionnel qui laissait entrevoir des transformations à venir de grande ampleur.

L'environnement dans lequel opèrent les industries de l'énergie commence à changer dans le cours des années 1960. Les pays propriétaires de la majorité des réserves d'hydrocarbures (Venezuela, Afrique du Nord, Moyen Orient) ont concédé l'exploitation de leurs gisements à des sociétés étrangères moyennant en contrepartie la perception de redevances et d'un niveau de recettes fiscales liés aux profits réalisés par les concessionnaires. Pour sortir de ce rapport de force très défavorable certains pays, influencés par la période de décolonisation et par la montée des thèses tiers-mondistes, mettent en place de nouvelles législations minières afin de récupérer une partie de la

rente pétrolière[29] (AYOUB [1996]). Ces nouvelles règles viennent ériger une frontière entre l'amont et l'aval où apparaissent les marchés *spot*. Ce mouvement défensif devait connaître un premier aboutissement en 1960 avec la création de l'OPEP. L'affaiblissement du pouvoir des *Majors*, la montée de la concurrence des Indépendants (les *« Minors »*) et la baisse des prix menaçaient de rallonger les temps de retour des investissements. Dans ce contexte un début de reconstitution du patrimoine minier des compagnies pétrolières passe par une diversification géographique des explorations vers des zones politiquement sûres. Les nouvelles découvertes en Alaska et en mer du Nord viendront conforter ces attentes, mais en partie seulement dans un premier temps, compte tenu de leurs difficultés naturelles d'accès.

Par ailleurs, dans la même période les pays industrialisés connaissent une première prise de conscience des problèmes environnementaux. Un certain nombre de préoccupations comme la pollution croissante de l'air par les émissions liées à la combustion des énergies fossiles (chaudières traditionnelles à grille et au charbon pulvérisé), le problème de la gestion des déchets de raffinerie (les installations sont inadaptées aux besoins de coupes plus légères et moins polluantes), les accidents de tankers (*Torrey Canyon* en 1967) vont conduire à l'édiction de nouvelles normes environnementales. Le *Air Quality Act* de 1967 et le premier *Clean Air Act* de 1970 adoptés aux Etats-Unis sont les premiers symboles formels de ce changement. Ainsi ces premiers signes d'un nouvel environnement réglementaire indiquaient qu'à l'avenir les coûts de production des énergies polluantes risquaient de s'accroître, à moins que de nouveaux changements technologiques interviennent dans les technologies de l'énergie mises en œuvre.

Mais les raisons explicatives de ces évolutions des technologies de l'énergie dans les années 1960 ne peuvent cependant pas être réduites aux savoirs accumulés grâce aux politiques publiques de recherche et développement (R&D) sur le nucléaire ou aux limites rencontrées par les technologies liées aux hydrocarbures. Ces évolutions ont également été influencées par les croyances et les perceptions du futur qui ont

[29] *« L'idée dominante, à l'époque, était que l'indépendance politique serait vide de sens si elle n'était pas accompagnée d'un transfert de la propriété et du contrôle de ces ressources des compagnies étrangères, surtout multinationales, au secteur public national. »*, AYOUB [1996, p. 131].

inspiré les prévisions technologiques des firmes. En effet, le contexte de l'époque se caractérise par une unanimité des références, notamment parmi les dirigeants des compagnies pétrolières, à une représentation pessimiste des approvisionnements mondiaux en hydrocarbures sur le long terme (FINON [1994]). Face aux anticipations de croissance des besoins des diverses régions du monde, les scenarii *« business as usual »* établissaient une raréfaction rapide des combustibles fossiles et une forte hausse des prix. Ces « prophéties » inspirées par la théorie des ressources épuisables de HOTELLING [1931], influencées par les milieux nucléaires, aboutissaient à la nécessité de remplacer les hydrocarbures avant la fin du siècle, par l'énergie atomique, par des carburants de synthèse dérivés du charbon, par l'hydroélectricité et les énergies éolienne et solaire. Ainsi, tout progrès éventuel dans les technologies d'exploration et de production des hydrocarbures étaient perçus comme inutiles puisque dans tous les cas de figure les ressources allaient diminuer à court terme. Mais comme le remarque MARTIN [1996], assez curieusement personne ne pensait à inverser cette logique : les ressources en pétrole étaient rares car les technologies disponibles ne permettaient pas d'identifier correctement et d'évaluer les réserves à long terme, en tenant compte des futures découvertes dans les zones géographiques encore inexplorées (par exemple l'*offshore* profond). Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 marqués par les hausses brutales des cours du pétrole[30] apparaîtront alors comme des signaux de confirmation des craintes d'un avenir énergétique tendu.

1.3.2.2. Les manifestations de nouvelles orientations technologiques

L'initiative d'un changement de direction des technologies de l'énergie *« away from oil »* n'est pas apparue à la suite des chocs pétroliers. Elle est clairement décelable dans les stratégies technologiques de nombreuses firmes de l'énergie dès le milieu des années 1960, période où pourtant la « pétro-prospérité » est à son apogée : la consommation d'hydrocarbures augmente en moyenne de 5% par an et les prix[31] du

[30] En octobre 1973 l'OPEP décide unilatéralement d'augmenter le prix de référence de l'*Arabian Light* qui passe de 2,98 à 11,65 dollars par baril en quelques mois. De juin à décembre 1979 une série de hausses dispersées conduisent à des augmentations du prix du baril jusqu'à 30 $ (Voir PERCEBOIS [1989] et AYOUB [1996] pour un rappel détaillé de l'évolution du marché international du pétrole et du contexte politique.

[31] En termes réels.

baril de pétrole se situent à un niveau moyen de 2 $ (MARTIN [1999]). Par la suite le financement public de la R&D va tenter d'initier les recherches vers des substituts au pétrole.

Dans un premier temps deux groupes de firmes, craignant un ralentissement des progrès des technologies de l'énergie, vont se tourner vers de nouvelles orientations (MAC KERRON [1996], MARTIN [1996]).

Un premier groupe va se tourner vers les technologies nucléaires, en particulier les réacteurs à eau légère (*light water reactors*, LWR). Il est constitué d'une part des grands constructeurs[32] présents dans l'amont électrique qui voient dans le nucléaire une extension de leur métier, d'autre part des groupes de construction mécanique[33] qui perçoivent une voie d'évolution de leur métier traditionnel de chaudiériste sous l'incitation de la menace concurrentielle des précédents (FINON [2000]). La première commande d'une centrale de 515 MW en 1963 par la *Jersey Central Power* and *Light Company* marque l'essor initial de l'énergie nucléaire, le *« great bandwagon market »*, et par la même occasion la fin des liens étroits entre le secteur des énergies fossiles et l'industrie électrique (MARTIN [1998]).

A la même époque, un deuxième groupe de firmes, les compagnies pétrolières semblent douter du futur de leur métier, au point de préparer *« a life after oil »* en s'orientant vers quatre nouvelles directions technologiques :

- la conception de plates-formes et d'outils de forage permettant d'atteindre des zones difficiles d'accès (*offshore* profond) pour exploiter de nouvelles ressources comme les schistes bitumeux ou les sables asphaltiques ;
- le développement de procédés de synthèse d'hydrocarbures à partir du charbon (liquéfaction, gazéification);
- la technologie nucléaire, avec notamment le rachat de la division atomique de *General Dynamics* par *Gulf Oil* en 1967 (MARTIN [1996]) ;
- le solaire photovoltaïque et d'autres technologies des énergies renouvelables (PERRIN [1984]).

[32] General Electric (boiled water reactor, BWR), Westinghouse (pressurized water reactor, PWR), AEG (licence BWR), GEC, Brown Bowery, Siemens (licence PWR), Schneider.

[33] Babcock & Wilcox, Combustion Engineering, GHH.

Malgré ces tendances affichées vers une certaine diversification technologique, le niveau des investissements engagés par les firmes est resté faible. Par contre, à la suite du premier choc pétrolier, à côté des interventions de réduction de la dépendance[34], les Etats vont rapidement abonder leurs budgets de R&D, particulièrement vers la mise au point de nouveaux carburants, vers les technologies nucléaires et les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque et l'éolien.

Bien avant les deux crises pétrolières des années 1970, divers types de substituts[35] aux produits dérivés du pétrole brut ont été recherchés. Dans des contextes historiques particuliers certains pays ont réussi à assurer, momentanément, la rentabilité de certains procédés. Ce fut le cas pour la liquéfaction de la houille en Allemagne pendant l'entre deux-guerres (procédé *Lurgi*) ou en Afrique du Sud (procédé *Sasol*) suite à la mise en place de l'embargo pour raison d'apartheid, ou plus récemment le plan alcool au Brésil. Aux Etats-Unis, au cours de l'été 1979, le Président CARTER met en place un plan qui doit assurer un approvisionnement de 500 000 barils de pétrole par jour. Il lance également un programme, financé en partie par une taxe prélevée sur les profits exceptionnels réalisés par les compagnies pétrolières, créant la *Synthetic Fuels Corporation*, visant à atteindre d'ici 1990 une capacité de production nationale de 2,5 millions de barils par jour de carburants liquides et gazeux extraits du charbon, de sables asphaltiques et de la biomasse. Cependant, après son élection REAGAN réduira très largement les ambitions et les financements de ce programme qui n'aura comme résultats aboutis que quelques projets ayant valeur de démonstration (STOBAUGH et YERGIN [1983]).

Le développement de l'énergie nucléaire a été considéré par plusieurs gouvernements comme la principale réponse de long terme à la dépendance pétrolière. Depuis les années 1950, le nucléaire électrogène a bénéficié des effets de reports des politiques publiques de R&D pour les technologies à finalité militaire. Des agences

[34] Les Etats industrialisés se sont engagés dans une recherche de la sécurité pétrolière avec notamment le développement d'une réglementation du stockage stratégique du pétrole et des produits pétroliers, la recherche de contrats d'Etat à Etat pour diversifier et garantir une partie des approvisionnements, la diversification des sources d'importation en provenance des pays non-OPEP et les soutiens au développement de sociétés pétrolières nationales (FINON [1994]).

[35] Comme l'éthanol à partir de la biomasse, le méthanol à partir du gaz ou du charbon, l'hydrogène.

publiques nucléaires, des cadres réglementaires destinés à faire face à la spécificité des risques technologiques associés et des environnements institutionnels marqués par des monopoles naturels, ont soutenu un véritable *« technology push »*. Aucune autre technologie de production énergétique n'a connu un développement aussi rapide entre 1970 et 1987. Durant cette période la capacité installée s'est accrue de 23 à 285 GW (PERCEBOIS [1989, 2003]). Ainsi, les décennies soixante-dix et quatre-vingt devaient devenir celles du nucléaire, comme les années soixante dix avaient été celles du pétrole. Il était prévu que la capacité occidentale atteigne de 2000 à 2500 GW à la fin du siècle, ce qui devait représenter plus de la moitié de la capacité de production électrique et plus du tiers du bilan énergétique mondial (FINON [2000]).

Or, la diffusion du nucléaire s'est limitée bien en deçà de ces espoirs initiaux. En effet dès 1975, une entrée en «crise » du nucléaire civil, illustrée par de nombreuses annulations de commandes de centrales en particulier aux Etats-Unis[36], sera causée par la conjonction de plusieurs facteurs : le ralentissement de la demande mondiale d'énergie primaire et de la demande d'électricité, suite au ralentissement de la croissance, venant atténuer le caractère indispensable du nucléaire ; la diminution des prix directeurs de l'énergie redonnant de l'attrait aux énergies fossiles ; la hausse importante du coût de construction des centrales, due aux difficultés de maîtrise technologique et de standardisation, entamant la compétitivité du kWh nucléaire par rapport au kWh des centrales au charbon[37]. Malgré la sévérité croissante des normes de sécurité imposées, le nucléaire a ensuite révélé progressivement le poids de l'acceptabilité sociale dans la diffusion d'une technologie de l'énergie. Le premier grave accident de *Three Miles Island* aux Etats-Unis en 1979, celui ensuite de *Tchernobyl* en URSS en 1986, et les problèmes de gestion des déchets ont accru la perception des risques associés au nucléaire. Finalement au niveau international, les processus d'apprentissages technologiques entre les équipementiers, les producteurs d'électricité et les agences publiques ont connu des aboutissements assez contrastés : ils ont été interrompus dans de nombreux pays (Pays-Bas, Italie), maintenus dans d'autres (Royaume-Uni, Etats-Unis), peu ont été exploités très efficacement (France, Japon). Ces

[36] 119 annulations de 1975 à 1988.

[37] En particulier dans les pays aux ressources charbonnières importantes.

évolutions technologiques se retrouvent assez bien dans la part qu'occupe actuellement le nucléaire dans la production d'électricité mondiale[38].

Durant les années 1960 et 1970, un certain nombre d'études prospectives[39] cherchent à démontrer que le futur énergétique peut se présenter différemment de la situation en cours en termes de production et d'utilisation de l'énergie. Ces scénarios proposent des *« soft energy paths»* accordant une place importante aux énergies renouvelables (LOVINS [1977]). En fonction de ces tendances, un certain nombre de firmes pétrolières et électromécaniques, parmi les plus importantes, lancent des programmes de recherche et créent des départements « énergies renouvelables ». Malgré ces implications les avancées n'ont été que très peu significatives au niveau international, les politiques publiques n'apportant pas le même niveau de soutien que pour les carburants de synthèse ou le nucléaire. Cependant, par la suite, les cas de développement significatif de l'éolien au Danemark, en Allemagne et en Californie montreront bien qu'il est possible de créer des contextes institutionnels (création de niches commerciales, politiques publiques incitatives) et organisationnels (réseaux d'apprentissages collectifs entre équipementiers et producteurs d'électricité) favorables aux énergies renouvelables[40].

Ces trois exemples des carburants synthétiques, du nucléaire et des énergies renouvelables sont doublement significatifs dans la mesure où ils montrent les signes de recherches de diversifications en dehors du pétrole, mais ils expriment aussi les difficultés de créer des contextes favorables au développement de nouvelles technologies de l'énergie.

---

[38] En 1999-2000 la part du nucléaire représentait 20% aux Etats-Unis (30% des capacités mondiales installées), 78,2% en France (17% des capacités mondiales installées, 55% de celles de l'Union européenne), 60,1% en Belgique, 35% en Allemagne, quasiment 30% en Espagne et en Finlande, 28,6% au Royaume-Uni et 3,1% aux Pays-Bas (PERCEBOIS [2003]).

[39] On peut citer l'étude ZEG (*Zero Energy Growth*) de la Ford Foundation [1974], proposant une réduction de la consommation d'énergie, la baisse de la part des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables, le « scénario énergétique pour les Etats-Unis 1975-2050 » de STEINHART [1977] décrivant un modèle énergétique en totale rupture en termes d'approvisionnements par rapport aux tendances en cours, le projet Alter du Groupe de Bellevue [1978] présentant un avenir énergétique autosuffisant pour la France axé à long terme sur l'énergie solaire.

[40] Cf. Chapitre 4.

1.3.2.3. La réactivation technologique et la réorganisation de l'industrie pétrolière

L'évolution du cadre géopolitique international et les grandes orientations des technologies de l'énergie nous ont permis de mettre en évidence l'apparition progressive de limites structurelles qui devaient entraîner inexorablement les systèmes énergétiques vers des prix élevés, des pénuries graves et la disparition du pétrole. Pourtant, une nouvelle dynamique va s'enclencher, aboutissant à un retournement de tendance. Elle va avoir pour principal effet de régénérer l'industrie pétrolière qui va opérer une réorganisation de l'ensemble de ses activités à partir de nouvelles bases. Trois facteurs complémentaires vont concourir à l'accomplissement de ce changement : les améliorations de l'efficacité énergétique, l'apparition de nouvelles technologies de la production d'électricité et le recentrage technologique des firmes pétrolières et para-pétrolières sur les activités d'exploration-production.

1.3.2.3.1. Les améliorations de l'efficacité énergétique

Dans de nombreux secteurs des progrès technologiques substantiels vont être accomplis dans l'efficacité de l'utilisation de l'énergie. Les Etats vont agir progressivement pour inciter les industriels et les consommateurs, dont les comportements et les choix technologiques ont longtemps été « faussés » par les bas prix, à adopter de nouveaux équipements ou à améliorer les actuels, à rationaliser leurs comportements d'utilisation. Mais du fait des différentes barrières entravant les fonctions d'allocation optimale des ressources du marché, la portée du seul effet-prix est insuffisante. Il est nécessaire de soutenir également les consommations pour les amener à des niveaux d'efficience difficilement atteignables, et de susciter des substitutions capital-énergie justifiables par les temps relativement courts de retour des investissements d'efficacité énergétique. Pour cela l'action des Etats va combiner des actions d'information, l'instauration de nouvelles réglementations pour la conservation de l'énergie[41], la promotion et la diffusion de nouveaux procédés ou de nouveaux matériaux dans le secteur des transports. Ces améliorations technologiques vont ainsi expliquer environ la moitié de la baisse de l'intensité énergétique des activités

[41] Normes pour de nouvelles conceptions architecturales favorisant l'isolation thermique des bâtiments, normes d'efficacité pour les rendements des équipements producteurs de chaleur.

économiques des pays de l'OCDE entre 1973 et 1990[42], l'autre moitié étant attribuée aux changements structurels et aux effets des substitutions inter-énergétiques (MARTIN [1996]). Les améliorations de l'efficacité énergétique vont être la principale raison de la baisse et de la stabilisation de la demande de pétrole dans les pays de l'OCDE[43].

1.3.2.3.2. Les nouvelles technologies de production d'électricité

Le second type de changements technologiques notables concerne les équipements de transformation des énergies fossiles en électricité. Parmi eux, deux technologies ont acquis une place remarquable dans les systèmes de production électrique. La première concerne les différents procédés de combustion du charbon en lits fluidisés[44]. Ces technologies utilisées depuis le début des années 1980, en augmentant l'efficacité de la combustion du charbon et en éliminant les émissions de dioxyde de souffre ont accru l'utilisation du charbon au détriment de celle du pétrole. Les technologies des turbines à gaz ont eu un impact encore supérieur aux lits fluidisés dans l'industrie électrique. Son apparition discrète dans l'entre-deux guerres a été suivie d'une série de progressions technologiques rapides, soutenues en partie par les résultats des programmes de R&D militaires. Utilisée initialement pour couvrir la production d'électricité au cours des périodes de pointe, les technologies ont ensuite été diversifiées (de quelques centaines de kW, à quelques centaines de MW) pour couvrir des gammes d'utilisations plus larges, notamment en semi-base et base, à travers la disponibilité de différentes options technologiques (turbines en cycles simples, cogénération, cycles combinés).

Mais la diffusion de ces deux technologies est indissociable des changements intervenus dans l'organisation des industries électriques. Le vote en 1978 aux Etats-Unis du *Public Utility Regulating Policies Act* (PURPA) est destiné à éloigner la

---

[42] Voir en ANNEXE 2 le tableau retraçant l'évolution de l'intensité énergétique dans les pays de l'OCDE entre 1973 et 1998.

[43] Voir en Annexe 3 le graphique de l'évolution de la demande mondiale de pétrole dans les pays de l'OCDE entre 1971 et 1999.

[44] Le principe technologique des lits fluidisés consiste à brûler des particules de charbon dans un lit constitué en grande partie de matériaux inertes (sables ou cendres), et maintenus en suspension dans un flux d'air ascendant (BONAÏTI [2000]).

menace des insuffisances de capacités de production dans certaines régions, du fait du refus des *utilities* d'investir dans la création de nouvelles centrales. Le *PURPA* encourage ainsi l'entrée de nouveaux producteurs, l'augmentation des capacités et casse ainsi la structure traditionnelle de l'industrie électrique américaine faite de monopoles régulés intégrés verticalement. De par leurs caractéristiques technico-économiques, par la diminution des risques en capital associés et par leur compatibilité aux changements de réglementations électrique et environnementale, les turbines à gaz sont devenues, en une vingtaine d'années, les technologies majoritairement choisies pour les nouvelles capacités de production. Leur diffusion sera similairement favorisée à partir du début des années 1990 au cours de la libéralisation et la privatisation de l'industrie électrique britannique (*Electricty Act* de 1989). Ces exemples traduisent bien l'apparition de nouvelles cohérences entre de nouvelles technologies de l'énergie et des nouvelles organisations industrielles.

1.3.2.3.3. Le recentrage technologique des compagnies pétrolières sur les activités « amont »

La crise pétrolière et l'effet d'inertie d'une vision pessimiste du futur énergétique qu'elle a entraîné dans le monde industriel, a occulté en partie les premières indications d'une progression qui allait aboutir à une transformation profonde des technologies d'exploration/production pétrolières et plus généralement à une réorganisation de cette industrie. Le changement intervient réellement lorsque les grandes multinationales pétrolières sont contraintes de céder la partie la plus productive de leur patrimoine minier. La dé-intégration verticale provoque alors un sursaut vital qui prend la forme d'un abandon des recherches de diversification et d'un recentrage sur les métiers amont de l'industrie pétrolière. Le maintien de niveaux élevés des cours du pétrole brut[45] après les deux chocs a permis aux firmes pétrolières de conserver un certain niveau de rentabilité et de gonfler leurs budgets de R&D en vue de reconstituer leurs patrimoines miniers. Entre 1973 et 1983 les dépenses de R&D des quatorze compagnies les plus importantes ont doublé (en dollars constants), alors que celles de

[45] Voir en ANNEXE 1 le graphique retraçant l'évolution du prix du pétrole.

Shell, Exxon et BP ont été multipliées par un et demi à trois[46]. Cette tendance a perduré malgré la baisse des prix du brut après 1982, la forte chute de 1986, et le durcissement de la concurrence entre les producteurs. L'objectif principal des firmes était de diminuer les coûts d'exploration et de production afin de les rendre compatibles avec les (nouveaux) prix bas du marché. Il fut atteint grâce aux résultats progressifs des activités de R&D qui ont permis des avancées technologiques sans précédent dans (MARTIN [1998]):

- l'exploration sismique en trois dimensions, ce qui porte les chances de succès d'exploration de 15-20% en 2D à 65-75% en 3D ;
- l'utilisation du forage horizontal ou dévié, permettant de diminuer le nombre de plates-formes et de perforations ;
- le perfectionnement des outils de forage faisant appel à des diamètres réduits, des tiges plus résistantes équipées de moteurs de fonds ;
- l'augmentation des taux de récupération (au-delà de 30% en moyenne) ;
- l'allégement des plates-formes marines et le développement de collecteurs flexibles.

Cette transformation des technologies de l'amont pétrolier grâce aux résultats probants obtenus en *offshore* et dans les zones d'accès difficiles a permis un renouvellement de réserves abondantes et a joué vers une réintégration verticale de l'industrie, forme historique de sa réussite. Il est à noter aussi que la mise au point et le perfectionnement de ces technologies de l'amont pétrolier a bénéficié d'une implication de plus en plus forte des sociétés de services para-pétroliers, des fournisseurs d'équipements et des différentes firmes d'ingénierie[47]. Mais si l'ensemble de ces firmes se concurrencent effectivement sur le terrain même de la diffusion des technologies et non directement sur la production de pétrole, elles ont cependant entraîné une redéfinition des rôles. L'industrie pétrolière, dont l'axe central d'organisation est finalement resté le même, a beaucoup changé. Elle a partagé les responsabilités avec les sociétés de services sous-traitantes qui se sont muées en véritables partenaires, soumis à

[46] A un niveau plus général et à titre de comparaison, les dépenses de R&D entre 1970 et 1984 ont doublé aux Etats-Unis et ont augmenté de 70% en France (MARTIN [1996]).

[47] BOURGEOIS [1994] relève que sur une liste de 248 brevets de l'*US Patents Office* de la catégorie « puits de pétrole », couvrant la période 1983-1990, 48% proviennent des compagnies pétrolières, 43% des sociétés de services para-pétrolières et 9% d'autres firmes.

des obligations de résultat. Cette nouvelle configuration semble avoir renforcé un peu plus le processus de mutation technologique.

* * *

Notre analyse du système énergétique à travers ses évolutions de longue période et ses enjeux technologiques nous a amené à rappeler dans un premier temps sa définition afin de mettre en relief les manifestations du changement technique qui lui sont associées (variété et efficacité). Nous avons relevé ensuite les caractéristiques de l'intensité énergétique ce qui nous a permis de situer le rôle des technologies de production et d'utilisation de l'énergie dans son évolution. Dans la succession des régimes énergétiques, l'évocation du dernier retournement entre le charbon et le pétrole, nous permet maintenant de caractériser le *« carbon lock-in »* (UNRUH [2000]) des systèmes énergétiques prévalant désormais dans les pays industrialisés. Mais ce « verrouillage » des sources d'énergie fossiles non renouvelables[48], principales responsables des émissions de gaz à effet de serre, s'exerce à un niveau beaucoup plus large que le système énergétique lui-même. Il s'impose au niveau du *« complexe techno-institutionnel »*, c'est-à-dire au niveau du cadre général constitué par les interrelations entre les technologies, les organisations et les institutions publiques et privées (UNRUH [2000]). Pourtant sous l'effet du changement technologique continu dans la production et l'utilisation de l'énergie, GRUBLER et NAKICENOVIC [1996] ont mis en évidence une tendance de long terme à la «décarbonisation» des systèmes énergétiques. Si leurs calculs de longue période montrent une baisse moyenne de l'intensité du carbone dans les systèmes énergétiques de 0,3% par an (voir en ANNEXE 4), ils affirment que les énergies fossiles, compte tenu de ce mouvement graduel et lent, devraient prévaloir jusqu'à la fin du XXIIième siècle.

L'émergence de la contrainte environnementale, puis les risques de rupture des approvisionnements pétroliers ont amorcé un début de diversification des technologies de l'énergie. Mais l'utilisation des technologies génériques et la place grandissante des *inputs* intangibles (services, savoirs, informations, apprentissages) vont finalement conduire à améliorer l'efficacité énergétique et à relancer l'exploitation de nouvelles

[48] Voir le Tableau 1, p. 25.

ressources pétrolières jusque là ignorées. En conséquence, le potentiel de l'industrie pétrolière se trouve régénéré pour plusieurs décennies, même si depuis un changement est intervenu dans la perception de la notion de limite absolue des ressources épuisables. En effet, selon FORAY et GRUBLER [1996] cette nouvelle perception est que la définition des ressources naturelles ne peut pas être réduite à de « simples » problèmes géologiques. Pour ces auteurs, leur abondance est *« technologiquement, économiquement et socialement construite, et n'apparaît plus simplement comme géologiquement prédéterminée »* (ibid., p. 163). Cependant, d'un autre point de vue, le niveau actuel des réserves de combustibles fossiles est tel que, une fois consommé, il sera susceptible de causer des dommages environnementaux sans précédent. Formulé autrement et dans une perspective environnementale, le problème apparaît être désormais la surabondance des énergies fossiles plutôt que leur rareté. Ainsi, selon nous, si cette abondance doit être *« technologiquement, économiquement et socialement construite »*, elle doit être également écologiquement gérée.

Section 2. Mesure et définitions des innovations énergétiques et environnementales

Les innovations représentent le résultat d'un effort de recherche engagé par une firme, un groupe de firmes et/ou des organismes de recherche publics. Dans l'étude d'un domaine industriel particulier, comme celui de l'énergie, se pose la question de la mesure des innovations technologiques, puis celle de leur définition et de leur identification.

2.1. La mesure des innovations énergétiques

L'application d'une méthodologie « idéale » devrait débuter par la construction d'un ensemble cohérent d'indicateurs[49] utiles pour appréhender et mesurer l'activité innovatrice des firmes, mais intégrant aussi le renouvellement des connaissances, des compétences et des artefacts intervenant dans un processus de transformation (physique, spatial ou temporel) d'un flux d'énergie ou de matière. Faute de disposer d'une telle approche, la mesure des innovations passe inévitablement par des *proxys* qui ne donnent qu'une vision très imparfaite des innovations. On distingue traditionnellement deux types d'indicateurs associés soit aux *inputs*, soit aux *outputs.*

2.1.1. Les dépenses de R&D dans le secteur énergétique

Le premier *proxy* des innovations, repose sur l'hypothèse d'une liaison étroite entre ces dernières et leur principale source, les dépenses de R&D. Ces *inputs* se réfèrent aux attributs des activités de R&D. MANSFIELD [1984] a soulevé la question du contenu des dépenses de R&D. Les effets et les déterminants de ces recherches varient selon qu'il s'agit de la recherche fondamentale ou de la recherche appliquée, des projets

[49] RICHARD [1998] considère les listes d'innovations construites à partir de journaux spécialisés ou de questionnaires envoyés aux entreprises *« comme une nouvelle mesure directe de l'innovation »*, alors que les brevets d'invention ne sont qu'un output intermédiaire de la R&D. Il cite comme exemple les travaux empiriques réalisés à partir de la liste de l'US Small Business Administration (EDWARDS et GORDON [1987]) et celle de l'Université du Sussex (TOWSEND *et al.* [1981], ROBSON et TOWSEND [1984]).

à court ou à long terme, ou encore de la recherche destinée à des innovations de produits ou de procédés[50], etc.…

Habituellement, les efforts de R&D sont évalués en termes de dépenses de R&D ou en fonction des effectifs employés dans ces activités[51]. Si les deux mesures peuvent refléter les flux de ressources consacrés au développement de l'innovation, elles demeurent néanmoins imparfaites pour évaluer l'effort d'innovation des entreprises ou des organismes de recherche publics. En effet, d'une part les dépenses de R&D engagées risquent de ne pas aboutir à des innovations technologiques, celles-ci découlant parfois des efforts réalisés en dehors des unités formelles de recherche, d'autre part, certaines firmes de petite taille n'ont pas d'activité formelle de recherche, et les innovations qu'elles réalisent échappent aux mesures en termes de R&D. A ces limites, il convient d'ajouter celles concernant le financement privé de la recherche, mal connu et peu diffusé en ce qui concerne les comparaisons chiffrées au plan international.

Pour le secteur de l'énergie, il ressort de certains travaux historiques sur la création de laboratoires et sur l'évolution du personnel scientifique aux Etats-Unis, qu'avant la seconde guerre mondiale les industries du pétrole et de la construction électrique arrivaient immédiatement après la chimie, loin devant le secteur des transports et des machines non électriques, dans l'ordre des industries intensives en recherche (MOWERY et ROSENBERG [1989]). La corrélation entre les dépenses de R&D et le rythme des innovations pour ces deux industries paraît donc être bonne. Cependant compte tenu des limites évoquées plus haut et de la disponibilité des données, nous circonscrivons notre analyse principalement à l'évolution des crédits publics affectés à la R&D de l'énergie, même s'ils correspondent imparfaitement à la diversité des activités innovatrices dans l'énergie.

Après la deuxième guerre mondiale, les raisons militaires et de compétition internationale poussent les gouvernements à prendre une part de plus en plus active dans

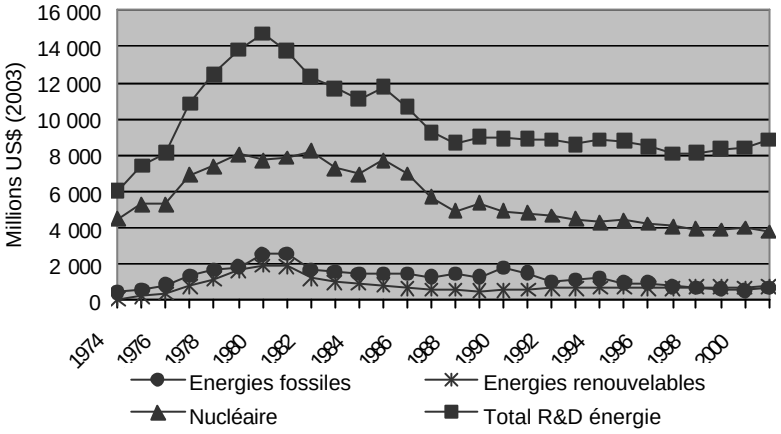
[50] Voir *supra*.

[51] L'évaluation des moyens financiers et humains consacrés par les agents économiques aux activités de R&D s'appuie sur des principes méthodologiques mis au point au sein des organisations internationales, comme l'OCDE dans le Manuel de Frascati (OCDE [1997]), pour faciliter les comparaisons des informations ente les pays.

le financement de la R&D énergétique. A titre d'exemple, de 1950 à 1970 les Etats-Unis affectent en moyenne par an 3,5 milliards de dollars (US $ 1972), dont 10% sont destinés au nucléaire civil (MARTIN [1999]). Après le premier choc pétrolier le financement public de la R&D consacré à des projets de rupture des technologies de l'énergie sera perçu comme la meilleure façon de répondre aux externalités liées au pouvoir de marché de l'OPEP en recherchant des substituts au pétrole. Dans les pays de l'OCDE les crédits publics affectés à la R&D de l'énergie augmentent très fortement passant de 6 à 14,7 milliards de dollars (US $ 2001) (Figure 3).

Figure 3. Evolution des dépenses de R&D consacrées à l'énergie dans les pays de l'OCDE (1974-2001)

Source : R&D online database, www.iea.org



Avec 75% du total de la R&D au début de la période, et une stabilisation à environ 43% en fin de période, l'énergie nucléaire est toujours la principale bénéficiaire, suivie de loin des énergies renouvelables (8,5%) et de l'ensemble des énergies fossiles (8%). L'ampleur des financements affectés au nucléaire a permis la constitution d'une technologie et d'une source d'énergie entièrement nouvelle. Ils ne rendent pas compte toutefois de l'apprentissage accumulé par les constructeurs et les propriétaires de centrales nucléaires dont le rôle dans l'élévation des performances des réacteurs et du cycle du combustible a été déterminant. Par ailleurs, comme nous l'avons déjà souligné, la répartition des crédits publics de R&D traduit mal la diversité des activités d'innovation, le financement privé de la recherche étant difficilement évaluable. Selon MARTIN [1999] au début des années 1970 ce dernier est globalement équivalent au financement public, mais il dépasse de 95% les dépenses publiques pour le secteur pétrolier. Tirant partie de prix très avantageux, l'industrie pétrolière a accru

fortement ses dépenses jusqu'à 1985, avant de les réduire significativement durant la décennie 1990. Aux Etats-Unis, elle n'atteint plus aujourd'hui que 3% de la R&D industrielle, au point que l'intensité en recherche de firmes comme Exxon-Mobil, Shell ou BP est l'une des plus faibles de toutes les multinationales. Or, comme nous l'avons mentionné dans la Section 1, les innovations dans l'exploration-production pétrolière ont connu un rythme de progression sans précédent. Nous avons déjà expliqué ce paradoxe en relevant le rôle moteur qu'occupent les entreprises de services et les équipementiers dans les innovations pétrolières. L'activité innovatrice des compagnies pétrolières se caractérise donc en majeure partie par l'assemblage d'innovations modulaires et architecturales[52].

2.1.2. Le nombre de brevets

Les brevets, en tant qu'indicateurs relatifs à l'*output* de l'activité d'innovation, constituent les principaux outils utilisés pour apprécier l'effort d'innovation d'une firme ou d'une industrie. Ils s'appliquent à des inventions en leur conférant une protection légale contre l'imitation. L'utilisation du brevet comme mesure de l'activité d'innovation bénéficie de certains avantages, mais présente aussi certains inconvénients. Les brevets soulèvent certains problèmes dont le plus notable concerne l'hétérogénéité de leur valeur économique (COHEN et LEVIN [1989]). Seulement quelques innovations sont brevetées et une faible partie des inventions deviennent des innovations. Les données des brevets contiennent alors quelques innovations, mais elles contiennent également des inventions sans valeur commerciale (BARSBERG [1987]).

Bien qu'étant souvent disponibles sur de longues périodes, les brevets recouvrent quasiment l'ensemble des domaines technologiques et un champ géographique théoriquement universel. La classification détaillée et codifiée figurant dans un « document-brevet » permet des ventilations selon plusieurs critères : par inventeur, par pays, par société ou groupe de sociétés, par domaine technologique ou secteur d'activité, etc… Cependant les brevets correspondent à des domaines technologiques dont il est souvent difficile d'établir la correspondance avec des activités économiques.

[52] Voir *supra*.

Pour ce qui est du secteur de l'énergie, les technologies assurant la production des matières premières énergétiques et leur conversion en services énergétiques sont rarement identifiées comme telles dans les nomenclatures des brevets industriels. Elles sont dispersées, par exemple, entre l'industrie du pétrole, elle-même en partie intégrée dans la chimie ; les équipements électriques et non électriques ; le transport ; les mines, ce qui ne facilite pas la construction et la comparaison des données. MARTIN [1999, 2000] a tenté d'appréhender les innovations de l'énergie à travers la prise de brevets (voir le Tableau 2, p.41). Reflètent-elles mieux la réalité industrielle que les dépenses de R&D pour expliquer les innovations de l'énergie ?

De prime abord il ressort du Tableau 2 une augmentation des prises de brevets aux Etats-Unis (15%) et surtout en Europe (87%) au cours des périodes considérées, alors que les dépenses de R&D que nous avons retracées indiquaient une forte baisse des activités d'innovation.

Le deuxième enseignement est que les brevets les plus nombreux sont ceux relatifs aux utilisations de l'énergie (50%), à la production des sources d'énergies primaires (20%) et à la conversion en sources secondaires, essentiellement électriques (30%). Dans chacune de ces catégories les technologies les plus nombreuses sont les mêmes aux Etats-Unis et en Europe. Elles ont trait à l'exploration des hydrocarbures (surtout le forage), aux alternateurs et aux piles à combustibles. Les brevets de l'éclairage dominent la catégorie des conversions en sources secondaires, devant le chauffage électrique, la réfrigération et les pompes à chaleur.

Finalement, peu de technologies affichent un recul des prises de brevets : les gaz de synthèse et le chauffage de l'eau (y compris le chauffage solaire) en Europe et aux Etats-Unis ; l'électricité éolienne, l'extraction des combustibles solides, le transport par *pipe line*, le craquage des huiles, etc, uniquement aux Etats-Unis. A la seule exception notable du solaire photovoltaïque, la croissance du nombre de brevets est toujours plus élevée en Europe qu'aux Etats-Unis ce qui pourrait être le signe d'une propension à innover plus forte dans le domaine de l'énergie dans la première zone. Cependant, les écarts entre les différentes technologies de l'énergie sont considérables : par exemple, l'industrie nucléaire est peu couverte par des brevets, la protection s'effectuant majoritairement par le secret industriel, alors que l'industrie de l'éclairage brevette

beaucoup plus, compte tenu de l'intensité de la concurrence de ce secteur. Toutefois les limites[53] de l'utilisation des brevets en tant qu'indicateurs des innovations imposent la modération et des conclusions non définitives quant à ces commentaires.

[53] Un brevet ne correspond pas automatiquement à une capacité innovative, de plus les propensions à innover diffèrent selon les types d'industries et les pays (Cf. Chapitre 1).

Tableau 2. Brevets relatifs aux technologies de l'énergie

Sources : MARTIN [1999, 2000] à partir des données de l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle

	Etats-Unis				Europe et international			
	Nbre moyen 1975-77	Nbre moyen 1990-92	Répartition (%) 1990-92	Variation (%) sur la période	Nbre moyen 1980-82	Nbre moyen 1993-95	Répartition (%) 1993-95	Variation (%) sur la période
1. Production, transport des sources primaires								
Extrac., combu. Solides	295	135	1,2	-54	77	93	1,3	21
Forage hydrocarbures	716	945	8,6	32	166	435	6,0	162
Transport pipelines	32	24	0,2	-25	17	22	0,3	29
Electricité hydraulique	146	162	1,5	11	65	76	1,0	17
Electricité nucléaire	276	322	2,9	17	132	170	2,3	29
Electricité éolienne	56	26	0,2	-54	31	33	0,5	6
Electricité photovoltaïque	105	318	2,9	203	94	167	2,3	78
2. Conversion en sources secondaires								
Craquage huiles	479	364	3,3	-24	154	200	2,8	30
Traitement gaz naturel	161	139	1,3	-14	90	136	1,9	51
Gaz de synthèse	212	97	0,9	-54	100	78	1,1	-22
Stockage gaz	43	51	0,5	19	39	72	1,0	85
Turbines à vapeur	162	247	2,3	52	63	136	1,9	116
Turbines à gaz	180	206	1,9	14	42	81	1,1	93
Alternateurs	418	568	5,2	36	180	430	5,9	139
Transformateurs	166	298	2,7	80	101	243	3,4	141
Piles à combustible	401	529	4,8	32	189	484	6,7	156
Transport électricité	152	186	1,7	22	106	256	3,5	142
Distribution électricité	73	85	0,8	16	38	101	1,4	166
Protection sécurité	215	282	2,6	31	82	168	2,3	105
Commande, régulation	248	313	2,9	26	137	202	2,8	47
3. Utilisations finales de l'énergie								
Chaudières et brûleurs	121	148	1,4	22	103	167	2,3	62
Echangeurs de chaleur	347	332	3,0	-4	179	289	4,0	61
Fours	267	219	2,0	-18	136	163	2,3	20
Séchage	222	253	2,3	14	73	114	1,6	56
Réfrig., pompes à chaleur	450	759	6,9	69	157	381	5,3	143
Motorisation industrielle	421	304	2,8	-28	126	163	2,3	29
Chauffage électrique	643	764	7,0	19	205	462	6,4	125
Chauffage non élec.	217	150	1,4	-31	171	229	3,2	34
Climatisation	103	140	1,3	36	69	195	2,7	183
Chauffe eau et solaire	489	128	1,2	-74	168	152	2,1	-10
Eclairage	1 046	1 859	17,0	78	364	940	13,0	158
Moteurs combus. interne	577	417	3,8	-28	174	269	3,7	55
Réacteurs avions	74	95	0,9	28	18	50	0,7	178
Véhicules électriques	44	88	0,8	100	30	83	1,1	177
Total	**9 557**	**10 953**	**100**	**15**	**3 876**	**7 240**	**100**	**87**

Note : La comparaison des données de l'*US patent and trademark office* (USPTO) et de l'Office européen des brevets (OEB) n'est pas facilitée par les différences de pratique des deux organismes (publication après le premier dépôt ou après l'octroi du brevet). L'auteur a établi des correspondances entre la nomenclature de l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) et les rubriques du tableau. Les périodes choisies éliminent les années non significatives aux Etats-Unis et en Europe.

2.2. Nature et modalités des innovations technologiques de l'énergie

Tous les changements technologiques que nous avons évoqués jusque là peuvent être de nature très différente selon qu'ils prennent la forme de la mise en œuvre d'un nouveau principe scientifique encore mal connu ou d'améliorations d'une technologie ancienne et bien maîtrisée. Dans le but d'avancer quelques exemples quant à l'énergie, nous souhaitons ici examiner les types «classiques » d'innovations que s'accordent à reconnaître les économistes[54] s'intéressant au changement technique.

SCHUMPETER est aujourd'hui largement reconnu, à travers sa théorie des cycles économiques, comme l'économiste qui a initié le premier, après les Classiques, l'étude des phénomènes du changement technologique dans la théorie économique des innovations et en économie industrielle. Depuis la formulation de son triptyque *invention – innovation – diffusion* (SCHUMPETER [1935]), les différents termes afférents au changement technologique ont suscité une littérature foisonnante. Celle-ci, tout comme SCHUMPETER lui-même, s'est d'abord essentiellement focalisée sur la distinction entre *invention* et *innovation*, c'est pourquoi nous apportons d'abord quelques éclaircissements sur ce point.

2.2.1. La dimension technique de l'invention

L'*invention* naît dans un contexte exclusivement technique[55]. Elle est considérée comme exogène à l'espace économique, c'est-à-dire qu'elle peut déboucher ou non sur des applications nouvelles, sans préjuger de leur sanction économique. PERRIN [2001, p. 17] la définie comme *« un nouveau principe technique, un nouveau moyen technique mettant en œuvre une fonction donnée »*. L'invention apporte une réponse permettant de dénouer un problème grâce à la construction d'un objet matériel (ou immatériel[56]), un « artefact ». En s'appuyant sur des connaissances scientifiques et techniques disponibles à un moment donné, elle introduit l'idée d'une rupture dans les pratiques techniques

[54] Nous ne rentrons pas volontairement ici dans les détails et les raffinements conceptuels des différents courants économiques (néo-classiques, évolutionnistes…).

[55] Pour cela le concept d'invention a joué un rôle important essentiellement dans la littérature technique, sociologique et historique.

[56] Comme par exemple un logiciel, une organisation ou un service.

existantes. L'invention n'apparaît donc pas comme un concept facile à manier pour l'économiste, c'est pourquoi HERAUD [1995, p.100] conseille d'abandonner le projet de trouver une définition analytique *« économiquement signifiante »* de l'invention et de se limiter à une définition *« institutionnelle »* : l'invention représente alors *« des idées techniques nouvelles brevetables »*.

2.2.2. Les différentes catégories d'innovations

Les définitions de l'innovation sont très variées. C'est un concept plus large que l'invention, qui dépasse les considérations purement techniques pour se situer plus directement dans un contexte économique, commercial ou même financier. Comme le rappellent BARLET *et al.* [1998], c'est bien l'existence d'un risque de marché important que vont assumer les innovateurs potentiels dans leurs décisions d'investissement dans les activités de recherche, qui différencie l'innovation de l'invention.

2.2.2.1. Les définitions « conventionnelles » des innovations

L'innovation représente l'introduction de nouveaux produits ou de nouveaux procédés sur les marchés, et à ce titre elle est souvent associée (et même confondue) à la notion de diffusion. Il existe plusieurs taxinomies des innovations. Nombre d'entre elles s'appuient souvent sur celle de SCHUMPETER [1935, p.95] qui avait différencié cinq classes d'innovations :

- *« La fabrication d'un bien nouveau, c'est-à-dire encore non familier au cercle des consommateurs, ou d'une qualité nouvelle d'un bien.*
- *L'introduction d'une méthode de production nouvelle (…) ; 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.*
- *L'ouverture d'un débouché nouveau (…).*
- *La conquête d'une source nouvelle de matières premières ou de produits semi-ouvrés (…).*
- *La 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 répertorie en fait avec ces différentes catégories les formes de « ruptures » initiées par les innovations[57]. Bien que toujours intéressantes, ces classes d'innovations, impliquent une dimension d'analyse très large. C'est pourquoi par souci de clarification des innovations de l'énergie, nous préférons évoquer la dissociation habituelle des types d'innovation selon une dominante technologique avec les innovations de produits et les innovations de procédés. Nous retenons alors classiquement les définitions proposées par le *Manuel d'Oslo* (OCDE [1997, p.9]) : *« On entend par innovation technologique de produit la mise au point/commercialisation d'un produit plus performant dans le but de fournir au consommateur des services objectivement nouveaux ou améliorés. Par innovation technologique de procédé, on entend la mise au point/adoption de méthodes de production ou de distribution nouvelles ou notablement améliorées ».*

Pour chaque type de produit, l'innovation de produit et de procédé est supposée accroître la marge de rentabilité réalisée sur la production vendue aux acheteurs actuels et futurs. L'innovation de procédé abaisse le coût moyen de production de la firme, alors que l'innovation de produit augmente le prix de vente en ajoutant ou en améliorant les fonctions technologiques incorporées dans un produit (GUILHON [1993]).

A la différence de certains secteurs tels que celui de l'électronique marqué par un afflux continuel de nouveaux produits[58], celui de l'énergie ne se caractérise pas par une variété importante de produits disponibles pour le consommateur final. En effet, ce n'est pas par des innovations de produits finals, mais par des innovations de procédés, c'est-à-dire des nouveaux processus de transformation, que s'est manifesté le changement des technologies de l'énergie au cours des dernières décennies. Pour couvrir l'ensemble des activités énergétiques, ces processus peuvent être divisés pour distinguer les transformations *temporelles* accomplies par les technologies de stockage

[57] Ces ruptures seront ensuite identifiées dans *Capitalisme, Socialisme et Démocratie* (SCHUMPETER [1942]) par rapport à la notion de *« destruction créatrice »*.

[58] MANSFIELD [1986] relève que la répartition entre les innovations de produits et les innovations de procédés était différente d'un pays à l'autre. Ainsi, les firmes américaines négligent les innovations de procédés alors que les firmes japonaises consacrent environ les trois quarts de leurs dépenses de R&D à ce type d'innovations. En revanche, les firmes américaines sont plus attachées à promouvoir l'émergence de nouveaux produits.

(par exemple les batteries ou le stockage du gaz), les transformations *spatiales* (les technologies de transport et de distribution de l'électricité et du gaz) et les transformations *physiques* (technologies d'extraction du charbon ou du gaz, de production d'électricité) (METCALFE et REEVE [1991]).

GAFFARD [1990] rappelle qu'une innovation de produit au niveau de la firme peut constituer une innovation de processus au niveau du secteur, de même qu'une innovation de processus pour la firme peut être une innovation de produit à l'échelle du secteur. Par exemple, dans le domaine de l'énergie l'utilisation de l'informatique a permis une multitude d'innovations de procédés tant dans l'exploration pétrolière, que dans les systèmes de gestion des centrales électriques ou dans les mécanismes de régulation et d'orientation des éoliennes.

A côté de la distinction produits/procédés, on trouve également dans la littérature économique celle, plus analytique, entre les innovations *radicales* (ou *majeures*) et les innovations *incrémentales* (ou *mineures*)[59].

Les innovations majeures concernent la conception de produits *véritablement* nouveaux. BOYER et DIDIER [1998, p.14] indiquent qu'il y a innovation majeure *« (…) dans le cas d'un produit dont l'utilisation prévue, les caractéristiques de performance, les attributs, les propriétés de conception ou l'utilisation de matériaux et de composants présentent des différences significatives par rapport aux produits antérieurs* ». Ainsi soit ces innovations font intervenir des technologies *radicalement* nouvelles, soit elles reposent sur des associations de technologies existantes en vue d'applications totalement nouvelles. Dans ce dernier cas, le plus fréquent, l'innovation radicale est le résultat de la réunion de plusieurs innovations intégrées de manière indépendante dans un produit (ABERNATHY et UTTERBACK [1978]).

[59] La distinction entre les innovations incrémentales et les innovations radicales est déjà présente dans les écrits de SCHUMPETER, notamment lorsqu'il explicite le processus de destruction créatrice : *« (…) we observe that major innovation and also minor ones entail construction of new plant (and equipment) – or the rebuilding of old plant (…) »* (SCHUMPETER [1939, p.93]), ou bien quand il précise *« Une machine d'un type nouveau ne constitue, en règle générale, qu'un chaînon d'une série de perfectionnements (…) »* (SCHUMPETER [1942, p.141]).

Les innovations mineures portent quant à elles sur l'amélioration des performances de produits existants. BOYER et DIDIER [1998] différencient deux formes principales d'innovations incrémentales : (i) l'amélioration des performances ou l'abaissement du coût de production d'un *« produit simple »* grâce à l'utilisation de composants ou de matériaux plus performants, et (ii) l'amélioration d'un *« produit complexe »* composé de plusieurs sous-systèmes techniques intégrés, à travers des modifications partielles apportées à l'un de ces sous-systèmes[60]. En s'appuyant sur cette distinction on utilise également les termes d'innovation *modulaire* si celle-ci concerne les composants du produit et les conceptions technologiques qu'ils incorporent, et d'innovation *architecturale* si l'incorporation de nouvelles fonctions technologiques s'effectue sur les technologies de relation entre des composants d'un produit (GUILHON [1993]).

Sur un autre plan, ROSENBLOOM et CHRISTENSEN [1998, p.219] proposent d'autres définitions des innovations incrémentales et radicales articulées autour de la notion de *discontinuité* : *« Une innovation est radicale quand elle introduit une discontinuité dans la manière dont la performance est évaluée. Les innovations radicales perturbent l'avance technologique des trajectoires établies, contrairement aux innovations incrémentales qui les renforcent et les élargissent. »*

Si on reprend comme repère les activités de transformations énergétiques, une innovation est radicale toutes les fois où elle engendre un nouveau processus de transformation au sens d'accès à une nouvelle source d'énergie, de conversion en un nouveau vecteur, de création d'une nouvelle possibilité de transport ou de stockage. Une innovation radicale ouvre un nouveau champ technologique à partir duquel pourront avoir lieu des innovations incrémentales. Dans la même logique le qualificatif d'incrémental désigne alors toute amélioration de nature graduelle des performances d'un procédé de transformation dont ne changent ni les *inputs* ni les *outputs.*

La plupart des innovations énergétiques radicales ont pris forme, au moins dans la phase de recherche fondamentale, dans les années 1950 et 1960 : l'énergie nucléaire,

[60] PERRIN [2001] exprime une idée proche en employant le terme de *« re-conception »* d'un artefact par des modifications ou des améliorations des performances de l'un de ses composants ou de ses sous-ensembles.

le solaire thermique et photovoltaïque, les usines marémotrices, l'accès aux pétroles non conventionnels, la gazéification de la houille, la pile à combustible… Après les incertitudes qui ont suivi le premier choc pétrolier et dans les années 1980, le rythme des innovations est resté toujours soutenu mais s'est orienté différemment par des progressions incrémentales dans les rendements soutenues par les progrès de l'informatique, de l'électronique, de la mécanique des fluides, des matériaux…

2.2.2.2. Les définitions des innovations environnementales

Dans le cadre de la problématique intégrant un souci de développement durable, les définitions classiques des innovations énoncées précédemment, et illustrées à travers quelques innovations de l'énergie, s'avèrent incomplètes pour définir plus précisément des technologies de l'énergie, comme celles des énergies renouvelables, qui se veulent être aussi des technologies environnementales.

Un des problèmes posé par la définition des innovations environnementales est que la dimension environnementale elle-même peut se référer soit à l'objectif poursuivi par les innovateurs, soit aux résultats environnementaux de l'innovation[61]. Ainsi, pour certains auteurs, il serait nécessaire de faire porter le caractère environnemental sur le résultat, plutôt que sur l'objectif de l'innovation (WILLIAMS et MARKUSSON [2002], KEMP [2002]). De ce fait, les innovations environnementales ne constitueraient pas une classe distincte d'innovations, et il faudrait évoquer « des innovations pour l'environnement », plutôt que « des innovations environnementales », puisque n'importe quelle innovation, selon le contexte socio-technique dans lequel elle s'insère, peut procurer des bénéfices environnementaux.

Pour notre part, nous reprenons la définition large par rapport à l'objectif des éco-innovations que propose RENNINGS [2000][62] en considérant qu'elles englobent toutes les mesures adoptées par différents acteurs (décideurs politiques, organisations non gouvernementales, firmes, ménages) visant à développer de nouvelles idées,

[61] Dans certains cas, comme pour les technologies de contrôle d'émissions, la dimension environnementale recouvre à la fois l'objectif et le résultat de l'innovation.

[62] Voir également RENNINGS *et al.* [2003].

comportements, produits ou procédés qui contribuent à réduire les atteintes environnementales. Parmi les éco-innovations, on peut différencier ensuite plus précisément les innovations technologiques (i), organisationnelles (ii), sociales (iii) et institutionnelles (iv).

(i) *Les innovations technologiques environnementales* désignent des technologies qui ont pour but d'apporter des solutions à des problèmes environnementaux. Cependant, il est nécessaire de souligner que les technologies environnementales peuvent comprendre des techniques qui ne sont pas spécifiques au domaine de l'environnement. Ainsi, les technologies des éoliennes, qui sont des technologies environnementales, reposent, en partie, sur des techniques électromécaniques et aérodynamiques qui ne leur sont pas spécifiques. Les technologies environnementales ne sont donc pas définies par rapport aux objets ou procédés techniques, mais par rapport au but qu'elles poursuivent (OCDE [2001a]).

Nous distinguons d'abord les technologies additives (*« add-on technology »*) qui sont ajoutées aux procédés ou aux produits existants, de manière à réduire les dommages environnementaux liés à la production ou à la consommation. Le concept de technologie additive est plus large que celui de technologies «de bout de chaîne » (*« end-of-pipe technologies »*) fréquemment évoqué dans la littérature. En effet, il englobe également des technologies de mesure et de contrôle, de prévention des risques, de réduction des déperditions énergétiques. Les technologies additives ne requièrent pas toujours un effort significatif de R&D. Elles peuvent aussi provenir de combinaisons « astucieuses » de techniques existantes.

Par contre dans le cas des technologies dites intégrées, les caractéristiques environnementales sont incorporées dans la conception même du procédé ou du produit. Les technologies propres sont des technologies intégrées, mais elles ne sont pas les seules. Appartiennent également à cette catégorie les systèmes dont l'efficience augmente en permettant de réduire les *inputs* en énergie et en matières premières, les procédés qui comportent un recyclage «interne » de leurs effluents ou de leurs sous-produits, les procédures de substitution de substances nocives dans les produits ou dans les procédés, la conception de produits réutilisables, recyclables ou démontables, l'amélioration de la «qualité totale » conduisant à une durée de vie plus longue et une réparation plus facile des produits, etc… Le développement de technologies intégrées nécessite au préalable un effort substantiel de R&D ; elles recourent également à de

nouvelles méthodes de conception, comme l'analyse du cycle de vie ou l'analyse de filières de produits. Compte tenu de ces points distinctifs, nous considèrerons les technologies des énergies renouvelables comme étant des technologies environnementales intégrées.

Les technologies intégrées représentent généralement une charge d'investissement beaucoup plus lourde que les technologies additives. Par ailleurs, motivées par un accroissement du bien-être social, elles se prêtent bien à des programmes concertés de modernisation technologique et industrielle impulsés et suivis par les pouvoirs publics, comme ceux consacrés aux technologies des énergies renouvelables. Comme le notent FAUCHEUX et NICOLAÏ [1998, p.132] *« dans ces conditions, on serait tenté de conclure que les technologies intégrées sont pleinement en mesure de susciter un changement structurel écologique permettant un découplage entre la croissance économique et les facteurs nuisibles à l'environnement, favorisant ainsi une trajectoire de développement soutenable »*.

(ii) *Les éco-innovations organisationnelles* concernent la mise en œuvre de systèmes de management environnementaux (SME) au sein des firmes. Le management environnemental se traduit par la mise en place d'une organisation apte à identifier et à maîtriser les risques d'impact sur l'environnement. La finalité recherchée est l'amélioration d'un organisme dans son environnement en respectant ses spécificités et en évitant toute dégradation irréversible, respectant ainsi les principes du développement durable. Depuis les années 1980, le développement des SME a entraîné la multiplication des pratiques d'audits environnementaux (ou éco-audits) destinés à vérifier le respect de la réglementation environnementale, ou à aboutir à l'obtention d'une norme de certification environnementale[63]. L'engagement dans une démarche de management environnemental passe souvent par un premier éco-audit réalisé par un consultant extérieur à l'entreprise, puis par la création d'une équipe interne chargée

[63] A travers la norme Iso 14000. Les normes sont ainsi des outils pratiques de gestion qui vont bien au-delà du strict respect des textes législatifs. Il s'agit de méthodologies permettant de mettre en œuvre des mesures environnementales destinées entre autres à réaliser des améliorations comme la baisse du coût de la gestion des déchets, la diminution des consommations en énergie et matières premières, la baisse des coûts de marketing et de relations publiques auprès des régulateurs et du public…

d'accomplir les audits environnementaux. Ces différentes situations sont abordées de manière théorique par la littérature économique à travers le modèle principal-agent[64].

(iii) *Les innovations sociales*, mentionnées dans la Déclaration de Rio de 1992, apparaissent comme des éléments essentiels de la croissance économique et des aspects déterminants du développement durable. Cependant, ce concept n'est pas aisé à définir : il y a innovation sociale lorsque de nouveaux mécanismes et de nouvelles normes assurent et améliorent la situation des habitants, des collectivités et des territoires dans les domaines de l'insertion sociale, de la création d'emplois et de la qualité de vie (OCDE [2001b]). L'innovation sociale a pour but de répondre à des besoins nouveaux dont le marché ne tient pas compte ou de créer de nouveaux moyens d'insertion plus satisfaisants, c'est-à-dire de donner aux habitants bénéficiaires une meilleure place dans la vie économique et sociale. Les changements qu'entraînent l'innovation sociale peuvent porter aussi bien sur les concepts que sur l'organisation, le financement et les rapports entre les acteurs et les territoires. Les innovations sociales renforcent le développement local par la qualité de la vie et des ressources humaines et, plus généralement, par la capacité d'un territoire d'élargir ses perspectives de développement. Notons pour l'instant qu'il faut se garder de tracer une ligne de démarcation trop stricte entre l'innovation technologique et l'innovation sociale. A première vue les deux types d'innovations coexistent de manière imbriquée[65]. D'autre part, le développement et la diffusion de technologies sont eux-mêmes un processus social[66].

(iv) *Les innovations institutionnelles vis-à-vis de l'environnement* sont souvent considérées comme les fondations des politiques de développement durable (FREEMAN [1992]). Les réponses institutionnelles aux problèmes environnementaux passent aussi bien par exemple par la création de réseaux ou d'agences locaux[67], que par la mise en

---

[64] Voir notamment SINCLAIR-DESGAGNE et LANDIS GABEL [1993, 1997].

[65] Par exemple, les technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont un impact considérable dans des domaines comme l'administration publique, la prestation de services de santé ou le développement de nouvelles approches pédagogiques.

[66] L'innovation réussie en milieu industriel est conditionnée par des facteurs sociaux et organisationnels très importants, comme les modes de gestion adaptés, l'organisation du travail, la formation des ressources humaines ou l'existence de réseaux inter-entreprises.

[67] Par exemple pour la gestion des ressources hydrauliques d'une zone géographique déterminée.

œuvre de nouveaux régimes de gouvernance globale comme pour la gestion des problèmes de biodiversité ou climatiques globaux. L'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) et les nombreuses institutions relais créées aux niveaux nationaux, régionaux et locaux sont des exemples caractéristiques d'éco-innovations institutionnelles.

* * *

Nous avons souhaité dans cette section porter un éclairage sur les questions de mesure et de définition des innovations énergétiques. Tout en tenant compte des imperfections méthodologiques, l'approche des innovations par les *proxys* habituels que sont les dépenses de R&D et le nombre de brevets a montré des divergences d'interprétations. Parmi les nombreuses définitions relatives aux innovations nous avons privilégié celles qui caractérisent les innovations de l'énergie. Ces dernières, relevant essentiellement d'innovations de procédés, c'est-à-dire de nouveaux processus de transformation, progressent majoritairement de manière incrémentale depuis les dernières décennies. Enfin, les définitions posées nous ont permis de conclure que les technologies des énergies renouvelables, au vu de la structuration actuelle des systèmes énergétiques des pays industrialisés, apparaissent comme des technologies radicales, et comme des technologies environnementales intégrées.

Conclusion du Chapitre 1

Ce Chapitre 1 avait pour objet de rappeler les manifestations du changement technologique sur la constitution et l'évolution des systèmes énergétiques. La première section nous a permis de voir que dans les pays industrialisés, l'accroissement de la variété technologique des systèmes énergétiques est allé de pair avec un accroissement de leur efficacité, entraînant une baisse constante de l'intensité énergétique. Sur la longue période, le panorama d'évolution des systèmes énergétiques, depuis les énergies renouvelables traditionnelles, a montré que le principal retournement, soutenu par de nombreuses innovations technologiques, est intervenu en quelques décennies entre le charbon et le pétrole, marquant ainsi le « verrouillage » des sources fossiles. Au cours des années 1960, la transformation du cadre géopolitique des industries de l'énergie et la montée des préoccupations environnementales ont initié un début de diversification des technologies énergétiques. Mais ce mouvement a été stoppé par un renouveau technologique de l'industrie pétrolière. Dans la deuxième section, nous avons d'abord tenté de rendre compte, avec les précautions nécessaires, des différences dans les mesures des innovations technologiques énergétiques. De manière plus théorique, l'abord des définitions classiques des innovations nous a ensuite permis de qualifier la plupart des innovations technologiques de l'énergie d'incrémentales. Enfin, nous avons montré que, dans le paysage énergétique actuel, la particularité des technologies des énergies renouvelables était d'apparaître comme des innovations radicales et environnementales intégrées.

CHAPITRE 2

Théorie Economique Standard et Innovations Technologiques Environnementales

Introduction

L'inertie, l'absence de flexibilité et le verrouillage des systèmes énergétiques des pays industrialisés par les sources d'énergies fossiles augmentent leur vulnérabilité et limitent les marges d'action face aux perturbations et aux chocs imprévus. L'absence de la perspective d'un épuisement des réserves fossiles à court et moyen termes ne constitue pas un facteur limitant imposant un changement de trajectoire énergétique. Il en est autrement à plus long terme où une adaptation des technologies existantes ne sera pas suffisante. Il faut s'attendre alors à ce que les contraintes d'approvisionnement et la tendance au réchauffement climatique poussent à une orientation vers des technologies énergétiques «*natural augmenting* » prévenant de manière plus drastique les atteintes à l'environnement. Cependant, la constitution et l'évolution des systèmes énergétiques et des technologies qui le composent relèvent d'une dimension de longue période rendant d'actualité l'engagement vers une option de flexibilité visant à composer un *mix* multi-énergies.

Dans le panorama énergétique actuel, une politique de diversification en faveur de technologies comme celles des énergies renouvelables (TER) pour la production d'électricité consiste donc à inciter les firmes à s'engager dans l'apprentissage de technologies déjà constituées, mais qui sont toujours en cours d'amélioration quant à leur efficience. Il s'agit donc d'étudier particulièrement les phases de transition vers une nouvelle trajectoire formée d'*innovations environnementales radicales* encore non rentables compte tenu de la lourdeur de leurs coûts de développement et de la non intégration de leur bénéfice environnemental.

Du côté de l'analyse économique, la problématique qui se pose implique alors de définir un cadre théorique permettant de considérer le processus d'innovation entendu au sens de « création » de technologie. La technologie ne doit donc pas être considérée comme une « donnée » mais comme le résultat, achevé ou inachevé, d'un processus graduel de développement. Ce processus nécessite d'être situé dans le contexte institutionnel où s'exercent les interactions entre les politiques publiques incitatives et les stratégies des firmes s'engageant dans l'apprentissage et la mise en œuvre de nouvelles technologies.

Ce deuxième chapitre, à partir d'une démarche s'attachant à examiner les fondements théoriques et leurs prolongements principaux, a pour objet de juger de la

pertinence ou non des outils théoriques de l'analyse économique standard pour appréhender les incitations à innover pour des technologies environnementales radicales.

La *Section 1* présentera le modèle linéaire de l'innovation prévalant dans la conception économique dominante du changement technique et son adéquation avec les conceptions classiques « *technology push* » ou « *demand pull* ».

Dans la *Section 2*, nous rappellerons brièvement comment la théorie néo-classique « élémentaire » représente la technologie, à travers la fonction de production et dans un traitement purement allocatif de l'innovation. Nous aborderons ensuite à partir du modèle d'ARROW [1962a] les concepts fondamentaux de l'analyse économique standard de la R&D, justifiant les interventions de l'Etat dans ce domaine, et les développements plus récents des modèles traitant des relations entre les activités de R&D et des structures de marché.

Dans la *Section 3* nous essaierons de situer d'abord la place des politiques publiques d'innovation et industrielles dans la théorie standard. Nous poserons ensuite les principes et les limites, à travers les difficultés de leur mise en œuvre, des mécanismes de correction proposés pour atténuer les défaillances réduisant les incitations à innover.

Dans la *Section 4* nous exposerons les fondements théoriques des instruments des politiques de l'environnement destinées à internaliser les coûts externes associés à l'utilisation de technologies polluantes. Nous commenterons ensuite les résultats des modèles traitant des incitations à innover induits par ces politiques afin de mesurer leurs portées et leurs limites.

Section 1. Le schéma linéaire de l'innovation : une simplification excessive d'un processus complexe

La conception économique dominante du changement technique s'appuie encore essentiellement, explicitement ou implicitement, sur un modèle[68] « hiérarchique et linéaire » de l'innovation. Ce « modèle de l'échelle » (« *ladder model* ») (MAHDJOUBI [1997]) fait se succéder différentes étapes, où l'*output* de chaque étape représente l'*input* de l'étape suivante : la recherche fondamentale induit la recherche appliquée qui donne lieu à des inventions ; celles-ci permettent le développement d'innovations qui elles-mêmes débouchent sur de nouveaux produits mis sur les marchés.

Bien que s'inspirant initialement de la séquence *schumpétérienne invention – innovation – diffusion*, et même s'il est très souvent évoqué dans la littérature théorique, économique et historique, consacrée à la modélisation des processus d'innovation, le modèle linéaire ne repose pas sur un référentiel théorique clairement établi. En effet, il est essentiellement utilisé comme une heuristique, une conception « implicite », plutôt qu'une théorie ayant fait l'objet de propositions, de discussions et de révisions ultérieures en fonction des retours d'expériences de son application. Ces caractéristiques expliquent pour une large part la longévité de ce modèle.

La compréhension de l'essor à un modèle linéaire de l'innovation nécessite de le replacer brièvement dans son contexte historique. Plusieurs auteurs[69] soulignent qu'une de ses premières évocations, présentée comme la plus influente, est celle contenue dans le rapport *Science, the endless frontier* de V. BUSH [1946], président du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), présenté au Président américain F.D. ROOSEVELT et proposant la création de la *National Science Foundation* (NSF). Les conclusions[70] du

[68] Nous employons ici le terme de modèle comme une représentation des processus d'innovation, c'est-à-dire un modèle qui guide et organise l'action des agents impliqués dans la réalisation ou la compréhension de ces processus.

[69] Voir notamment FREEMAN [1996], STEINMUELLER [1996], PERRIN [2001].

[70] « *Science offers largely unexplored hinterland for the pioneer who as the tools for his task. The rewards of such exploration for both the Nation and the individual are great. Scientific progress is one essential key to our security as a nation, to our better health, to more jobs, to a higher standard of living, and to our cultural progress.* » BUSH [1946] cité par STEINMUELLER [1996, p. 55].

rapport, plaçant les activités de recherche fondamentale comme principales initiatrices des innovations industrielles, mettaient en exergue les contributions potentielles de la science dans l'amélioration du bien être social national et venaient ainsi relayer le discours d'une « idéologie scientiste » qui allait se développer aux Etats-Unis et en Europe, dont une des expressions les plus marquantes, calquée sur le modèle linéaire, allait apparaître dans le développement de l'énergie nucléaire. Compte tenu du fort pouvoir d'influence que pouvaient exercer les scientifiques dans les organes de conseils gouvernementaux pour la politique technologique, le développement du nucléaire, d'abord comme arme de destruction massive, puis en tant que source d'électricité quasi inépuisable[71], a permis ensuite une justification plus générale de l'importance des budgets publics consacrés aux activités de recherche de base (FREEMAN [1992, 1996]).

Nous discuterons dans un premier point de la définition du contenu des activités des R&D, puis dans un deuxième temps nous évoquerons la place du modèle linéaire d'innovation dans la débat classique « *technology push* » *versus* « *demand pull* ».

1.1. Les activités de R&D, relais entre l'invention et l'innovation

Le modèle linéaire permet de mieux comprendre pourquoi l'invention a fréquemment été identifiée au processus de découverte scientifique. Il établit les activités de recherche et développement (R&D) comme « *un relais incontournable entre l'invention et l'innovation* » (MORVAN [1991], p.318). Comme l'ont déjà montré les définitions que nous avons précédemment abordées en vue d'éclaircir les liens entre les inventions et les innovations[72], l'analyse des rapports entre la *technique* et l'*économie* est souvent obscurcie par une série de confusions entre des concepts dont la portée a pu varier selon les époques. C'est pourquoi nous souhaitons apporter également quelques clarifications sur le contenu même des activités de R&D.

A l'image des travaux présentés dans le Chapitre 1, de très nombreuses études emploient les statistiques concernant la R&D comme un indicateur de mesure du progrès technique que ce soit à l'échelle d'une branche industrielle ou à un niveau macro-économique. Sans rentrer dans le détail méthodologique de la construction et de

[71] Cf Chapitre 1.

[72] Cf Chapitre 1.

la mise en œuvre des indicateurs révélant l'implication dans des activités innovantes[73], il est nécessaire d'exposer un certain nombre de définitions afférentes à la R&D pour essayer de cerner les contours de ce type d'activités.

AMABLE *et al.* ([1997], p.16) avancent que la recherche «*(…) a pour objet de produire des connaissances nouvelles qui, appliquées à l'activité de production, donneront naissance à des biens ou des procédés de fabrication nouveaux qui permettront une augmentation de l'utilité des consommateurs dans le cas de biens de consommation, ou rendront possible une augmentation de la productivité s'il s'agit de biens intermédiaires.* » Cette définition a l'avantage d'être assez précise, mais elle présente une vision restrictive des effets du changement technique sur l'économie. La formulation minimale des activités de recherche qu'elle pose nécessite d'être élargie.

Le *Manuel de Frascati* (OCDE [1993]), référence classique dans ce domaine, propose une conception plus générale. Il définit (*ibid.*, p.7) la R&D comme *« les travaux de création entrepris de façon systématique en vue d'accroître la somme des connaissances, y compris la connaissance de l'homme, de la culture et de la société, ainsi que l'utilisation de cette somme de connaissances pour de nouvelles applications »*. Cette définition laisse apparaître la volonté d'englober à la fois les éléments de R&D concernant les sciences sociales et humaines et ceux des sciences exactes, naturelles et de l'ingénieur, ce qui lui confère un caractère assez général. Notons cependant que la R&D doit être dissociée d'une vaste gamme d'activités connexes fondées sur la science et la technologie. Ces activités sont étroitement liées à la R&D à la fois par des flux d'informations, des opérations, des institutions ou le personnel. Ainsi, les critères qui permettent de distinguer la R&D de ces activités est l'existence dans la R&D d'un *« élément de nouveauté non négligeable »* et *« la dissipation d'une incertitude scientifique et/ou technologique »* (OCDE [1993], p.9).

FORAY [2000] introduit des particularités supplémentaires dans son approche de la recherche. Il emploie le terme de R&D en se référant plus précisément aux «*(…) travaux de création intellectuelle entrepris sur une base systématique dans le but délibéré d'accroître le stock de connaissances.* » (*ibid.*, p.36) Ainsi, la création « délibérée » de connaissances est essentiellement le fait des centres de recherche, des

[73] Voir à ce sujet notamment la synthèse de LE BAS ([1995], encadré p. 36-37) *« La statistique de l'innovation : de la technométrie à l'innovamétrie »*.

académies scientifiques et des laboratoires de R&D. Une des caractéristiques principales de leurs activités est alors d'être situées *« à une certaine distance »* (spatiale, temporelle ou institutionnelle) des lieux de production et de consommation. L'intégration analytique d'une distance relative entre la recherche et l'industrie, même si elle ne va pas sans soulever de problème, paraît en effet nécessaire pour appréhender une division et une spécialisation du travail. Elle pourra permettre de distinguer notamment les chercheurs des autres producteurs de connaissances, notamment les diffuseurs et les utilisateurs de technologies.

Dans la vision traditionnelle du « chaînage » de la recherche, le *Manuel de Frascati* répertorie et explicite trois niveaux d'activités[74] de R&D :

- *la recherche fondamentale* : elle consiste en des travaux expérimentaux ou théoriques essentiellement entrepris en vue d'acquérir des connaissances nouvelles sur les fondements des phénomènes et des fais observables, sans envisager une application ou une utilisation particulière. La recherche fondamentale est effectuée majoritairement par les universités et les organismes publics, mais aussi par les entreprises. Ses résultats ne sont en général pas négociés, mais donnent lieu à des publications dans les revues scientifiques ou sont échangés directement entre les organismes ou les personnes intéressées. Selon les domaines et les circonstances, la diffusion des résultats de la recherche fondamentale peut être « restreinte » pour des raisons stratégiques ou de sécurité ;
- *la recherche appliquée* : elle est orientée vers un objectif pratique déterminé et consiste en des travaux originaux entrepris en vue d'acquérir des connaissances nouvelles. Ses résultats portent sur un produit unique ou un nombre limité de produits, d'opérations, de méthodes ou de systèmes. La recherche appliquée permet la mise en forme opérationnelle des idées. S'inscrivant dans une logique de marché, les connaissances et/ou les informations qu'elle produit sont soit brevetées, soit conservées secrètes ;
- *le développement* : il est constitué par les travaux basés sur des connaissances existantes obtenues par la recherche et/ou l'expérience pratique, dans l'optique de lancer la fabrication de nouveaux matériaux, de nouveaux produits, et

[74] Cette distinction est souvent reprise dans la nomenclature utilisée par les statisticiens de la recherche industrielle.

d'établir de nouveaux procédés ou d'améliorer considérablement ceux qui existent déjà. Ce stade consiste à la mise au point technique d'un produit (ou d'une unité de production) préalable à la fabrication sur une échelle industrielle et commerciale.

Si ces trois niveaux ne sont pas d'une grande utilité pour tracer une frontière nette entre la science et la technologie, ils permettent en revanche de jalonner les activités de recherche fondamentale, de recherche appliquée et de développement. Ces catégories, définies en fonction du caractère plus ou moins exploratoire de la recherche et de leur plus ou moins grand éloignement des applications commerciales, restent cependant assez imprécises et n'aident pas véritablement les systèmes statistiques[75] à établir des distinctions opérationnelles, notamment compte tenu du flou, dans la réalité industrielle, des limites entre les activités des inventeurs et des «développeurs ». Par exemple, ces catégories ne semblent pas correspondre à certains secteurs, comme ceux de la pharmacie et des biotechnologies, dans lesquels la recherche de base peut être étroitement liée au marché (COCKBURN *et al.* [2002]).

STOKES [1994] introduit une distinction entre deux modes de recherche de base, selon l'intention *a priori* du projet. Il différencie la recherche de base pure, menée sans intention pratique *a priori*, et la recherche de base *a priori* orientée vers un domaine particulier d'application. Chacun des trois modes de recherche est ensuite symbolisé par le nom d'un savant célèbre qui l'aurait pratiqué : EDISON est associé à la recherche appliquée, BOHR à la recherche de base pure et PASTEUR à la recherche de base inspirée par un usage. La distinction entre les deux types de recherche de base peut être alors utile pour analyser les situations dans lesquelles la recherche de base est proche du marché, c'est-à-dire des situations rompant avec l'image de phases linéaires successives de la recherche de base jusqu'au marché.

1.2. Le modèle linéaire et le débat «*technology push*» *versus* « *demand pull* »

Le modèle linéaire de l'innovation a longtemps été naturellement en adéquation avec deux autres visions, pourtant opposées, dans les débats théoriques cherchant à expliquer l'origine des innovations. D'un côté la conception du « *technology push* » (ou du «*science push* ») avance l'idée selon laquelle l'innovation est «poussée » par les

[75] Basés sur la distinction classique *input*/*output* de la recherche.

résultats des avancées de la recherche scientifique, alors que de l'autre côté la conception du « *demand pull* » (ou du « *market pull* ») conçoit l'innovation comme « tirée » par les exigences des demandes formulées sur les marchés, ces deux forces influençant le changement technique de manière unidirectionnelle (FREEMAN [1994], ROTHWELL [1996]).

1.2.1. L'innovation poussée par la technologie et les opportunités technologiques

La thèse du *technology push*, d'inspiration *schumpétérienne*, soutient que les entreprises cherchent à déceler les « opportunités technologiques » (ROSENBERG [1982], DASGUPTA [1986]) de leur secteur, c'est-à-dire le potentiel de progrès technique dont est porteuse une activité afin d'y concentrer leurs efforts de recherche pour en tirer ensuite un bénéfice. Les opportunités technologiques dépendent des « lois de la nature » mais sont également fonction du niveau d'accumulation des connaissances de base[76], du degré de diffusion et de réception par l'industrie, des réseaux de relation entre entreprises et entre les entreprises et les laboratoires de recherche…

La notion d'opportunité technologique est à rapprocher de celle de « *general purpose technologies* », c'est-à-dire de « technologies génériques » (BRESNAHAN et TRAJTENBERG [1995]). Ainsi une innovation majeure peut être qualifiée de technologie générique si elle possède un potentiel d'utilisation dans de nombreux secteurs et qu'elle entraîne des changements notables dans leur fonctionnement. La diffusion de technologies génériques, comme par exemple l'informatique et les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), les technologies des matériaux nouveaux ou les biotechnologies, met particulièrement en évidence l'importance du lien science fondamentale-technologie industrielle (FREEMAN [1992], PAVITT [1992]). Dans ces trois cas la relation science-technologie est si étroite qu'il est parfois pratiquement impossible de faire la distinction.

[76] ROSENBERG [1974] a, parmi les premiers, mis en avant l'importance des progrès de la basescientifique comme le facteur qui élargit les possibilités en particulier pour les innovations radicales.

BARLET *et al.* [1998] ont cherché à tester économétriquement les opportunités technologiques sur le plan empirique. En retenant un indicateur qualitatif[77] fourni par les entreprises, les auteurs mettent en évidence de fortes disparités entre des branches de l'économie à «*haut niveau d'opportunités technologiques* », comme l'aéronautique, la pharmacie ou les biens d'équipement professionnels, et celles à « *faible niveau d'opportunités technologiques* », comme l'industrie du bois, du papier, le textile ou les matériaux de construction. Par ailleurs, les résultats de l'étude montrent qu'il existe également de fortes disparités de capacités d'innovation intra-branche. Les branches à faibles opportunités technologiques comportent une proportion importante d'entreprises fortement innovantes, et celles à fortes opportunités technologiques peuvent comprendre des entreprises ne consacrant aucun effort significatif à la recherche. Ces résultats conduisent à penser que l'activité innovante d'une entreprise ne dépend pas seulement du « déterminisme technologique » de sa branche, même si la prise en compte des opportunités technologiques dans l'explication de ses performances montre des effets significatifs.

1.2.2. L'innovation tirée par la demande

Les tenants du *demand pull* considèrent que les caractéristiques de la demande orientent et soutiennent le rythme des innovations. Selon le travail pionnier de SCHMOOKLER [1966] la demande permet d'expliquer l'intensité et la direction des activités d'innovation des entreprises. Son analyse[78] est fondée sur les hypothèses suivantes : d'une part, la plupart des entreprises possèdent des capacités d'innovation leur permettant de s'adapter aux différentes opportunités de profits, et d'autre part, la taille actuelle et future d'un marché joue un rôle important dans l'orientation des innovations. Ainsi plus la taille du marché est élevée, plus l'innovation va se diriger

[77] Au cours des enquêtes sur l'innovation BARLET *et al.* [1998] construisent un indicateur qualitatif à partir des réponses des entreprises à la question suivante : *«Considérez-vous que votre activité est technologiquement (a) non innovante, (b) faiblement innovante, (c) moyennement innovante, (d) fortement innovante ? »* (*ibid.*, p.7). En regroupant les catégories (a) et (b), d'une part, et les catégories (c) et (d), d'autre part, les auteurs obtiennent une répartition des différentes branches de l'économie en fonction du degré d'opportunités technologiques.

[78] L'étude de SCHMOOKLER [1966] porte sur la demande de biens d'équipement à partir de statistiques concernant les brevets pour les secteurs des chemins de fer, des machines agricoles, ainsi que pour les industries papetière et pétrolière aux Etats-Unis.

vers ce marché, à la fois parce que le profit d'une innovation croît avec la taille et parce que les chances de succès augmentent avec le nombre d'innovateurs potentiels sur le marché. Mais SCHMOOKLER fait reposer sa thèse sur des arguments plus subtils. Sans exclure l'importance des opportunités technologiques comme « moteur » de l'innovation, il montre que les équipements issus des innovations dans les industries à fortes opportunités technologiques ont tendance à être plus tard adoptés dans les secteurs où la demande est la plus élevée. Il suggère que les innovations technologiques se diffusent au cours du temps depuis des industries d'origine ayant une base technologique et des opportunités fortes, vers des secteurs industriels d'utilisation où la demande est élevée.

La thèse de SCHMOOKLER dans le sens du *demand pull* demeure cependant difficilement testable, puisqu'elle suppose de pouvoir identifier le secteur d'origine et le secteur d'utilisation de chaque innovation.

MOWERY et ROSENBERG [1979] ont mis l'accent de manière assez critique sur le manque de fiabilité et sur l'existence de biais méthodologiques[79] dans la plupart des études empiriques cherchant à prouver un changement technique essentiellement induit par la demande. Par la suite plusieurs études ont voulu tester les hypothèses de SCHMOOKLER soit en utilisant les mêmes données que lui (VERSPAGEN, KLEINKNECHT [1990]), soit en construisant un ensemble de données plus détaillé et plus complet (SCHERER [1982], WALSH [1984]). Ces recherches font souvent apparaître un synchronisme entre la demande et les innovations technologiques mais dans des proportions plus faibles que celles résultant de l'étude pionnière de SCHMOOKLER.

Finalement, comme le suggère GUELLEC [1999], l'offre et la demande, en tant que déterminants des progrès technologiques, n'ont de signification économique que l'une par rapport à l'autre. Bien que le débat *technology push/demand pull* ne soit pas encore clos aujourd'hui, il semble admis que les déterminants des innovations soient à rechercher autant du côté des avancées technologiques que des caractéristiques de la demande, et que les relations entre les deux varient avec le temps, la «maturité » et l'ampleur de la base de savoirs du secteur industriel étudié (FREEMAN [1994], HOWELLS [1997]). C'est le cas des éco-innovations qui peuvent être à la fois poussées par des

[79] Leurs critiques portent notamment sur la non explicitation du type de demande qui est considéré (la demande observée sur des périodes de consommation passées, une évaluation de la demande future, une demande potentielle) et sur la construction des données.

innovations technologiques permettant de produire des biens de manière plus efficiente d'un point de vue environnemental (baisse de la consommation d'énergie, réduction des émissions polluantes), et tirées par les préférences des consommateurs de plus en plus marquées pour des produits « verts ». Cependant, la réalisation et la diffusion des nouvelles technologies environnementales comme celles des énergies renouvelables sont handicapées par un manque de compétitivité compte tenu de la non comptabilisation des effets externes négatifs dans le coût des technologies classiques. Pour cette raison, les éco-innovations vont être dépendantes des soutiens publics et en particulier de la définition d'un cadre incitatif. Ainsi, en plus des avancées technologiques et de la stimulation que peut exercer la demande, les innovations environnementales sont largement conditionnées par l'action d'un « *regulatory push effect* » (RENNINGS [2000]). Dans une étude sur les facteurs qui influencent les firmes allemandes à innover pour des technologies environnementales, CLEFF et RENNINGS [1999] ont mis en évidence que les éco-innovations de produits résultent principalement des comportements stratégiques des firmes sur les marchés (*market pull*), alors que les éco-innovations de processus sont souvent poussées par le cadre réglementaire.

* * *

Tel qu'il est fréquemment évoqué, le modèle linéaire de l'innovation nous apparaît être une simplification excessive d'un processus beaucoup plus complexe qu'est le changement technique, même s'il conserve une certaine pertinence dans les domaines technologiques les plus proches de la science. Pourtant malgré son ancienneté, il imprime encore sa marque à la plupart des représentations formelles standards des processus d'innovation et sert toujours à orienter de nombreuses politiques scientifiques et technologiques. Afin de cerner au mieux la complexité de la réalité du processus d'innovation des technologies des énergies renouvelables, nous serons conduits dans le chapitre suivant à remettre en question cette image linéaire du changement technique et à opter pour une représentation fondée sur les interactions entre les phases amont et aval du processus d'innovation.

Section 2. La technologie assimilée à de l'information : conséquences en termes d'incitations privées et justification des interventions publiques

Dans le but de mettre en évidence les facteurs d'incitation et les obstacles qui vont intervenir dans la décision d'une firme d'affecter ou non des ressources pour innover en faveur d'une technologie environnementale, nous souhaitons analyser dans un premier temps les fondements des hypothèses de l'économie standard de la R&D. Si dans la vision « élémentaire » du modèle néo-classique la technologie est conçue comme une ressource exogène au processus de production des biens, il subsiste la possibilité de l'envisager comme une ressource produite. Ainsi, il s'agit de considérer le schéma linéaire d'innovation et la technologie, produit de l'invention, comme un bien particulier faisant l'objet d'un marché particulier. Quelles sont alors les caractéristiques de l'*output* de l'activité d'innovation et leurs conséquences en termes d'incitation et de coordination des agents ?

Après avoir rappelé brièvement la représentation de la technologie dans la théorie néo-classique « élémentaire », nous exposerons l'analyse fondatrice d'ARROW [1962a] traitant la technologie comme une information, puis nous donnerons un aperçu de ses principaux développements récents sur les comportements stratégiques pour innover.

2.1. Quelle représentation de la technologie dans le modèle néo-classique ?

Dans l'approche néo-classique « élémentaire », la firme en tant qu'unité de production est considérée comme une « boîte noire technologique » combinant des facteurs de production achetés sur un marché. Les possibilités techniques de la firme sont représentées par la fonction de production qui est définie comme la frontière de l'ensemble de production, exprimant l'ensemble des combinaisons de facteurs efficaces permettant d'obtenir le produit maximum dans l'état des connaissances techniques à un moment donné. Ces possibilités techniques s'expriment dans les fonctions de coût qui sont déduites de la fonction de production pour un niveau donné de rémunération des facteurs de production. Le progrès technique est alors mesuré de manière quantitative

par une diminution des coefficients de production, indiquant qu'avec un même montant de ressources on obtient une plus grande quantité de produit.

L'analyse économique standard est ainsi fondée sur le postulat d'*efficacité technologique*. Il implique une séparation stricte entre les problèmes *non économiques* de constitution des technologies (ou de changement d'une technologie à une autre), qui se décident en dehors de la sphère des firmes, et les problèmes *économiques* de choix d'une technique par une firme, en fonction des prix des produits et des facteurs de production, qui relèvent de la rationalité économique[80] (GAFFARD [1989, 1990a]). Ainsi, « l'annuaire des techniques » disponible à un moment donné ne peut être modifié que par des modifications exogènes de la base de connaissances, et non par l'intermédiaire des signaux du marché ou des contraintes de nature économique.

La représentation de la technologie est structurée par la fonction de production qui détermine la nature et le déroulement du processus d'innovation. Analytiquement ce processus est considéré comme instantané : une nouvelle technologie est adoptée lorsqu'elle est considérée plus efficace que les technologies en place. En outre, elle est supposée parfaitement « absorbable » et immédiatement « maîtrisée » par une firme donnée. Ainsi « *(…) la diffusion n'est que la réalisation instantanée d'un équilibre économique dont la configuration exprime une certaine dotation de ressources, y compris des ressources technologiques assimilées à de l'information. L'existence, l'unicité et la stabilité de cet équilibre procèdent de conditions générales fixées* a priori *concernant la forme des ensembles de production, le mode de formation des anticipations et les fonctions de réaction des entreprises concernées.* » (COHENDET et GAFFARD [1990], p. 937). Le processus par lequel cet équilibre peut être atteint, compte tenu des contraintes liées à l'ancienne technologie, n'est pas étudié. L'analyse du progrès technique ne s'intéresse qu'à son résultat, c'est-à-dire aux caractéristiques de la nouvelle capacité de production et aux implications de son adoption pour une firme.

La théorie néo-classique élémentaire se consacre donc à un traitement purement allocatif de l'innovation et n'intègre ni la dimension de la création de nouvelles

[80] *«(…) l'usage de cette fonction* [de production] *permet d'identifier l'entrepreneur comme étant celui qui choisit entre les techniques optimales dans un annuaire fourni par l'ingénieur et, donc, de dissocier nettement ces deux personnages, et partant l'activité économique de l'activité technique »* (GAFFARD [1990b, p.14]).

ressources, ni les problèmes liés à la gestion des phases de transition entre deux technologies. Cela nous conduit à poser *a priori* une première réserve sur la pertinence de ce cadre théorique pour étudier la création, le développement et l'adoption de nouvelles technologies comme celles des ER, ainsi que leur insertion dans le système énergétique, compte tenu du temps d'apprentissage qu'elles nécessitent.

Nous allons voir dans la section suivante qu'à partir de l'article séminal d'ARROW [1962a] seront introduits dans le cadre standard des aspects de création de ressources, en prenant en compte les comportements spécifiques des agents économiques face à l'innovation. La technologie va être assimilée à un bien économique et l'analyse va s'intéresser aux conditions de sa production et de son échange.

2.2. Le modèle fondateur de ARROW [1962a] : la technologie assimilée à de l'information

Les concepts fondamentaux de l'analyse économique standard de la R&D ont été initiés par NELSON [1959][81], mais surtout quelques années plus tard par ARROW [1962a]. Son article a ouvert un large programme de recherche de l'Economie de la R&D. Il aborde les problèmes de l'incitation à innover et de l'appropriabilité des résultats de la recherche en établissant le lien entre la structure industrielle et l'innovation.

ARROW envisage les activités de R&D comme un mécanisme de création des connaissances[82], qu'il assimile à de l'*information*[83]. Plus précisément, l'innovation est

[81] Dans son article de 1959, NELSON, à partir de l'exemple des recherches sur l'élaboration du transistor, affirmait qu'un marché concurrentiel livré à lui-même consacrerait moins que l'investissement optimum à la recherche de base. La raison est qu'une entreprise à but lucratif n'est pas certaine de recueillir tous les résultats de la recherche de base qu'elle finance, compte tenu du caractère fortement incertain de ces résultats et des difficultés qu'elle connaît pour obtenir une rémunération de la part des imitateurs. Une politique de secret pour contrer l'imitation n'est pas optimale, puisqu'elle réduit les applications à faible coût marginal. Si de surcroît les entreprises sont peu enclines à pendre des risques, ou fixent des horizons à court terme pour leurs décisions en matière d'affectation de ressources, les dépenses privées consacrées à la recherche de base seront d'autant moins optimales.

[82] *« Invention is interpreted broadly (…) as the production of knowledge.»* (ARROW [1962a, p. 104]).

[83] *« The central economic fact about the processes of invention and research is that they are devoted to the production of information. By the very definition of information, invention must be a risky process, in*

perçue comme un « *concept informationnel pur* » (COHENDET *et al.* [1992, p. 64]). Il se réfère explicitement au modèle de concurrence pure et parfaite permettant une allocation optimale des ressources et considère l'information comme une marchandise « ordinaire », appropriable et échangeable sur un marché. Comparant dans un cadre statique les incitations à inventer dans les cas d'un marché monopolistique et d'un marché concurrentiel d'un produit[84], il montre que ces deux situations restent systématiquement sous-optimales vis-à-vis du surplus social, ce qui signifie qu'aucun optimum de premier rang ne peut être atteint : « *Clearly, the potential social benefit always exceeds the realized social benefit* [85] » (ARROW [1962a, p.117]).

L'application du modèle d'équilibre général aux activités de R&D soulève un certain nombre de difficultés fondamentales, habituellement répertoriées par l'Economie publique comme des sources de défaillances du marché entravant l'affectation optimale des ressources pour innover. Il ressort de l'analyse d'ARROW que l'incertitude, l'indivisibilité et surtout l'inappropriabilité de l'information constituent les principaux obstacles à l'innovation. Nous reprenons et commentons ces trois points afin d'expliciter la portée de la conception « *arrowienne* » de la technologie.

2.2.1. L'incertitude des activités de R&D

L'évaluation du niveau de l'incertitude va être un élément déterminant dans la décision d'innover d'une firme. Une firme innovante s'engage dans un processus incertain et risqué, en ce sens qu'elle n'est pas sûre d'obtenir la récompense de son effort d'innovation, tant sur le plan technologique que sur le plan commercial. C'est pourquoi la structure des gains sur les marchés de produits (ou de processus) innovants

---

that the output (information obtained) can never be predicted perfectly from the inputs.» (ARROW [1962a, p. 111]).

[84] L'invention concerne un nouveau procédé venant réduire les coûts unitaires de production. En situation de monopole, seul le monopoleur peut inventer et breveter l'innovation (l'inventeur est « interne » à la firme), ce qui établit des barrières à l'entrée. Dans le cas concurrentiel, les firmes sont distinctes de l'inventeur lequel est considéré comme externe. Afin de pouvoir utiliser et appliquer industriellement l'invention, les firmes concurrentielles doivent s'acquitter du paiement d'une licence d'exploitation auprès de l'inventeur.

[85] *« Manifestement, le bénéfice social potentiel est toujours supérieur au bénéfice social réalisé. »*

est particulièrement asymétrique, avec des gains élevés pour les « gagnants » et des pertes importantes pour les autres.

L'incertitude d'un projet peut être appréhendée sous différentes formes. Elle peut être « présente » si elle concerne les valeurs actuelles de certaines variables comme la demande, ou « future » si elle porte sur les évolutions incertaines de ces mêmes variables (EPAULARD et POMMERET [1998]). Dans ce cas, bien que le temps soit porteur d'informations, l'incertitude n'est pas nécessairement réduite compte tenu de la persistance de certains aléas, comme par exemple pour le domaine énergétique des aléas géologiques, technologiques, climatiques. L'incertitude peut également être exogène lorsqu'elle porte sur des variables indépendantes des structures institutionnelles et de l'activité humaine, comme le goût des agents, les caractéristiques des technologies disponibles ou l'évolution de la réglementation. En revanche, l'incertitude est endogène si elle porte sur les prix, puisqu'elle dépend des décisions des agents.

Concernant les innovations technologiques des ER, certaines d'entre elles, comme le solaire photovoltaïque reposant sur des principes physiques établis depuis longue date, sont marquées par une incertitude « endogène » quant aux potentiels techniques (degré d'efficience) et économiques (coût de fabrication, d'installation et de production de l'électricité « verte ») futurs des différentes sous filières ; de même que pèse en même temps une incertitude «exogène » sur l'adoption des TER conditionnée par la révélation et la croissance futures d'une demande des consommateurs pour l'électricité « verte ».

Avant de s'engager dans la décision d'innover, les firmes doivent réaliser un calcul économique afin d'arbitrer[86] entre les risques d'adoption et les bénéfices d'une exclusivité technologique. La théorie économique traditionnelle de la décision en avenir incertain est fondée sur l'axiomatique de VON NEUMANN et MORGENSTERN [1947] avec le modèle de l'*espérance d'utilité.* Celui-ci suppose que les individus connaissent les états futurs de la nature auxquels ils peuvent attribuer des probabilités de réalisation, ce qui leur permet de comparer plusieurs distributions de probabilités et d'établir une relation de préférence sur l'ensemble des probabilités. Cette relation de préférence repose sur quatre axiomes (comparabilité, transitivité, indépendance forte et

[86] Il faut souligner ici que l'arbitrage réalisé par les firmes porte sur les coûts et non sur la qualité et l'applicabilité des nouvelles connaissances qui, quelle que soit l'option retenue, sont supposées assurées.

continuité)[87], qui, lorsqu'ils sont vérifiés, permettent l'existence d'une fonction d'utilité telle que, quelles que soient deux distributions de probabilités, l'une est préférée à l'autre, si et seulement si, elle conduit à une espérance d'utilité supérieure. En application de ce modèle, la décision optimale en incertitude est celle qui maximise l'espérance d'utilité intertemporelle, et un investissement optimal est celui qui maximise la valeur actuelle nette (VAN).

Lorsque l'incertitude porte sur le niveau d'efficience de technologies économes en ressources énergétiques naturelles, comme les TER, la valeur des économies potentielles dépend également du prix futur de ces mêmes ressources. Cette incertitude sur les gains potentiels de l'adoption d'une telle technologie peut être perçue à travers la *valeur d'option* (JAFFE *et al.* [2003]). Elle représente le coût de l'irréversibilité qui est évité en choisissant une décision flexible, c'est-à-dire une décision qui préserve des possibilités d'actions futures et qui permette d'intégrer de nouvelles informations au fur et à mesure de leur arrivée.

L'obstacle de l'incertitude dans la production de nouvelles informations signifie que les *outputs* en termes de connaissances ne sont pas directement prédictibles à partir des *inputs* engagés dans la recherche. Ceci implique que les mécanismes classiques de marché protégeant l'innovateur des aléas et assurant une répartition des risques, comme par exemple un système d'assurance ou tout autre système équivalent, ne peuvent pas être utiles dans le cadre du processus d'innovation. Du fait de l'impossibilité d'observer et de contrôler l'effort de recherche individuel, un système d'assurance contre le risque d'échouer dans la production d'un nouveau bien (ou de mise au point d'un nouveau procédé) ne pourrait conduire qu'à affaiblir les incitations individuelles d'un innovateur (COHENDET [2003], CRAMPES et ENCAOUA [2003]). Il en résulte que d'un point de vue collectif, il n'est donc pas efficace d'assurer l'activité individuelle d'innovation contre le risque d'échec. Par contre, il est fréquent d'observer des mécanismes « d'auto-assurance » ou de gestion des risques. Dans ces options, les grandes entreprises, en ayant les moyens de gérer un portefeuille de projets de recherche et en diversifiant les risques[88] associés, possèdent des avantages substantiels par rapport aux innovateurs

[87] Voir notamment JOKUNG-NGUENA [1998] pour des développements.

[88] Les théories de gestion de portefeuille d'actif risqué enseignent qu'il faut établir une distinction entre les risques diversifiables et les risques non diversifiables. Lorsque les risques sont diversifiables et

individuels isolés. Un mécanisme d'auto-assurance de ce type discrimine alors entre les firmes qui possèdent l'assise financière de mener simultanément plusieurs projets et les autres firmes, œ qui constitue une source supplémentaire d'imperfection du marché dans l'allocation des ressources aux activités d'innovation. Par ailleurs, on trouve ici une certaine justification de l'hypothèse *schumpétérienne* en termes de diversification[89] des risques selon laquelle, en matière d'innovation sur les marchés de concurrence parfaite, les grandes entreprises auraient un avantage sur les petites unités productives.

2.2.2. L'indivisibilité des activités de R&D

Généralement l'indivisibilité en matière d'innovation fait référence à *« (…) l'existence d'un seuil incompressible de coûts à engager pour obtenir la production d'une première unité d'*output *»* (JACQUIER-ROUX [1995, p.44]). L'indivisibilité signifie que les connaissances nouvelles produites par des agents privés sont étroitement liées aux rendements d'échelle croissants et pour cela il est nécessaire de mettre en jeu un seuil minimal[90] d'investissement en deçà duquel aucun résultat ne peut être espéré. Les connaissances technologiques sont, de œ fait, apparentées à un coût fixe initial de production. Plus les coûts d'entrée dans un programme de R&D sont élevés, plus grande est l'indivisibilité. Une évaluation exhaustive des coûts d'entrée *ex ante* reste cependant impossible. En effet, d'une part, l'incertitude sur le résultat de la recherche ne permet pas de faire correspondre formellement une combinaison de facteurs et un *output* précis. D'autre part, il est possible de différencier en plus des *« coûts fixes purs »*, liés aux facteurs de production indivisibles «*individuellement* »[91], des «*coûts critiques* » liés aux facteurs indivisibles «*collectivement* »[92] (JACQUIER-ROUX [*ibid.*, p.45]). Ces coûts critiques, liés essentiellement au travail, ne peuvent pas être estimés précisément et

---

indépendants, il est possible de combiner les choix de façon à limiter le risque total supporté (AMENC et LE SOURD [2003]).

[89] Relevons pour le moment qu'il s'agit bien d'avantages en termes de diversification des risques et non d'intensité de la recherche ou de rythme des innovations (voir *supra*).

[90] Ce montant minimal est indépendant du niveau de la quantité de bien produite.

[91] C'est-à-dire qu'il faut l'intégralité de ce facteur pour produire une unité d'*output* comme pour en produire *n*.

[92] C'est-à-dire qu'il faut au minimum une quantité ou une combinaison de ces facteurs pour produire une unité d'*output* comme pour en produire *n*.

possèdent la caractéristique, particulièrement prononcée pour les activités de R&D, de se révéler pendant le processus de recherche. Il serait donc nécessaire de prendre en compte l'ensemble des coûts tels qu'ils apparaissent *ex post*. On peut remarquer toutefois que ces limites à la possibilité d'évaluer correctement les coûts d'entrée dans un programme de R&D donnent des indications aux firmes sur la probabilité d'une indivisibilité forte des activités de R&D et donc sur l'exigence d'une espérance de retour plus ou moins élevée.

Par ailleurs, les dépenses de R&D d'une firme se distinguent des autres types d'investissements par leur caractère irrécouvrable (*sunk costs*), c'est-à-dire que l'activité de recherche est hautement spécifique et les investissements pour produire une information, une fois réalisés, sont très difficilement redéployables vers d'autres activités.

La conclusion selon laquelle des coûts d'entrée élevés dissuadent l'entrée dans un programme de R&D et entravent le bon fonctionnement des marchés par une situation de concurrence imparfaite repose sur la nature même de l'*output* de la R&D qui est retenue dans le modèle d'ARROW, soit de l'information. Les conséquences de ces effets d'indivisibilité donnent *a priori* des signaux défavorables à l'engagement d'investissements de R&D pour les technologies d'énergies renouvelables. L'ampleur des investissements initiaux nécessaires et les délais relativement longs pour le développement des technologies environnementales sont incompatibles avec des stratégies d'investissement basées sur une mobilité et une flexibilité financières de court terme dans le but de capter des rendements financiers élevés.

2.2.3. Les problèmes liés à l'appropriabilité des externalités de R&D

Dans l'analyse d'ARROW le troisième et principal type d'imperfection de marché est lié à la nature même du bien information qui est le résultat de l'innovation. Il convient alors d'analyser les propriétés associées à une conception de la technologie comme un bien public, les problèmes d'externalités qui en découlent et les fondements établis pour une intervention correctrice de l'Etat.

2.2.3.1. Les propriétés de la technologie en tant qu'information codifiée et bien public

En premier lieu, et même si ARROW ne l'explicite pas dans son article, sa conception de la technologie correspond à une information *codifiée*, c'est-à-dire une information analysée comme une *« (…) connaissance réduite et convertie en messages pouvant être facilement décrits, reproduits et diffusés entre les agents »* (FORAY [1995 p.121]). Les caractéristiques d'une connaissance technologique codifiée (ou articulée) sont celles d'une marchandise pouvant être précisément spécifiée en termes de contenu et de propriété intellectuelle. Comme nous l'avons précédemment évoqué, la production de connaissances codifiées suppose de supporter préalablement des coûts fixes indivisibles importants, mais elle offre ensuite l'avantage aux agents d'effectuer un certain nombre d'opérations (de transfert, de stockage et de reproduction de l'information) à un coût marginal très faible (voire nul), sans perte de leur utilité intrinsèque (COWAN et FORAY [1998]).

Ces caractéristiques concourent à conférer à l'information technologique produite par les activités de R&D les propriétés classiques d'un bien public[93] (ROMER [1990]).

En effet, l'information est un bien *non rival*[94]. En tant que ressource, la connaissance peut être caractérisée par son inépuisabilité, car elle ne se détruit pas dans l'usage. L'indivisibilité dans l'usage fait que l'utilisation d'une connaissance existante par un agent additionnel n'impose pas la production d'un exemplaire supplémentaire. Les agents économiques n'étant pas rivaux pour sa consommation, il n'y a pas de valeur sociale à produire une même connaissance plusieurs fois (DASGUPTA [1987]). La

[93] Nous argumenterons dans le sens d'une information qui sous-tend l'innovation apparentée à un bien public, même si des nuances pourraient être apportées pour la considérer comme un bien quasi-public. En effet, si une personne conçoit un meilleur procédé pour fabriquer un produit, ce procédé peut être employé dans toute usine fabriquant le même produit sans que cela nuise de façon matérielle à l'utilisation du procédé dans l'usine de l'innovateur. Cela est vrai jusqu'à ce que l'utilisation accrue de l'innovation commence à exercer une pression à la hausse sur le coût de tout intrant spécial requis par le procédé, par exemple les travailleurs qualifiés ayant la formation nécessaire pour faire fonctionner l'équipement nouveau. Ces caractéristiques de bien quasi-public constituent en quelque sorte la première dimension sous laquelle l'information se distingue d'un bien ordinaire.

[94] Cette caractéristique est propre au bien lui même et ne concerne pas ses règles d'usage ou le système légal en vigueur.

propriété de non rivalité possède deux dimensions (FORAY [2000]). Premièrement, un agent peut recourir à une connaissance une infinité de fois sans supporter de coûts pour reproduire une action. Deuxièmement, une infinité d'agents peut utiliser une même connaissance sans que personne n'en soit privé, et le fait même de transmettre une connaissance multiplie indéfiniment ses détenteurs. Les conséquences de la non rivalité sur les coûts et les prix sont importantes. Puisque le coût marginal d'usage est nul, une économie ne peut pas fixer ses prix sur la règle des coûts marginaux car l'usage d'une connaissance existante serait alors gratuit et il deviendrait impossible de compenser financièrement le fait qu'une connaissance soit utilisée un grand nombre de fois.

L'information technologique est en même temps un bien *fluide*, portable et *non excluable*, c'est-à-dire qu'il est difficile de rendre ce bien exclusif, de le contrôler de façon privée. Un agent qui l'utilise ne peut pas empêcher les autres agents de l'utiliser également. Lorsqu'une firme conduit des activités de R&D, une partie des connaissances issues de ses recherches se diffuse[95] *via* des effets de « débordements technologiques » (*technological spillovers*) et va accroître un « *world stock of knowledge* » (COWAN *et al.* [2000]). Les autres agents (les firmes concurrentes, les utilisateurs, les consommateurs) peuvent puiser dans ce stock gratuitement, ou en supportant un coût minimum de reproduction qui sera dans tous les cas largement inférieur aux coûts initiaux de l'innovation[96]. Il est donc supposé à la fois que les agents émetteurs n'ont pas de capacité d'émission des connaissances, les débordements technologiques sont des « fuites » non contrôlées par les firmes, et que les agents récepteurs disposent d'une parfaite capacité d'absorption des connaissances.

Dans une étude de référence LEVIN *et al.* [1987] ont avancé que les principaux moyens utilisés pour copier des nouveaux produits sont, par ordre d'efficacité, les travaux de R&D entrepris de façon indépendante, les activités de rétroingénierie[97], l'embauche des employés du département R&D de l'entreprise innovatrice, les

[95] Le producteur de connaissances est « solitaire », en ce sens qu'il fait face au marché, c'est-à-dire une infinité d'agents anonymes. De ce fait il n'y a pas de négociation bilatérale directe ni d'échange quelconque entre les agents en dehors des structures du marché.

[96] Le coût en R&D de reproduction d'un nouveau produit breveté se situe généralement entre la moitié et les trois quarts du coût en R&D supporté par l'innovateur.

[97] On entend par activités de rétroingénierie les pratiques de « démontage » des technologies (le *« reverse engineering »*) dans le but de les copier.

publications ou les rencontres techniques, la fabrication sous licence, la divulgation de brevets et les conversations avec les employés de l'entreprise innovatrice. Les moyens qui peuvent être utilisés pour reproduire des innovations au niveau des procédés sont, par ordre d'efficacité, des travaux de R&D effectués de façon autonome, la fabrication sous licence, les publications ou les rencontres techniques, la rétroingénierie, l'embauche d'employés en R&D de l'entreprise innovatrice, la divulgation de brevets, des conversations avec les employés de l'entreprise innovatrice. De nombreuses études empiriques ont mis en évidence, selon les secteurs industriels, l'importance de ces *spillovers* technologiques (NADIRI [1993], ADAMS et JAFFE [1996]). En particulier, MANSFIELD *et al.* [1981] ont montré, dans une étude portant sur 48 innovations de produits aux Etats-Unis, que 60% des innovations brevetées étaient imitées dans les quatre années suivant la mise sur le marché. MANSFIELD [1985] a montré ensuite, pour un échantillon de 100 firmes américaines, que les informations pouvaient être connues par les concurrents dans une période comprise entre 12 et 18 mois pour les décisions de R&D d'une firme, et en moins d'un an pour les innovations de produits ou de procédés.

2.2.3.2. La R&D induit des externalités technologiques spécifiques

Les activités de R&D, et particulièrement les résultats de la recherche fondamentale[98] comme le souligne ARROW [1962a], sont donc à l'origine de *spillovers*, plus précisément d'externalités[99].

Les effets externes désignent les relations entre les agents qui ne passent pas par des mécanismes des prix. Ils correspondent aux externalités que VINER [1931] et

[98] Par opposition à la recherche appliquée ou aux activités de développement, les résultats de la recherche fondamentale n'ont pas d'objectif précis, ce qui facilite d'autant plus leur diffusion.

[99] La notion d'économie externe est née avec MARSHALL [1925]. Elle constitue la source historique de la théorie des externalités. Dans l'analyse des facteurs des rendements croissants d'une firme, MARSHALL a isolé les « économies internes » et les « économies externes ». Les premières sont inhérentes à la taille de la firme et à son organisation interne, alors que les secondes dépendent de son environnement industriel et de la localisation de la firme dans un bassin industriel. PIGOU [1920] a défini ensuite les déséconomies externes d'une économie de concurrence en affectant d'un signe négatif les économies externes définies par MARSHALL. Cependant, l'externalité ne signifie plus externe à la firme, mais externe à l'échange marchand.

SCITOVSKY [1954] ont qualifiées de « technologiques[100] ». L'externalité résulte de l'activité d'un agent ou d'un groupe d'agents (les « producteurs ») et va affecter, positivement (ou négativement), les fonctions d'utilité ou de production d'un agent ou d'un groupe agents (les « récepteurs »). C'est un type d'échec du marché survenant lorsque les coûts et bénéfices privés d'une production donnée diffèrent des coûts et bénéfices pour la société, sans qu'il y ait compensation par le marché. Selon les deux théorèmes fondamentaux de l'Economie du bien-être[101], cette différence va avoir comme conséquence que les mécanismes décentralisés d'allocation par le marché vont conduire à des situations d'équilibre social sous-optimales au sens de PARETO.

Dans le cas des activités de R&D, un innovateur va émettre des externalités positives[102]. Elles vont se traduire par un impact «tombé du ciel» des dépenses de R&D d'une firme sur les coûts, le profit ou la probabilité d'innover d'autres firmes sans qu'aucun agent ne contrôle quoi que soit. Celles-ci correspondent à des externalités technologiques engendrées non intentionnellement par la production d'un bien faisant l'objet d'un calcul économique rationnel.

Toutefois, il convient de remarquer que, à la différence des autres types d'externalités, la spécificité des externalités de R&D est qu'elles ne sont pas un « produit joint » d'autres activités de production ou de consommation (BACH et LHUILLERY [1999]). En effet, le résultat de R&D qui se diffuse aux autres agents récepteurs est le même bien que celui produit volontairement par l'innovateur. Par contre, comme pour les externalités classiques de production ou de consommation, c'est bien involontairement que ce bien va profiter à d'autres agents. L'intensité des

---

[100] Nous excluons ici les répercussions qui se réalisent par l'intermédiaire du système de prix et qui donc sont prises en compte par le système de prix. Ces externalités non technologiques, liées à des prix relèvent des externalités pécuniaires (BUCHANAN [1969]). Mais puisque les répercussions des comportements des agents se réalisent par les prix, on ne peut pas parler d'effets externes au marché. Pour cela, il apparaît préférable de limiter la notion d'externalité aux externalités non pécuniaires, technologiques, ayant un impact sur des variables réelles.

[101] Le premier théorème de l'Economie du bien-être postule qu'en présence d'un système complet de marchés et en l'absence d'externalités, si les fonctions d'utilité sont strictement croissantes, tout équilibre concurrentiel est un optimum au sens de PARETO. Le deuxième théorème affirme que si les fonctions d'utilité sont continues, croissantes et quasi-concaves et si les ensembles de consommation et les ensembles de production sont fermés et convexes, alors tout optimum au sens de PARETO est décentralisable en équilibre concurrentiel.

[102] Si l'on se place du point de vue du récepteur.

externalités de R&D est totalement exogène aux comportements des agents. On relève donc ici une vision « passive » des externalités de recherche.

Compte tenu des externalités positives qu'il émet, un agent innovateur privé va recevoir une rétribution trop faible par rapport aux bénéfices résultants. La principale conclusion analytique ici est que cette appropriation insuffisante des résultats des activités de R&D va conduire à une allocation insuffisante et inefficiente des ressources affectées à ces activités et à l'existence d'un biais entre leur rendement (ou rentabilité) privé et leur rendement social optimal[103]. De manière plus précise, le rendement qui revient aux seuls innovateurs est beaucoup plus faible que le rendement social[104].

A ce stade de la présentation des fondements de l'analyse néo-classique de l'innovation, on peut souligner que les incitations des firmes à innover vers des technologies environnementales vont être freinées par les problèmes classiques d'incertitude, d'indivisibilité et d'inappropriabilité des activités de R&D, puisque sur ce point elles ne diffèrent pas des innovations « classiques » de produits ou de procédés.

2.2.4. La justification des interventions de l'Etat en matière de R&D

Ayant mis en évidence l'incapacité du marché à jouer pleinement son rôle d'incitation à l'innovation, ARROW conclut son analyse en précisant que « *(…) for optimal allocation for invention, it would be necessary for the government or some other agency not governed by profit-and-loss criteria to finance research and invention* [105] » (*ibid.*, p. 118). Il remarque que dans les faits cela a toujours été le cas puisque la plus grosse partie de la recherche fondamentale est supportée en dehors du système industriel par l'Etat et ses organismes affiliés (universités et centres de recherche publics). Cependant, si l'intervention nécessaire de l'Etat pour compenser la sous-allocation des ressources affectées aux activités de R&D par les firmes privées peut

[103] Ce développement analytique classique est issu de l'analyse générale de PIGOU [1920] en terme d'écart entre rendement privé et rendement social.

[104] MOHNEN [1996] estime que le rendement social correspond environ au double du rendement privé.

[105] *« (…) dans le but d'obtenir une allocation optimale pour l'invention, il serait nécessaire que le gouvernement ou quelque autre agence à but non lucratif prenne en charge le financement de la recherche et des inventions. »*

entraîner certains biais (comme des mauvais choix contractuels ou une évaluation approximative des risques), l'objectif théorique sous-entendu ici est d'une part de définir des budgets publics proches de l'optimum en faveur de la recherche fondamentale, et d'autre part de protéger la recherche appliquée au sein des firmes par des droits de propriété forts afin d'éviter toute imitation frauduleuse dans le domaine privé.

Ces objectifs permettent à ARROW de légitimer les politiques et les grands programmes publics technologiques, même si se pose par la suite le problème de leur efficacité et de leur évaluation, notamment en termes de retombées technologiques, c'est-à-dire d'externalités positives.

Deux grandes formes institutionnelles, correspondant aux deux grandes formes d'organisation de la production et de la diffusion des connaissances dans les domaines scientifique et technologique, apparaissent à travers le raisonnement d'ARROW. Il justifie le clivage entre, d'une part, la recherche fondamentale, le monde des «savoirs ouverts », menée dans les institutions publiques de «science ouverte », et, d'autre part, la recherche appliquée et les activités de développement, le monde des « savoirs fermés », effectuées par les entreprises (DASGUPTA et DAVID [1994], FORAY [2000]). Ces deux secteurs sous-tendent des logiques de comportements différentes, car leurs objectifs ne sont pas les mêmes[106]. Dans le cadre de l'organisation publique de la recherche, la recherche fondamentale est «ouverte ». Elle est caractérisée par la «règle de divulgation » complète des connaissances produites c'est-à-dire qu'elle est reconnue et validée par les pairs, membres d'une même communauté scientifique (FORAY [1995]). En diminuant le risque que la connaissance produite soit détenue par des groupes ne possédant pas les ressources requises pour l'exploiter, cette règle de divulgation améliore l'efficacité de l'organisation de la recherche. Toutefois, l'exigence de divulgation ne signifie pas qu'il y a un renoncement à toute forme du droit de propriété. La «règle de priorité » accorde la propriété à celui qui publie les résultats de ses recherches, mais en distinguant la propriété et la possession, elle n'empêche

[106] Notre raisonnement s'appuie ici sur les fondements de la distinction recherche publique/recherche privée. Dans la réalité le flou de la distinction entre recherche fondamentale (science) et recherche appliquée (technologie) entraîne une difficulté pour tracer la frontière entre ce que l'Etat et les entreprises doivent faire. Ces dernières décennies ont vu s'accentuer cette difficulté, notamment dans les secteurs de l'informatique ou des biotechnologies.

personne d'exploiter les connaissances nouvelles. La priorité établit les conditions d'une concurrence entre agents économiques et permet de déterminer les paiements[107] en fonction des résultats et pas seulement en fonction de l'effort de recherche.

Dans le cadre de l'institution de la recherche privée, les agents, à partir des situations de monopoles temporaires que confère l'innovation, vont chercher à maximiser les rentes qui vont résulter d'une innovation. La valeur économique des connaissances produites peut être appropriée par les organisations qui les financent. L'organisation consiste à créer un marché fondé sur l'attribution des droits de propriété intellectuelle. Ces derniers permettent aux agents innovateurs de tirer des rentes économiques de la connaissance produite, soit en la gardant secrète et en l'utilisant dans des activités productives, soit en la convertissant dans des actifs protégés par la loi (brevets, droits d'auteurs).

2.3. Les développements à partir de l'analyse d'ARROW : les comportements stratégiques pour innover

L'analyse d'ARROW a ouvert la voie à de multiples directions d'analyses micro-économiques sur les comportements stratégiques des firmes en matière d'innovation, la technologie restant toujours identifiée à de l'information. Sur cette base, ces développements[108] s'attachent à analyser des situations de compétitions technologiques en mettant particulièrement l'accent sur la relation entre les activités de R&D et les structures de marché. Ces modèles ont pour but d'examiner le rôle joué par la technologie dans les stratégies de marché. Le raisonnement de départ qui leur est commun peut être formulé de la manière suivante : lorsque plusieurs firmes lancent en même temps des programmes de R&D sur un même domaine technologique leurs décisions sont supposées interdépendantes, c'est-à-dire qu'elles sont fonction de ce

[107] La structure des paiements est basée sur la notion de réputation collective établie grâce aux publications.

[108] Comme le souligne FORAY [1992], on peut considérer que l'article d'ARROW [1962a] a donné lieu à deux prolongements théoriques distincts. Le premier, se focalisant sur les liens entre l'innovation et les structures de marché, occupe une place prépondérante, laissant au second plan le celui s'intéressant aux problèmes d'incitation dans le domaine de l'économie de l'information et à ses implications en matière de politique de la recherche.

qu'elles croient être l'avancement des travaux de leurs concurrents ou de leurs partenaires, des décisions qu'ils prennent[109] et de leurs réactions à leurs propres décisions[110]. Chaque firme choisit alors une stratégie de « meilleure réponse » aux projets établis par ses concurrents. La confrontation de l'ensemble des meilleures réponses permet de calculer l'équilibre[111] du jeu non coopératif de R&D, c'est-à-dire la détermination des stratégies d'innovation arrêtées par les entreprises.

Nous abordons dans les points suivants les hypothèses et les résultats des modèles déterministes d'enchères et des modèles stochastiques de course au brevet, ainsi que les principales questions soulevées par l'analyse du lien structure de marché-innovation.

2.3.1. La compétition technologique « continue » : les modèles déterministes d'enchères

Le modèle de DASGUPTA et STIGLITZ [1980][112] a ouvert une première série de modèles déterministes d'enchères qui s'inscrivent dans des situations de compétition technologique « continue », c'est-à-dire dans des situations de concurrence pour l'obtention d'une innovation dans un cadre atemporel en univers certain. Le cadre choisi est celui d'une industrie où plusieurs firmes identiques et possédant un même taux d'actualisation cherchent à réaliser une innovation de procédé, réductrice de coûts et imparfaitement appropriable, dont la valeur est connue de tous les participants. La stratégie de chaque firme consiste à formuler «aujourd'hui » sa disponibilité à investir dans une recherche sous la forme d'une enchère exprimant le montant de ressources financières qu'elle est prête à engager pour l'obtention d'une innovation ultérieure. Seule la firme qui exprime l'enchère la plus haute s'engage dans la recherche en réalisant l'investissement correspondant.

---

[109] L'hypothèse est faite qu'elles sont observables.

[110] L'hypothèse est faite qu'elles sont connues.

[111] Une fois l'équilibre caractérisé, il est procédé généralement à deux types d'analyses : une analyse de sensibilité en statique comparative qui permet de voir comment sont modifiés les programmes de recherche lorsque un paramètre du modèle change (par exemple l'entrée dans le jeu d'une nouvelle firme), et un test d'optimalité qui permet de déterminer si les efforts de R&D réalisés par les firmes sont excessifs ou insuffisants par rapport aux valeurs correspondant à l'optimum collectif.

[112] Repris ensuite par DASGUPTA [1986].

La date à laquelle la firme qui a gagné l'appel d'offres parvient à l'innovation est donnée par une fonction déterministe, décroissante et convexe du montant de son investissement, de telle manière que la firme qui obtient l'innovation en premier est celle dont l'enchère est la plus élevée[113]. Les résultats du modèle, à l'issue du calcul d'un équilibre symétrique de NASH-COURNOT, font apparaître que le montant de l'enchère gagnante correspond au montant qui annule la valeur actualisée de l'investissement. Au moins deux firmes enchérissent au niveau de cette valeur et, au final, une seule firme, choisie au hasard parmi les firmes ayant proposé l'enchère gagnante, réalise l'investissement correspondant.

Le modèle montre d'abord que la concurrence potentielle pour l'obtention d'une innovation, selon les hypothèses définies[114], conduit à une dissipation de la rente puisque le profit de la firme gagnante est nul, et les firmes qui ont proposé une enchère pour un montant inférieur n'investissent pas dans l'activité de recherche. Ensuite, selon les résultats obtenus on peut remarquer que si les firmes participantes à « l'appel d'offre » avaient créé une *joint-venture* pour coordonner leurs actions à la manière d'un monopole, le montant de l'enchère optimale aurait été inférieur à celui obtenu dans la situation de concurrence. Ainsi le modèle abouti à la conclusion que la concurrence dans le but de réaliser une innovation entraîne un investissement de recherche supérieur à celui que réaliserait une firme seule, compte tenu de l'absence de coordination que la concurrence implique. En outre, la situation de concurrence incite la firme gagnante à augmenter sa dépense jusqu'au niveau qui épuise la valeur actualisée des gains futurs. L'ensemble de ces résultats vient soutenir l'hypothèse *schumpétérienne* sur la

[113] Une façon d'interpréter ce modèle est de raisonner comme si les firmes s'adressaient à un laboratoire de recherche extérieur pour lui passer commande d'une recherche. Le laboratoire fournit alors le résultat de ses travaux à la firme dont la disponibilité à payer est la plus élevée et à une date qui est d'autant plus avancée que le montant payé est élevé.

[114] DASGUPTA et STIGLITZ s'appuient sur un ensemble d'hypothèses élaborées à partir de faits stylisés industriels. Ils considèrent un oligopole symétrique dans lequel les firmes, qui ont les mêmes opportunités technologiques, engagent simultanément des dépenses en R&D qui se traduisent par des innovations de procédés faisant baisser les coûts de production. Celles-ci ne sont pas appropriables par des brevets. Ils supposent qu'il n'y a pas des *spillovers* technologiques et qu'il existe un niveau optimal de dépenses en R&D pour lequel le bien-être social est maximum. Cette situation optimale est atteinte grâce à l'intervention des pouvoirs publics qui soutiennent les dépenses en R&D financées par des prélèvements fiscaux.

supériorité des formes oligopolistiques de concurrence[115], et infirme en même temps les résultats d'ARROW [1962a].

2.3.2. Les modèles stochastiques de course au brevet

Dans ce type de modèles l'expression de *course au brevet* est utilisée dans un sens qui est plus proche de la notion de *compétition* que de celle de *concurrence.* Les firmes participent à la course à travers leurs efforts de R&D. Elles vont être incitées par une perspective de profit et ici « *la comparaison* (s'établira) *sur l'ordre d'arrivée plutôt que sur les performances* » (GUESNERIE et TIROLE [1985, p.858]). La firme innovante qui dépose la première un brevet gagne une prime lui assurant un monopole d'exploitation pendant la durée légale de protection de son invention. Les autres firmes participantes à la compétition seront considérées comme « perdantes », dans ce sens qu'elles ne recevront aucune « récompense ».

Les modèles stochastiques de course au brevet considèrent donc que la date d'obtention de l'innovation n'est plus déterministe. A la différence de la catégorie de modèles précédents, dans la course au brevet tous les participants réalisent un investissement de R&D, même les « perdants ». Seule, la firme qui fait la découverte en premier s'approprie la valeur de l'innovation. Le nombre de firmes qui participent à la course permet de mesurer l'intensité de la concurrence pour l'obtention de l'innovation. Les modèles de base de LOURY [1979] et de LEE et WILDE [1980] traitent de manière différente les dépenses de R&D. LOURY [*ibid.*] considère l'investissement en recherche comme une dépense fixe[116], réalisée une fois pour toutes par toutes les firmes au début de la course. Le modèle établit d'abord, ce qui constitue sa particularité, que l'investissement individuel décroît avec le nombre de participants à la course, même si l'investissement agrégé est lui croissant. Ensuite, la concurrence pour l'innovation joue en faveur de l'investissement agrégé en recherche, et « rapproche » de la sorte la date espérée de la découverte. Cependant, elle conduit à un niveau total de dépenses excessif par rapport au niveau optimal d'un point de vue collectif.

[115] Les auteurs établissent une relation linéaire positive entre le degré de concentration de l'industrie et l'intensité des activités de recherche.

[116] Celle-ci dépend par exemple de la construction d'un laboratoire de recherche, et de sa taille.

LEE et WILDE [*ibid.*] ont reformulé le problème de manière plus réaliste en retenant l'hypothèse qu'un flux continu de dépenses de R&D[117] intervient tant que la découverte n'a pas été réalisée. Les résultats de LOURY [*ibid.*] sont confirmés, à l'exception que lorsque l'investissement en R&D est considéré comme un flux constant, le niveau d'investissement individuel augmente avec le nombre de participants à la course. Ces résultats montrent que la concurrence pour innover augmente l'investissement en R&D, mais ici à la fois au niveau individuel et au niveau agrégé.

2.3.3. L'innovation et la concurrence sur le marché des produits

Quelle est la structure de marché, la concurrence ou le monopole, qui favorise le plus l'innovation sur le marché des produits ? En réponse à cette question SCHUMPETER [1942] avait clairement avancé que pour lui le monopole constituait la structure la plus incitative. La « conjecture *schumpétérienne* » formulait, en plus de l'avantage déjà évoqué que possèdent les grandes entreprises en matière de diversification des risques, que les monopoles[118] ont, pour financer les investissements de R&D nécessaires à l'innovation, une position supérieure aux entreprises de plus petite taille agissant sur un marché concurrentiel.

2.3.3.1. L'effet de remplacement

Les conclusions du modèle d'ARROW [1962a] prennent le contre-pied de la position de SCHUMPETER. ARROW montre que, dans le cas d'une innovation de procédé consistant à abaisser le coût marginal de production, l'incitation à innover d'un monopole est systématiquement plus faible que celle d'une firme en situation de

[117] Les dépenses sont ici liées essentiellement aux rémunérations des chercheurs.

[118] Nous pouvons rappeler que dans la conjecture *schumpétérienne* il ne s'agit pas du monopole *ex post*, c'est-à-dire du monopole résultant d'une innovation protégée par un brevet, mais du monopole *ex ante*, c'est-à-dire de la structure de marché prévalant avant la découverte. SCHUMPETER ne faisait pas véritablement de nuance entre la taille des firmes et la structure de marché, c'est-à-dire entre la grande entreprise et le monopole, et entre la petite ou moyenne entreprise et une structure concurrentielle.

concurrence parfaite[119]. Ce résultat, connu sous le nom de *l'effet de remplacement*, signifie que lorsqu'un monopole innove il perçoit un différentiel de profits plus faible que celui d'une entreprise en concurrence parfaite (GUESNERIE et TIROLE [1985]). En effet, en innovant, un monopole va avoir tendance à « se reposer sur ses lauriers » (TIROLE [1995]), c'est-à-dire à sous investir, puisqu'il va passer d'un profit de monopole avant l'innovation à un profit de monopole plus élevé après l'innovation, alors qu'une firme en situation de concurrence parfaite obtiendra un différentiel de profit plus élevé en passant d'un profit nul avant l'innovation à un profit de monopole après l'innovation.

2.3.3.2. L'effet d'efficacité

Dans un modèle déterministe d'enchères, GILBERT et NEWBERY [1982] considèrent l'incitation à innover d'un monopole dont la position est soumise à la menace d'un entrant potentiel. Réfutant l'analyse *arrowienne* de « l'immobilité » du monopole, ils s'intéressent en particulier à la question de la « persistance » du monopole. Les coûts engendrés par la concurrence pour s'approprier le brevet viennent « dissiper » la rente créée par celui-ci. Le profit du monopole est alors supérieur ou au moins égal à la somme des profits de duopoleurs qui ne coopèrent pas, ce qui révèle l'existence d'un *effet d'efficacité*. L'incitation du monopole à rester un monopole est supérieure à l'incitation de l'entrant à devenir un duopoleur. Pour autant le monopole n'innovera pas systématiquement le premier. Compte tenu de l'effet de remplacement, le monopole installé, à la différence de l'entrant, reçoit un profit avant d'innover, ce qui peut freiner son intention d'innover. Par ailleurs, l'effet d'efficience peut le conduire à acquérir un brevet dans le seul but de bloquer un entrant et d'éviter la concurrence, c'est le cas des brevets « dormants ».

[119] ARROW [1962a] précise que le seul argument que l'on peut avancer pour que le monopole puisse créer une incitation à inventer plus forte est que l'appropriabilité de l'invention devrait être plus grande dans les situations de monopole que dans celles de concurrence.

2.3.3.3. La question de la persistance du monopole

La question de la persistance du monopole a été réenvisagée par REINGANUM [1989] dans le cadre d'un modèle stochastique de course au brevet. Elle démontre qu'à l'équilibre de NASH du jeu étudié, si la firme qui réalise la première l'innovation parvient à capter une part de marché suffisamment importante, la disponibilité à investir de la firme installée est inférieure à celle de son concurrent potentiel. Dans ce cas la persistance du monopole n'est plus systématique et l'on aboutit à un schéma d'alternance. Ce résultat peut être explicité en prenant l'hypothèse d'une innovation drastique conduisant le premier innovateur à capturer tout le marché après l'innovation en pratiquant un prix de monopole. Par définition, la date de réalisation d'une innovation, dans le cadre d'un modèle stochastique, est incertaine. Ainsi, la durée de la période pendant laquelle la firme installée perçoit son profit de monopole est une variable aléatoire qui est d'autant plus courte que le montant investi dans les activités de recherche est important. La propriété d'alternance exprime ainsi le fait que la firme installée est moins incitée que le concurrent potentiel à réduire la durée de cette période.

* * *

Tout l'intérêt de l'analyse fondatrice d'ARROW [1962a] a été de montrer que les incitations des firmes privées à engager des ressources pour innover sont dans tous les cas insuffisantes par rapport à l'optimum social compte tenu des problèmes d'incertitude, d'indivisibilité et d'appropriabilité qui caractérisent les activités de R&D. La nécessité d'une recherche publique se trouve alors justifiée. Les analyses qui se sont développées depuis s'appuient sur la théorie des jeux non-coopératifs et se concentrent sur les comportements stratégiques des firmes innovantes. Nous relevons en premier lieu que l'ensemble des modèles de concurrence pour l'innovation font apparaître un niveau d'investissement excessif par rapport à ce qu'il serait collectivement optimal de réaliser. Deux raisons permettent de l'expliquer : (i) chaque participant cherche à gagner la course, alors que d'un point de vue collectif ce qui importe est que l'innovation soit réalisée quel qu'en soit l'auteur ; (ii) si un nombre trop important de firmes participent à la course au brevet pour une même innovation, la conséquence est une duplication des efforts de R&D et donc un gaspillage.

On peut souligner ensuite que ces analyses adoptent l'hypothèse simplificatrice, mais assez irréaliste, d'un flux constant de dépenses de R&D, ce qui revient à considérer que la probabilité d'innovation ne varie pas selon que l'on est proche ou non de la réussite, selon l'importance des dépenses antérieures ou selon le degré d'avancement des recherches des firmes concurrentes. Ces modèles sont donc considérés comme «sans mémoire[120] », puisque l'expérience passée dans la recherche n'y est pas prise en compte. D'autres travaux ont toutefois introduit des «effets de mémoire » dans les courses au brevet. La probabilité pour une firme de déposer un brevet dépend alors de son investissement immédiat, mais également des dépenses de R&D réalisées jusqu'à la date *t* représentant un stock de capital investi (FUDENBERG *et al.* [1983], HARRIS et VICKERS [1985]) [121].

Les modèles de compétition technologique, bien qu'employant des outils de formalisation puissants, restent cependant fondamentalement statiques. Leur objectif est d'étudier comment l'adoption de technologies, telles qu'elles résultent d'actions stratégiques définies par l'intensité des dépenses de R&D, contribuent à définir les structures de marché. Le processus d'acquisition d'une technologie est considéré comme instantané puisqu'il est entièrement inclus dans les dépenses de R&D engagées par chaque firme. L'accent est mis sur les propriétés des capacités productives installées à chaque moment, et les contraintes spécifiques du processus d'innovation par lequel elles sont mises en œuvre ne sont pas prises en compte. Les activités d'innovation sont établies comme si la recherche d'informations ou la R&D étaient indépendantes de l'activité de production et qu'une connaissance nouvelle était théoriquement assimilable sans limite. Ce cadre théorique ne nous apparaît donc pas satisfaisant quant à notre problématique puisque nous souhaitons analyser le processus d'innovation-création des TER dans un contexte économique et institutionnel dynamique.

---

[120] GUESNERIE et TIROLE [1985, p.858-868] établissent une classification des modèles de compétitions technologiques à l'aide d'un « *vocabulaire suggestif* ». Ils distinguent et présentent successivement : les modèles sans mémoire avec l'innovation comme « *un ruban de manège* » (ou comme « *un coup au but* ») ; les différents modèles dans lesquels l'expérience compte : l'innovation comme « *une course avec ligne d'arrivée fixe* », l'innovation comme « *une course au trésor* », l'innovation comme « *une course au trésor par étapes* ». Ils rapprochent les modèles sans mémoire et l'innovation comme «*un ruban de manège* » : la probabilité d'obtenir le ruban (le brevet) est fonction de l'effort réalisé à un moment donné (les dépenses de R&D de la firme) et de l'aléa de sa position.

[121] Voir également le *survey* réalisé par REINGANUM [1989].

Section 3. Des mécanismes de correction des externalités pointés sur les « *market failures* »

En poursuivant la logique de l'analyse en termes d'externalités technologiques, nous avons vu à travers les hypothèses et les résultats de l'approche néoclassique de l'innovation que les mécanismes du marché seuls conduisent à des inefficacités dans le processus d'allocation des ressources. Dans ce cadre, il convient maintenant de définir et de situer d'abord d'un point de vue théorique les politiques publiques d'innovation, puis de voir plus en détail les mesures destinées à encourager l'innovation qui sont proposées ainsi que leur évaluation.

Nous distinguerons successivement les mesures *ex ante*, destinées à modifier les incitations avant l'engagement dans le processus d'innovation, des mesures *ex post*, destinées à intervenir une fois l'innovation accomplie.

3.1. Quelle place pour les politiques d'innovation et industrielle dans la théorie standard ?

Après la seconde guerre mondiale, les politiques technologiques se sont concentrées sur le soutien au développement d'une infrastructure publique de recherche fondamentale et sur le développement de la recherche militaire par le biais des commandes publiques[122]. Depuis, la globalisation, les difficultés dans la gestion des finances publiques et les questions quant au rôle de l'Etat dans l'économie ont entraîné de profonds bouleversements. Le recours aux instruments « traditionnels[123] » directs et ciblés, a ainsi été progressivement restreint par la libéralisation des économies, en même temps que leur mise en œuvre faisait apparaître des défauts d'efficacité du fait d'effets pervers (manque d'incitation, manque de lisibilité pour les pouvoirs publics). Ces mesures ont été remplacées par d'autres, indirectes et plus génériques, souvent qualifiées de « politiques d'environnement[124] ». Dans ce type de politiques, plus

[122] Cf. Chapitre 1.

[123] Comme les subventions, les prises de contrôle, les barrières protectionnistes sur des secteurs spécifiques, les commandes publiques…

[124] Elles comprennent des mesures qui visent à agir sur les coûts, sur les débouchés *via* des politiques indirectes (fiscalité, aménagement du territoire…).

libérales, l'Etat n'agit que sur certaines variables pouvant influencer les décisions des firmes et laisse le marché les inciter à être plus efficaces et performantes.

Désormais, un consensus s'est établi sur le rôle moteur de la technologie dans la compétitivité des nations et, la politique technologique, à l'origine de la production de nouvelles connaissances, et la politique industrielle, créant des produits nouveaux à partir des innovations, tendent à converger de plus en plus. Cependant, qu'il s'agisse d'octroyer des transferts, financiers ou non financiers, pour favoriser l'innovation, de garantir l'accès à certains marchés ou de mettre en place des mesures de protection de marchés, la définition de ces politiques ne va pas sans soulever de difficultés. Du côté empirique, l'observation de l'histoire économique montre une multiplication des pratiques qui relèvent des politiques d'innovation et industrielle et qui le plus souvent revendiquent leur attachement à elle. Afin de cerner la variété des caractérisations envisageables, CORIAT [2000, p. 302] propose un « faisceau » de quatre séries de considérations pour identifier les pratiques qui relèvent de la politique industrielle :

- *« un objet intentionnel : accroître la compétitivité d'un groupe de firmes ou d'une industrie ;*
- *un centre d'initiative qui doit être de nature 'public' et disposer pour son action d'une panoplie de moyens ;*
- *un territoire d'application : qu'il s'agisse d'une délimitation locale, nationale ou régionale (…) ;*
- *un* modus operandi *enfin : il tient finalement (…) en un ensemble de formes – variées dans leurs expressions – de transferts de ressources. »*

Ce dernier point est essentiel pour observer qu'une mesure de politique industrielle au sens large possède ici la particularité de modifier les allocations de marché telles qu'elles s'opèrent dans un état donné de leur organisation.

Cependant, du côté de la théorie économique, comme le remarquent COHEN et LORENZI [2000], les mesures publiques de soutien à l'innovation et plus largement la politique industrielle n'ont jamais eu une place bien délimitée. De nombreux débats se

sont développés quant à la légitimité de l'action publique, mais jamais un *corpus* théorique spécifique ne s'est constitué[125].

L'Economie du bien-être exclut *a priori* l'intervention de l'Etat, pour cause de moindre efficacité, et n'admet la nécessité d'une réglementation que dans les situations de *« market failures »*, c'est-à-dire lorsque les ajustements spontanés entre l'optimum privé et l'optimum public ne se font pas ou nécessitent un délai d'ajustement trop long. La théorie standard ne légitime ainsi l'intervention publique que dans trois cas de figure principaux. Les deux premiers cas, que nous avons développés, se produisent en présence d'externalités et de biens publics qui, dans un cadre de régulation par le marché, engendrent des situations sous-optimales comme l'a illustré ARROW [1962] pour les activités de R&D. Le troisième cas de défaillance du marché provient de la présence d'économies d'échelle et des situations de concurrence imparfaite qu'elles entraînent. Les économies internes d'échelle dépendent de la taille des entreprises. Elles se manifestent lorsque le coût moyen unitaire de production d'une firme décroît à mesure que sa production augmente, c'est-à-dire lorsque apparaissent des rendements d'échelle croissants. Les grandes vagues technologiques contemporaines présentent la caractéristique d'être fortement appuyées sur les activités de R&D. Les secteurs types concernés (semi-conducteurs, aéronautique, pétrochimie…) en plus des rendements croissants associés aux coûts initiaux en R&D sont aussi des secteurs oligopolistiques « assis » sur des rentes technologiques. Les économies internes d'échelle poussent à un accroissement de la taille des firmes et conduisent à des positions dominantes des acteurs présents sur le marché (oligopolistique ou monopolistique)[126] ayant la capacité d'influencer les prix.

---

[125] Voir le Numéro Spécial de la Revue d'Economie Industrielle [1995] consacré au *« Renouveau des politiques industrielles dans le contexte des économies globales »*.

[126] Si le coût moyen est décroissant avec le niveau de production, on peut démontrer que le coût marginal est inférieur au coût moyen pour tout niveau de production. Le comportement de la firme qui maximise son profit est d'établir sa production à un niveau tel que le revenu marginal égalise le coût marginal. Mais en concurrence parfaite le prix fixé par le marché est égal au revenu marginal. Comme à l'optimum celui-ci est égal au coût marginal, lui-même inférieur au coût moyen, le prix du marché se fixe en dessous du coût moyen. Les firmes accuseraient donc des pertes et devraient disparaître. Ainsi le régime de concurrence parfaite est incompatible avec une technologie de production caractérisée par des économies d'échelle.

Dans le cadre de la théorie standard de très nombreuses définitions[127] de la politique technologique et de la politique industrielle sont avancées. Se référant toutes aux *« market failures »*, elles représentent une vision «défensive » venant justifier les interventions publiques dans l'industrie. La définition apportée par DE BANDT [1995, p. 128] résume bien l'approche défensive des politiques technologique et industrielle. Il remarque d'abord que :

- *« (…) les échecs de marché tendent à se généraliser ;*
- *les solutions cherchant à les réduire dans le cadre de la logique de marché ne sont pas satisfaisantes ;*
- *il en résulte des exigences accrues de politique industrielle. »*

Plus loin [*ibid.*], il affirme que «*si le marché était la référence par rapport à laquelle la politique industrielle apparaît comme une déviation, on pourrait commencer par montrer que la simple prise en considération des cas d'exception, devenus nombreux et importants, étend considérablement les justifications des politiques industrielles. Il suffit d'être plus systématique et d'aller plus dans l'identification de tous les 'échecs du marché' et dans la mise en avant des interventions possibles en vue de les pallier. Ceci conduirait évidemment à insister sur les imperfections et pouvoirs de marché et sur* la nécessité de promouvoir les activités de R&D et l'innovation[128], *mais aussi sur d'autres nécessités : sur la réduction des incertitudes, sur les règles et des incitations visant à atténuer les asymétries des informations, sur les insuffisances organisationnelles.* »

Finalement, cette approche consiste toujours à partir du marché, qui reste la référence de base, et à chercher à en combler ses lacunes, lorsqu'elles existent. Les solutions sont *a priori* à rechercher dans la logique du marché, ce qui renforce d'autant plus sa fonction de référence. Concernant la prise en compte des aspects dynamiques, on pourrait être conduit à penser que si l'allocation des ressources se place sur un plan

[127] On pourra retenir ici comme référence la définition de la politique industrielle de CORIAT [2000, p. 303] comme *« l'ensemble des actions à l'initiative des pouvoirs publics, visant, dans un état donné des marchés et de leur organisation, à opérer des transferts de ressources (notamment en créant des situations de 'rentes' plus ou moins prolongées), dans le but d'atteindre des objectifs déterminés en termes de compétitivité des entreprises concernées par le 'territoire' de la politique industrielle ».*

[128] Souligné par nous.

essentiellement statique, dans la mesure où elle ne s'effectue que sur la base de choix rationnels entre des alternatives bien identifiées et entièrement définies[129], la politique technologique pourrait être justifiée par des considérations plus dynamiques. Mais en réalité, dans la théorie standard, ces considérations sont écartées *a priori* : l'allocation optimale des ressources assure l'efficacité et est considérée comme une condition nécessaire et suffisante de la dynamique.

3.2. Les politiques de soutien : le dilemme entre les incitations à innover et la diffusion optimale

La finalité des interventions publiques en matière d'innovation dans l'approche néoclassique consiste à corriger les défauts du marché en encadrant les activités des acteurs innovateurs ou en se substituant à eux, afin de rétablir un comportement privé optimal compatible avec l'optimum social. Concrètement, les mesures mises en œuvre par le régulateur public ont pour objet de canaliser les forces qui poussent vers « trop de recherche » et celles qui limitent les incitations à innover. Pour le planificateur la valeur d'une innovation est égale au bien-être qu'elle génère dans l'économie ce qui lui fournit *a priori* un critère objectif pour déterminer les décisions optimales. Cependant, en devant trouver un équilibre entre les incitations qui visent à encourager la production de nouvelles technologies en les protégeant et celles qui ont pour but d'assurer leur diffusion de manière optimale, les politiques publiques sont confrontées à un dilemme. Tout l'objectif du régulateur consiste à mettre en œuvre des outils et à déterminer des arrangements institutionnels permettant de générer une action collective dont les fruits seront partagés par plusieurs acteurs. Nous aborderons dans un premier temps les mesures *ex ante*, avec la coopération des firmes pour innover, les crédits d'impôt et les subventions à la R&D, puis les mesures destinées à protéger l'innovation *ex post*, avec les brevets.

[129] Les politiques industrielles visent à modifier les comportements des entreprises conçues comme des unités de comportement rationnelles et autonomes. L'intervention publique cherche donc à modifier les données servant à leurs calculs, sachant que la firme optimisatrice doit automatiquement déplacer ses choix et modifier ses comportements en fonction de ces nouvelles données. Dans cette optique, il n'y a, *a priori*, pas de place pour un « système » productif, puisqu'il n'existe que des ensembles, c'est-à-dire des additions d'unités optimisatrices et les relations qu'elles ont entre elles sont uniquement des relations de marché.

3.2.1. Les mesures *ex ante*

3.2.1.1. La coopération en R&D permet-elle de surmonter les défauts d'incitation ?

La coopération entre firmes peut être une solution pour partager les risques inhérents à l'innovation, pour maîtriser l'incertitude et surmonter les défauts d'incitation en internalisant les externalités de R&D positives. Au moyen d'accords[130] ou par la création d'entités comme les *research joint ventures* (RJV)[131], les firmes mettent en commun des actifs propres en comptant sur le jeu de complémentarités et d'économies d'échelle pour partager ensuite les résultats des recherches communes. Les contrats de coopération, en constituant un cadre pour promouvoir une recherche incertaine et coûteuse, augmentent donc le bien-être en supprimant certains comportements stratégiques et en évitant une duplication des efforts de R&D. Les activités de R&D étant étroitement liées à des positions monopolistiques, le régulateur, dont la mission est de favoriser la concurrence en appliquant une politique anti-trust, doit également s'intéresser à la recherche coopérative afin de prévenir les risques de collusion entre les membres d'un accord.

Le modèle JACQUEMIN et D'ASPREMONT [1988] constitue l'un des modèles fondateurs de la réflexion sur les alliances en R&D et les incitations à l'innovation[132]. Les auteurs étudient l'impact de la coopération sur l'effort à la R&D pour une innovation réductrice de coût (« *output spillovers* »)[133] en construisant un modèle de duopole à la COURNOT à deux périodes, une période pré-compétitive de R&D et une

[130] Dans une étude faite sur plus de 7 000 accords de R&D, HAGEDOORN et SCHAKENRAAD [1990] recensent cinq principales formes organisationnelles en matière de coopération en R&D : la création d'une filiale commune (research joint venture) pour la R&D ; la convention d'accord pour réaliser en commun un projet de recherche spécifique avec partage des coûts et des savoir-faire ; la convention d'échanges technologiques contractuels dans laquelle les parties s'engagent à échanger des informations ; la prise de participation financière dans une société ayant un fort potentiel d'innovation technologique ; les accords de partenariat entre le fournisseur d'un bien intermédiaire utilisant une technologie nouvelle et le producteur d'un bien final.

[131] Selon la dénomination initiée par KAMIEN *et al.* [1992].

[132] Dans ce cas une innovation de procédé.

[133] La réduction finale du coût de chaque firme est composée d'une part qui lui est propre plus une fraction provenant des autres firmes (« *output spillovers* »).

période de production, avec une fonction de production présentant une externalité positive exogène. Trois configurations sont alors étudiées : (i) soit les firmes ne coopèrent ni dans la phase de R&D, ni au niveau de la production ; (ii) soit les firmes coopèrent uniquement pour la R&D, mais restent en concurrence dans la phase de production ; (iii) soit les firmes coopèrent dans les deux périodes. En considérant ces trois cas les auteurs calculent les niveaux de dépenses de R&D et de production correspondant aux situations d'optimum de premier rang, de non coopération, de coopération partielle et de coopération totale, et parviennent aux résultats suivants :

- si les externalités sont fortes, le niveau des dépenses de R&D s'accroît lorsque les firmes coopèrent partiellement ou totalement, mais il reste inférieur à l'optimum social ;
- si les externalités sont fortes, le niveau de dépenses de R&D en situation de coopération totale est supérieur à celui obtenu en situation de coopération partielle ;
- par rapport à la situation de non coopération, le niveau de production augmente quand les firmes coopèrent partiellement et diminue lorsque les firmes coopèrent totalement[134].

L'analyse de JACQUEMIN et D'ASPREMONT [1988] a donné lieu à de nombreux enrichissements. En prenant en compte l'effet des externalités sur les dépenses d'investissement en R&D (« *input spillovers* »)[135], KAMIEN *et al.* [1992] ont comparé les « RJV collusives », où les firmes décident d'une R&D commune et maximisent leur profit joint, et les «RJV compétitives[136] », dans lesquelles chaque firme décide de sa propre R&D et absorbe les *spillovers*. Les auteurs montrent qu'à l'équilibre la création d'une RJV compétitive apporte moins d'innovations et des prix plus élevés qu'une RJV collusive. Dans une compétition sur les quantités à la COURNOT[137] la RJV collusive permet d'atteindre les surplus du consommateur et du producteur les plus élevés.

---

[134] On retrouve l'analyse *schumpétérienne* dans cette situation proche du monopole.

[135] La dépense finale en investissement de R&D de chaque firme est composée pour partie « autonome » de ses propres dépenses et d'une fraction représentant les dépenses engagées par les autres firmes (« *input spillovers* »).

[136] Le nom de « *coopétition* » a également été donné à ces formes de relations inter-firmes, traduisant à la fois la présence de coopération et d'une compétition intense dans le domaine de la recherche comme sur les marchés (GUELLEC [1999]).

[137] Cela est également valable dans la plupart des cas d'une concurrence en prix à la BERTRAND.

D'autres modèles ont prolongé les approches en termes d'externalités technologiques en considérant une innovation de produit (MOTTA [1992]), en prenant en compte l'incertitude dans les résultats de la R&D (CHOI [1993], MIYAGIWA et OHNO [2002]) ou en examinant la question des externalités sous l'angle de la taille optimale de la RJV (POYAGO-THEOTOKY [1995]).

En mettant l'accent sur l'efficience des accords de R&D sur l'innovation ces différents modèles posent par ailleurs plusieurs questions relevant de la politique de la concurrence[138]. En effet, les contrats de coopération peuvent générer des risques anticoncurrentiels et/ou des risques de comportements opportunistes au sein d'un accord. Le régulateur doit tenir compte dans sa politique des comportements de collaboration, de collusion et de « passager clandestin » des acteurs industriels.

L'analyse en termes d'internalisation des externalités technologiques par les accords de coopération conduit à soulever plusieurs réserves. En premier lieu, les modèles survolés débouchent rarement sur des études empiriques, sûrement parce que l'appréhension des *spillovers* technologiques reste toujours problématique. Ensuite, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la conception de la technologie comme de l'information et l'hypothèse de l'exogénéité de l'appropriabilité de l'innovation, peu vérifiée, sont aujourd'hui remises en question par de nombreux auteurs. Enfin, ces modèles, construits sur l'arbitrage coopération/non coopération, laissent parfois sous-entendre que l'alliance pour la R&D est la seule voie pour internaliser les externalités technologiques. Or d'autres instruments, comme le brevet ou les licences, existent pour remédier aux défauts d'incitation (KATZ et ORDOVER [1990])[139].

---

[138] Les institutions, comme l'Union européenne, ayant la charge des politiques d'innovation répriment toutes les formes de collusions, tacites ou explicites. Ainsi, le débat est devenu central dans l'UE avec notamment la question de l'autorisation de la coopération au-delà de la recherche pré-compétitive.

[139] KATZ et ORDOVER [1990] ont été parmi les premiers à étudier, de manière théorique avec une application empirique, l'arbitrage entre l'alliance en R&D (soit une coopération *ex ante*) et une cession de licence (soit une coopération *ex post*). Quand les droits de propriété sont assurés, la firme innovatrice a la possibilité de s'approprier la rente d'innovation en cédant une licence à l'autre firme. Dans ce cas, la coopération *ex post* est préférée à la coopération *ex ante*, laquelle conduirait à une baisse de l'effort de R&D. Par contre, quand les droits de propriété sont incertains, la coopération *ex ante* est préférée à la coopération *ex post* car elle permet d'internaliser les externalités technologiques.

3.2.1.2. L'intervention publique par les crédits d'impôt et les subventions à la R&D

Dans l'objectif de pallier la tendance au sous-investissement engendrée par les défaillances du marché, les Etats mettent en œuvre des politiques publiques qui encouragent les investissements dans la R&D ou portent le rendement privé des investissements à des niveaux proches de ceux du rendement social, sans nécessairement accorder des pouvoirs monopolistiques aux exécutants de la R&D. Ces politiques n'ont jamais cessé d'exister sous leurs formes les plus traditionnelles, à savoir l'aide publique pour aider à la création d'avantages comparatifs nationaux (GROSSMAN et HELPMAN [1991]) et/ou le soutien aux entreprises nationales dans le cadre d'une politique commerciale stratégique (BRANDER et SPENCER [1983]). Cependant, depuis une quinzaine d'années l'ensemble des pays développés, sans remettre en cause l'importance de leur intervention, cherche à pondérer l'allocation de leurs ressources d'une nouvelle manière, plus adaptée à la globalisation et à la révolution technologique en cours (COHEN et LORENZI [2000]). JACQUEMIN [1996, p. 177] rend compte de cette tendance en affirmant que *« (…) les politiques publiques d'aujourd'hui se trouvent confrontées à de nombreuses contraintes, mais aussi disposent de moins en moins d'instruments pour agir. En effet les imperfections et des défaillances de marché interviennent dans une période fortement complexe, caractérisée à la fois par une interdépendance croissante entre les différents acteurs de la vie économique (industrie, recherche et politique), et une globalisation accélérée des marchés, qui rend difficile toute prévision de l'évolution »*.

3.2.1.2.1. Les formes des politiques publiques de soutien à l'innovation

Bien que les marges de manœuvre apparaissent de plus en plus étroites, quelles sont les principales formes des aides publiques à l'innovation utilisées aujourd'hui ? LYPSEY et CARLAW [1998] différencient trois grandes catégories de politiques en matière de technologie :

- *Les politiques cadres* fournissent un appui général à une activité particulière dans l'ensemble de l'économie. Habituellement elles mettent en place des instruments indirects, dont le plus utilisé, dans les pays de l'OCDE, est le crédit d'impôt à la

R&D[140]. Son principe est de retirer directement de l'impôt (et non du revenu imposable) un montant dépendant des dépenses de R&D. Différents mécanismes existent selon les pays (GUELLEC [1999]) : le crédit d'impôt peut être « en niveau », lorsqu'une fraction du montant des dépenses de R&D est retirée de l'impôt ou il peut être « incrémental », quand c'est une fraction de l'augmentation des dépenses de recherche[141] qui est prise en compte. Leur éligibilité peut être réservée aux dépenses de R&D[142] effectuées dans certains secteurs (énergie, environnement…) ou par certains acteurs (universités, petites et moyennes entreprises). Ce type d'aide ne fait pas de discrimination entre les firmes, les industries ou les technologies. En pratique le fait de participer à l'activité visée constitue souvent une condition nécessaire et suffisante pour obtenir les avantages offerts, et les firmes bénéficiaires ont ensuite la liberté de choisir elles-mêmes leurs projets en tenant compte des incitations données par le marché ;

- *Les politiques ciblées* sont conçues pour encourager le développement de technologies particulières ou des formes particulières de R&D. Par exemple, l'Etat peut intervenir dans le cadre d'accords de coopération ou de consortium internalisant les externalités en choisissant lui-même les entreprises prenant part au projet de recherche et en accordant certain type de subvention à l'équipe. Ces politiques ont habituellement un objectif étroit et la compatibilité avec ce dernier est à la fois une condition nécessaire et suffisante pour avoir accès aux avantages offerts. Les instruments financiers les plus répandus sont les subventions directes à la R&D pour soutenir des projets ou des secteurs particuliers. Les subventions comportent un volet discrétionnaire exercé par l'Etat qui se substitue au marché dans le processus de choix des technologies (« *picking winners* »), des firmes et des secteurs bénéficiaires qui doivent présenter des taux de rendement social potentiels élevés ;

---

[140] Voir COHEN et LORENZI [2000] pour une présentation chiffrée de la ventilation des aides destinées à la « technologie industrielle » dans les pays de l'OCDE. Celles-ci se différencient des aides à la R&D proprement dites. Elles incluent, en plus des aides traditionnelles, les crédits budgétaires publics de R&D, les incitations financières, les contrats publics et les infrastructures de science et technologie.

[141] Lorsque sont soustraites aux dépenses de l'année les dépenses d'une année de référence.

[142] Dans tous les pays de l'OCDE les dépenses courantes de R&D (salaires et produits intermédiaires) sont considérées comme des *inputs* (coûts intermédiaires) : elles sont déduites des bénéfices et ne sont pas imposables. Les dépenses en capital (bâtiments et équipements) pour la R&D sont souvent traitées plus favorablement que les actifs du même type qui n'ont pas la recherche comme objet (amortissement accéléré).

• *Les politiques d'application générale* intègrent des éléments des politiques cadres et des politiques ciblées. D'un côté, elles peuvent avoir des objectifs de vaste portée semblables aux politiques cadres, de l'autre, elles peuvent faire appel à de multiples instruments et comporter un mécanisme d'évaluation permettant à ceux qui ont la responsabilité de leur administration d'adapter l'aide selon les circonstances.

Ainsi, le fait de participer aux activités visées est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour recevoir les avantages offerts par une politique. Les conditions suffisantes varient d'une politique et d'un instrument à l'autre, mais elles doivent être satisfaites pour avoir accès aux avantages offerts. Ces conditions sont parfois énoncées de manière explicite dans les règlements des programmes ; les administrateurs d'un programme peuvent aussi disposer d'un pourvoir discrétionnaire pour décider si les activités d'une entreprise répondent aux conditions imposées.

3.2.1.2.2. Les difficultés engendrées par les asymétries d'information

L'intervention publique comporte des limites car l'Etat n'est pas toujours la « puissance bienveillante » postulée par la théorie. Le régulateur chargé de mettre en œuvre ces instruments est exposé à des effets négatifs créés par les situations d'asymétrie d'information[143]. En premier lieu il peut se heurter aux problèmes inhérents à la « détection » des externalités. Le principal problème concerne alors la difficulté de cerner exactement les coûts qui doivent être pris en considération pour déterminer la base de l'aide. Si l'Etat n'est pas directement impliqué dans un projet, il peut difficilement s'assurer que les résultats bénéficient à la société au-delà des participants directs. Dans le cadre de la théorie standard, le principe général veut que la politique de soutien à l'innovation doit être ciblée spécifiquement sur l'activité pour laquelle il y a un effet externe, et le fait qu'une firme appartienne à une branche industrielle n'est pas en soit un motif suffisant, une activité ne faisant pas partie à proprement parler du secteur visé peut en effet générer aussi des externalités (GAZON [1995]). Une solution évidente consiste à subventionner la R&D partout où elle se produit, même si se pose

[143] En effet, celui-ci ne possède pas toutes les informations relatives aux caractéristiques du projet de R&D à soutenir : capacité de projection dans la longue durée, choix de la firme bénéficiaire, montant optimal de l'aide, choix technologique, appréciation des résultats…

toujours un problème de définition et de mesure comptable de la R&D qui génère des connaissances profitant à l'ensemble de la société.

Bien que similaires dans leur objectif, l'octroi de crédits d'impôt à la R&D et de subventions ne nécessitent pas pour le régulateur de posséder les mêmes niveaux d'information. Les subventions directes demandent au préalable une évaluation précise des bénéfices privés et sociaux engendrés par un projet de R&D. Les firmes vont classer les projets en fonction de l'importance des bénéfices privés, alors que le régulateur public doit effectuer son classement en tenant compte de l'écart entre les rendements privés et les rendements sociaux futurs.

Ainsi, dans la réglementation d'une activité de R&D et dans le but de maximiser l'intérêt collectif et d'éviter les *effets d'aubaine*, le régulateur public devrait être en mesure d'offrir *ex ante* un contrat complet[144] optimal précisant l'ensemble des paiements futurs. Cependant, gêné par les asymétries d'information, le régulateur ne peut pas écrire des contrats complets par lesquels il puisse s'engager, et souvent son intervention, se gardant de risquer des financements sur le très long terme, se fait au cas par cas, avec des renégociations selon l'état d'avancement des travaux. De nombreuses

[144] Les problèmes liés à l'asymétrie d'information entre les acteurs économiques sont appréhendés par des modèles « principal-agent ». Ces modèles mettent généralement en relation deux agents économiques : d'un côté une partie informée (le plus souvent l'agent), qui détient une information pertinente pour la bonne marche de la relation contractuelle, de l'autre, une partie non informée (le principal). L'asymétrie d'information peut alors engendrer des problèmes de nature différente. Les modèles développés pour prendre en compte les problèmes d'asymétrie d'information entre les acteurs tiennent compte de ce que fait l'agent et/ou de qui est l'agent. On parle de « sélection adverse » quand une caractéristique de l'agent est mal connue du principal. On parle « d'aléa moral » lorsque l'agent prend une décision qui affecte le bien-être du principal sans que ce dernier puisse observer les actions de l'agent. La théorie de l'agence et les modèles principal-agent qui en découlent ont pour objet de traiter les situations où l'information est asymétrique (LAFFONT et TIROLE [1986, 1993]). Le problème est pour le principal, qui est le plus souvent la partie non informée, de mettre en place un contrat incitant l'agent à révéler son information (sélection adverse) pour l'inciter à agir dans son sens (aléa moral). La théorie de l'agence est une théorie des contrats complets. Les asymétries d'information incorporées dans le modèle ne permettent plus aux agents de passer des contrats contingents complets, certaines contingences n'étant pas vérifiables (ou observables par un tiers). Néanmoins ils vont pouvoir mettre en place des contrats complets. Un contrat complet dans le paradigme principal-agent est donc un contrat signé prenant en compte toutes les variables qui sont ou peuvent devenir pertinentes et qui suffit complètement à coordonner les agents.

analyses se sont penchées sur les contrats optimaux que le régulateur ayant en charge la politique d'innovation doit présenter aux firmes innovatrices (OLSEN [1993], LEAHY et NEARY [1997], STENBACKA et TOMBAK [1998], TOSHIMITSU [2003]). S'appuyant sur l'existence d'asymétries d'information entre le régulateur et les innovateurs, ces travaux traitent essentiellement de la sélection d'une firme afin de réaliser un projet dont le coût peut être diminué par une innovation de procédé. Pour chaque cas précis, la démarche suivie consiste à caractériser le contrat optimal qui doit être proposé par le régulateur pour induire un processus d'autosélection des firmes (en leur faisant révéler leur information privée) ainsi que le choix des efforts optimaux. Ce contrat conduit à ce que les firmes les plus efficaces reçoivent plus de rentes que les autres afin de dévoiler leur information. En outre, les paiements doivent aussi dépendre des caractéristiques des marchés et de l'ensemble des paramètres économiques, comme la valeur sociale de l'innovation, influencés par la découverte. On peut s'interroger toutefois sur les possibilités réelles d'élaborer un contrat optimal de façon à inciter l'agent à agir dans l'intérêt du principal. Pour BROUSSEAU [1993] il est impossible d'élaborer un contrat optimal et il faut se contenter de contrats de second rang. L'émergence d'un contrat optimal est liée au phénomène d'apprentissage et de l'expérience.

3.2.1.2.3. Les dépenses de R&D publiques : complément ou substitut de la R&D privée ?

Idéalement, pour déterminer l'efficacité des incitations à la R&D, il faudrait procéder à une analyse « coût-bénéfice », c'est-à-dire comparer le coût social d'un prélèvement additionnel de taxe au bénéfice social de la R&D additionnelle engendrée par l'incitation fiscale. Ce type d'analyse nécessite une information détaillée sur l'utilisation alternative des taxes allouées à la R&D[145] et des bénéfices « sacrifiés », de même que la connaissance de toutes les retombées indirectes de la recherche et des coûts administratifs, publics et privés[146], d'une politique de soutien à la recherche. Faute de posséder ces informations, la solution alternative retenue dans la littérature théorique consiste à estimer combien de R&D est engendrée par unité monétaire de dépense

[145] Chaque unité monétaire attribuée à un innovateur coûte plus d'une unité aux agents taxés à cet effet, c'est-à-dire que le coût des transferts entraîne une « perte sèche ».

[146] Le choix des procédures d'intervention est très important afin de ne pas entraîner des coûts trop élevés. Du côté des firmes, les plus petites d'entre elles n'ont pas toujours la possibilité de soumettre des projets car le coût de leur élaboration est parfois élevé.

fiscale ou de subvention versée, pour faire apparaître un *effet de levier*. Si une unité de recette fiscale sacrifiée produit une unité de dépense en R&D de la part du secteur privé, l'incitation est considérée comme efficiente. Dans le cas contraire, le secteur public a tout intérêt à conduire la recherche lui-même. Formulée en d'autres termes, se pose la question de la sensibilité des dépenses de R&D privée aux incitations publiques : y-a-t-il un effet de substitution ou de complémentarité/additionnalité entre les fonds publics et les fonds privés pour la R&D ?

Concernant les crédits d'impôts, la sensibilité des dépenses de R&D aux stimulants fiscaux est délicate à mesurer du fait des nombreux autres facteurs qui influent sur le niveau souhaité des dépenses de R&D. Cependant, il apparaît dans plusieurs études que l'effet de substitution des incitations fiscales à la R&D est peu significatif (CORDES [1989], HALL et VAN REENEN [2000], MOHNEN [2000]). Le fait de rendre la R&D financièrement plus attrayante après impôts n'entraîne pas une très grande substitution du capital à d'autres *inputs* dans les activités de R&D[147]. En outre, les crédits d'impôts ont tendance à bénéficier aux firmes qui supportent déjà des dépenses importantes de R&D et qui s'engagent sur des projets d'innovation à court terme dans le but d'en retirer des bénéfices rapidement. Selon BROCAS [2003] ce mode d'intervention est souvent inefficace. En France, les politiques non ciblées affichent peu de résultats significatifs et il est estimé que 50 à 70% des déductions fiscales autorisées servent à financer des innovations qui auraient lieu de toute façon. En conséquence, les projets à plus long terme porteurs de taux de rendement sociaux élevés sont délaissés par les firmes, ce qui diminue d'autant la diffusion d'externalités technologiques.

Les subventions publiques à la R&D doivent être réservées aux secteurs pour lesquels l'écart entre le taux de rendement privé et le taux de rendement social est le plus important. Pour cette raison, les subventions directes attribuées à la recherche fondamentale, pour laquelle le rendement privé est peu élevé, viennent généralement se substituer aux investissements privés (DAVID et HALL [2000]). Elles peuvent avoir

[147] La plus grande partie de la réaction des dépenses de R&D aux stimulants fiscaux semble provenir de l'effet d'échelle ou de production. Une réduction du coût d'utilisation de la R&D réduit les coûts de production unitaires. Cela peut engendrer des prix moins élevés, une plus grande demande, une augmentation de la production et une demande plus forte pour le capital de R&D. L'importance de cet effet au niveau de la production repose en définitive sur la mesure de l'incitation fiscale pour les industries à fort coefficient de R&D à accroître leur production, ce qui dépend de l'élasticité de substitution entre les produits à fort coefficient de R&D et les autres produits.

également un effet indirect en contribuant à diminuer le prix des *inputs* de la R&D dont la demande est inélastique. Les subventions orientées vers la R&D la plus proche de la phase commerciale viennent par contre s'ajouter et renforcer les dépenses déjà engagées par les firmes (DAVID *et al.* [2000], KLETTE *et al.* [2000]).

Toutefois, ces interventions publiques ne garantissent pas la société contre des comportements opportunistes : dans quelle mesure l'Etat représente-t-il l'intérêt collectif ? L'Etat réellement agissant est une « collection » d'administrations, d'agences publiques et d'individus dont les intérêts, ne sont pas forcément alignés sur ceux de la société dans son ensemble, et comme il existe des défaillances du marché, il peut exister des « défaillances du gouvernement » (« *public policy failure* ») (METCALFE [1994], DE BANDT [1995]). Même si les contrats proposés par le régulateur sont relativement sophistiqués, ils peuvent faire l'objet de manipulations par les agents ayant de la discrétion dans le processus de choix des projets innovants ou de rémunération des firmes et qui, au sein même des sphères publique et privée, ont des intérêts divergents ou encourent des risques de capture[148]. Toute la difficulté pour l'autorité publique consiste alors à trouver le bon équilibre entre la souplesse de la réglementation proposée, les moyens de contrôle des agences publiques en charge d'appliquer les programmes et le niveau de marge de manœuvre accordé aux entreprises.

3.2.2. Les mesures *ex post* : les brevets

Dans le cadre de la théorie micro-économique standard, les agents privés n'ont d'incitation à produire une technologie qu'en fonction des profits, monétaires ou symboliques, qu'ils espèrent en tirer, et donc uniquement s'ils peuvent s'assurer une exclusivité sur elle. Théoriquement l'attribution par voie légale d'une exclusivité totale sur les résultats de la recherche, c'est-à-dire *ex post*, est un moyen d'incitation puissant. Cependant, elle empêche une diffusion large de la technologie et compromet les gains potentiels pour la collectivité. La contradiction entre la protection des innovations et la diffusion des connaissances apparaît ici de manière flagrante, et donc toute mesure de protection sera inévitablement imparfaite. Il est nécessaire de mettre en œuvre une procédure qui permette de concilier au mieux la nature de bien public des résultats de la

[148] Il peut s'agir des firmes qui bénéficieront des financements, des élus locaux privilégiant l'intérêt de leur circonscription ou des collectivités territoriales qui luttent pour élargir leur domaine de compétence.

recherche et la rémunération des ressources lorsque celles-ci sont d'origine privée. Le brevet est dans les pays industrialisés un des principaux modes d'incitation des firmes à engager les dépenses de R&D collectivement efficientes.

Le brevet constitue, à travers le droit de propriété industrielle (DPI) qu'il comporte, l'attribution d'une exclusivité partielle accordée par l'Etat sur une nouvelle invention. A ce titre, il correspond à l'octroi d'un monopole restreint. Un DPI vise à permettre aux inventeurs de percevoir une partie de la valeur sociale de leur innovation et, en même temps, à surmonter le problème de l'incapacité de s'approprier les bénéfices de l'invention. En contrepartie de ce droit d'exclusivité, le détenteur du brevet doit divulguer son invention[149]. Un certain nombre d'études empiriques ont mis en évidence que l'importance du recours aux brevets varie selon les secteurs d'activités[150]. En effet, les innovations brevetables ne sont pas toujours brevetées[151]. Par exemple dans les cas d'innovations intermédiaires ou quand la technologie progresse très rapidement[152], les innovations peuvent être gardées secrètes. Les stratégies de secret des innovations permettent d'échapper à la veille technologique des concurrents en ne révélant publiquement aucune information de positionnement technologique[153]. Mais un inventeur peut employer d'autres moyens pour dissuader les imitateurs éventuels. LEVIN

[149] La divulgation des informations contenues dans le brevet suppose la présentation d'une description précise et complète de l'invention pour que celle-ci puisse être reproduite par un « homme de l'art ». La description faite dans la demande de brevet vise à aider les autres firmes à mettre au point des applications et des améliorations qui ne constituent pas une contrefaçon. Nous avons vu toutefois que les demandes de brevet ne constituent pas les sources les plus importantes de l'information technologique (LEVIN *et al*. [1987]).

[150] Pour la période allant de 1981 à 1983, MANSFIELD [1986] a montré que les brevets constituent un stimulant important pour le développement de 30% des innovations dans les secteurs des produits pharmaceutiques et chimiques. Pour le secteur du pétrole ou des métaux, la protection par brevet est essentielle pour seulement 15% des innovations, et pour les industries textile, électrique et automobile l'intérêt du brevet est très limité.

[151] En Europe 44% des innovations de produits (contre 52% aux Etats-Unis) et 26% des innovations de procédés (contre 44% aux Etats-Unis) sont brevetées (ARUNDEL et KABLA [1998]).

[152] Dans ces cas les brevets peuvent devenir obsolètes avant même qu'ils ne soient délivrés.

[153] Pour les innovations généralement brevetées, la tendance est de déposer un grand nombre de « brevets leurres » pour une même innovation afin de compliquer la tâche des concurrents-imitateurs. En France, selon l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI) 80% des brevets d'une firme sont destinés à gêner la concurrence et seulement 20% sont exploités.

et al. [1987] ont établi un classement des méthodes qui permettent à un inventeur de s'approprier les bénéfices de son innovation, de produit ou de procédé, tout en dissuadant les imitateurs potentiels[154].

Tableau 1. Les moyens de protection contre l'imitation
Source : d'après LEVIN et al. *[1987, p.33]*

	Classement selon l'efficacité	
Moyen d'appropriation des bénéfices de l'innovation	***Produits***	***Procédés***
Ventes/services de qualité supérieure	1	3
Avance en matière de R&D	2	1
Progrès sur la courbe d'apprentissage	3	2
Brevet visant à interdire la reproduction	4	5
Brevet visant à obtenir des redevances	5	6
Secret	6	4

Même si ce type de classification peut varier d'une industrie à l'autre, les auteurs mettent en évidence que les moyens les plus importants pour s'approprier les rendements d'une innovation de produits passent généralement par l'accès à des éléments d'actifs co-spécialisés et la possession d'une avance en matière de R&D, alors que pour une innovation de procédé l'avance dans la R&D et les progrès réalisés sur la courbe d'expérience apparaissent déterminants[155]. Il ressort de ce classement que les brevets arrivent derrière les éléments d'actifs co-spécialisés, l'avance acquise en matière de R&D et la courbe d'expérience, mais ils devancent les secrets commerciaux comme moyen de s'approprier le résultat d'une activité d'innovation. Cela signifie que les

[154] L'étude de LEVIN *et al.* [1987] s'appuie sur une enquête réalisée auprès de 650 responsables de la R&D dans 130 industries différentes aux Etats-Unis les interrogeant sur le meilleur moyen de s'approprier et de protéger les avantages concurrentiels que procurent les innovations.

[155] Les éléments d'actifs co-spécialisés comprennent le savoir-faire, les installations de production, l'expérience et le dispositif de commercialisation ou encore la réputation. L'inventeur est protégé contre les imitations lorsque l'exploitation d'une invention exige des éléments d'actifs complémentaires uniques auxquels l'inventeur a accès, mais non les imitateurs (TEECE [1986]). Les inventeurs possédant une certaine avance en matière de R&D profitent d'une période de monopole avant que les imitateurs soient en mesure d'entrer sur le marché. Ils s'appuient sur leur courbe d'apprentissage et profitent de leur entrée précoce sur le marché pour acquérir progressivement de l'expérience sur la production ou la commercialisation, ce qui réduit le coût unitaire et décourage les imitateurs.

brevets ne sont pas obligatoirement un *stimulus* à l'invention très important pour toutes les firmes et pour tous les secteurs industriels.

L'étude[156] plus récente de COHEN *et al.* [2000] montre que le brevet est toujours le moyen de protection des innovations de produits et de procédés le moins utilisé par les firmes. Par contre, par rapport aux résultats de LEVIN *et al.* [1987], il apparaît que, pour les innovations de produits, l'avance en R&D et le secret sont des moyens de protection des innovations désormais beaucoup plus employés qu'au début des années 1980. Concernant, les innovations de procédé, le secret industriel est le premier moyen d'appropriation, suivi par le développement de capacité de production complémentaires à l'innovation.

3.2.2.1. La réglementation des brevets : le choix du dimensionnement

L'analyse économique s'intéresse depuis une période récente au problème de la définition des caractéristiques des brevets et à leur utilisation par les pouvoirs publics pour inciter les firmes à choisir les bons niveaux d'efforts en matière de R&D. Le régulateur public fait face à un problème de dimensionnement des brevets. Il doit effectuer un calcul en trois dimensions intégrant la longueur (la durée), la largeur (l'étendue de la protection) et la hauteur (la protection d'une innovation de base et de ses améliorations). Sur ce point CRAMPES et MOREAUX [1995, p.14] remarquent de façon imagée « *qu'il s'agit* [pour le régulateur public] *de construire un 'tunnel' à l'intérieur duquel l'inventeur pourra se comporter monopolistiquement* ». Similairement, pour BROCAS [2003] le brevet s'apparente à une politique de type « *price cap* », où les *caps* sont la longueur, la largeur et la hauteur.

3.2.2.1.1. La dimension temporelle du brevet : la longueur

Le premier problème lié à la dimension temporelle concerne la date de dépôt du brevet. Le principe adopté par tous les pays, sauf les Etats-Unis, est celui du «*first to file* », par lequel le brevet est accordé au premier qui en fait la demande. Aux Etats-Unis le principe est celui du «*first to invent* ». Il permet à un inventeur qui prétend avoir fait

[156] L'étude de COHEN *et al.* [2000] est basée sur les réponses à un questionnaire envoyé à 1 478 laboratoires de R&D d'entreprises industrielles aux Etats-Unis en 1994.

la découverte le premier de contester une demande postérieurement à son dépôt. Nous avons vu à travers les modèles de courses au brevet comment était représentée la concurrence entre plusieurs firmes pour l'obtention d'un brevet. Le choix de la date optimale du dépôt dépend de nombreux paramètres[157], mais c'est surtout le niveau d'information que détient chaque firme sur ses rivales qui détermine l'issue de la course. Selon le niveau d'information, la compétition technologique va conduire soit à une dissipation de la rente de monopole créée par le brevet, si les firmes pensent pouvoir préempter leurs concurrents, soit elle ne produira aucun effet si le résultat est connu d'avance, les firmes perdantes n'engageant pas de dépense et la firme gagnante ne réalisant qu'un programme de recherche au coût minimal.

La longueur d'un brevet concerne la durée de vie statutaire, c'est-à-dire la période maximale durant laquelle le brevet reste valide[158]. Cette durée a été variable selon les époques et les pays[159]. NORDHAUS [1969] et SCHERER [1972] se sont les premiers interrogés sur la durée de vie statutaire optimale. La longueur optimale est la période pour laquelle le surplus découlant des inventions supplémentaires qui seraient attribuables à une durée plus longue correspond au surplus sacrifié en restreignant davantage l'utilisation des inventions qui seraient survenues à des durées de protection plus courtes[160]. Afin de compenser les pertes statiques par les gains dynamiques de bien-être, NORDHAUS [1969], en interprétant le brevet comme un instrument de

---

[157] Ces paramètres concernent notamment le nombre d'applications liées au brevet, la stratégie de recherche et le rôle de l'expérience et du hasard, les conditions légales d'accès à l'innovation.

[158] On peut noter que la durée de vie statutaire ne correspond pas forcément à sa durée de vie effective (O'DONOGHUE *et al.* [1998]). Tous les brevets n'atteignent pas le terme légal, soit parce qu'ils sont technologiquement dépassés, soit parce qu'ils ne sont plus rentables. En outre, dans la plupart des pays pour que les brevets demeurent valides, leurs détenteurs doivent payer des annuités de renouvellement. La fixation du montant de ces annuités constitue un instrument pour influencer la durée de vie effective des brevets.

[159] Pour un historique de l'évolution du contexte institutionnel lié aux brevets voir notamment HERAUD [1995] et DAVID [1998]. Par exemple les Etats-Unis et l'Union européenne n'avaient pas les mêmes périodes de validité des brevets, soit respectivement 17 et 20 ans. Les accords sur les Aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (ADPIC) signés en 1994 à Marrakech dans le cadre de l'OMC ont harmonisé la durée à 20 ans.

[160] Le surplus sacrifié en raison de l'imposition de prix supérieurs au coût marginal pendant la durée du brevet est appelé la « perte sèche ». Plus la perte sèche correspond à l'utilisation perdue est élevée, plus courte est la durée optimale du brevet.

politique économique, a montré que la durée optimale d'un brevet devait être finie, et ceci pour trois raisons :

- dans les courses au brevet le gagnant doit obtenir l'ensemble des gains (les profits liés au brevet) même si son avance est infime par rapport à ses rivaux ;
- l'incertitude de l'effet des innovations à la fois sur l'offre et la demande justifie une durée bornée de l'exploitation monopolistique ;
- la valeur sociale d'une innovation est bornée de sorte qu'une durée de vie infinie ne peut pas être justifiée au vu de la distorsion de concurrence et de la réduction du surplus qui en résulte.

DAVID et OLSEN [1992] avancent qu'à la différence d'une situation concurrentielle une protection par un brevet permet également d'internaliser les effets d'apprentissage. La durée du brevet doit alors être suffisamment longue pour que la perte d'efficacité sociale provoquée par la présence du monopole soit compensée par la réduction des coûts et le surplus de bien-être résultant de l'expérience qu'il aura accumulée.

3.2.2.1.2. L'étendue du brevet : la largeur

La littérature micro-économique apporte plusieurs définitions sur l'étendue des brevets. KLEMPERER [1990] caractérise l'étendue du brevet comme l'espace d'un produit différencié couvert par un brevet unique. GALLINI [1992] définit l'étendue du brevet en termes de coûts d'imitation. Quelle que soit la définition retenue, l'étendue d'un brevet est liée à la force des droits qui lui sont attachés, ce qui détermine *in fine* sa valeur. Ce sont les revendications précisées lors du dépôt de la demande d'un brevet qui déterminent l'étendue de sa protection. Deux moyens permettent d'élargir l'étendue de la protection : lorsque l'innovateur formule largement les revendications ou lorsque les tribunaux qui ont en charge les conflits concernant la propriété intellectuelle interprètent largement les revendications[161] (DEFFAINS [1997]).

[161] Dans le premier cas c'est l'examinateur de l'office des brevets qui, *in fine*, détermine la largeur du brevet, alors que dans le second, c'est le juge qui tranche.

La largeur du brevet permet d'apprécier la valeur d'une innovation. Plus un brevet est large, plus sa valeur est importante car il oblige les concurrents potentiels innovateurs à plus d'efforts pour « contourner » le brevet sans le contrefaire. L'étendue de la protection du brevet est importante en cas de contrefaçon, c'est-à-dire si un concurrent choisit, de manière délibérée ou non, de fabriquer un bien s'appuyant sur une technologie très proche du brevet existant. Il est possible de discerner deux types de contrefaçons :

- celles qui consistent à imiter, à quelques détails près, des produits brevetés. La protection contre ces imitations est définie comme la largeur de la protection ;
- celles qui consistent à améliorer des produits brevetés. L'étendue de la protection contre les améliorations est définie comme la hauteur du brevet.

3.2.2.2. La dimension optimale des brevets

Dans la littérature économique, les modèles traitant soit de la largeur, soit de la hauteur des brevets ne font pas l'objet d'un consensus quant à l'étendue optimale. Celle-ci reste largement dépendante des hypothèses retenues.

La largeur et la durée ont été d'abord considérées par GILBERT et SHAPIRO [1990] et par KLEMPERER [1990]. GILBERT et SHAPIRO [*ibid.*] avancent qu'il est préférable d'avoir des brevets longs et étroits car la largeur des brevets crée plus de perte sèche. La durée de vie est donc un moyen de récompenser l'innovation. KLEMPERER [*ibid.*] intègre la préférence des consommateurs pour la variété dans le cadre d'un modèle où les biens sont des substituts parfaits. Dans ce cadre, une plus large protection correspond à une couverture plus importante de l'espace des variétés par un seul brevet. Au final, des brevets plus larges peuvent être préférables.

GALLINI [1992] prend en compte la possibilité que le produit breveté soit imité par des firmes en captant les connaissances qui sont diffusées. Des brevets longs viennent accroître la probabilité que les firmes inventent « autour » (*« to invent around »*) du brevet déposé. Pour éviter l'imitation, les brevets doivent être assez larges et leur durée de vie doit être assez longue pour être incitative, ce qui constitue un résultat totalement contraire à celui de GILBERT et SHAPIRO [1990].

Selon O'DONOGHUE *et al.* [1998], qui étudient également les interactions entre la largeur et la longueur des brevets, si le brevet est long et étroit, il expirera à une date

endogène déterminée par la probabilité de réalisation d'une meilleure innovation. Si le brevet est court mais assez large, la durée de vie effective peut coïncider avec la durée de vie statutaire. Un brevet à durée de vie infinie et une largeur en aval[162] modeste ou une longueur modeste et une largeur en aval infinie peuvent permettre d'atteindre un même taux d'innovation. Le premier type de politique est plus efficace pour réduire les coûts de R&D, alors que le second type minimise les coûts liés au retard de diffusion de l'innovation.

Alors que les modèles de GILBERT et SHAPIRO [1990] ou de KLEMPERER [1990] conçoivent la largeur comme une caractéristique définissant l'étendue du brevet, O'DONOGHUE et ZWEINMÜLLER [1999] introduisent pour leur part une véritable distinction entre la largeur et la hauteur. Une firme peut alors obtenir un brevet pour une innovation, si la hauteur est suffisante, mais elle doit payer en même temps une licence au détenteur d'un brevet précédent si elle empiète sur la largeur en aval de ce dernier.

Dans un *survey*, VAN DIJK [1994] souligne le fait que peu d'analyses de la théorie économique s'intéressent à la hauteur du brevet, d'autant plus que la majeure partie de la R&D industrielle est destinée à l'amélioration des produits. Nous pouvons cependant remarquer que depuis SCOTCHMER [1991] la littérature sur le brevet a intégré la notion d'innovations cumulatives et ses conséquences sur la propriété industrielle. L'exigence de nouveauté[163] et de non trivialité lors du dépôt d'un brevet se réfère à la quantité d'améliorations qu'incorpore une nouvelle innovation par rapport à une précédente. Plusieurs auteurs mettent en évidence la façon dont un standard de brevetabilité peut influencer la taille d'une innovation que souhaite réaliser une firme lorsqu'elle investit dans la R&D (LA MANNA [1992], O'DONOGHUE [1998]). Plus l'exigence de nouveauté est élevée et plus les firmes vont choisir des innovations

[162] La largeur en aval (ou largeur avant) limite les innovations futures en spécifiant les produits supérieurs que les autres firmes ne peuvent produire. La largeur en aval est souvent contestée puisqu'elle revient à accorder un droit de propriété sur des produits que le détenteur du brevet n'a pas lui-même inventé. La largeur en amont (ou largeur arrière) dissuade l'imitation en spécifiant les produits inférieurs qui ne peuvent pas être produits. Le détenteur du brevet élimine ses concurrents les plus directs de sa ligne de produits ou augmente son pouvoir de marché en leur cédant une licence payante (DEFFAINS [1997]).

[163] Lors de l'examen de la demande d'un brevet, l'office des brevets vérifie que la demande repose sur une invention « véritablement nouvelle », qu'elle a potentiellement des applications techniques et qu'elle fait progresser de manière substantielle par un « saut technologique » l'état de l'art dans le domaine par rapport aux innovations précédentes.

importantes, ce qui peut améliorer le bien-être. L'importance de l'investissement en R&D peut augmenter avec un standard plus important.

3.2.2.3. Avantages et inconvénients des brevets : dans tous les cas une solution imparfaite

Dans la comparaison aux autres modes d'incitation à la R&D, les brevets présentent donc un certain nombre d'avantages (CRAMPES et MOREAUX [1995], CRAMPES et ENCAOUA [2003]) :

- une firme qui dépose un brevet proportionne ses dépenses de R&D à ses efforts de développement et de commercialisation, alors qu'un bailleur de fonds public se heurte à des asymétries informationnelles pour évaluer la somme correspondant au niveau d'incitation recherché ;
- le titulaire d'un brevet obtient le droit d'exclure du marché et de sanctionner les imitateurs éventuels. Il se charge lui-même de la surveillance de son marché et compte tenu des coûts engendrés par les poursuites judiciaires[164], il a tout intérêt à négocier avec les imitateurs, en leur accordant par exemple une licence[165], plutôt qu'à les poursuivre.

Mais la protection par les brevets n'est cependant pas dépourvue d'inconvénients :

---

[164] Le nombre de cas de litiges est corrélé avec la probabilité de détection d'une situation litigieuse. Cette probabilité varie d'un secteur d'activité à l'autre et dépend positivement du nombre d'acteurs ainsi que de leur taille respective. Le nombre de litiges dépend également des chances que la demande du plaignant soit accordée par le tribunal, des gains espérés du résultat et du coût du procès. Le *Patent Trademark Office* a recensé 5 452 cas litigieux de 1975 à 1991, dont 3 887 aux Etats-Unis. Généralement 10% des brevets font l'objet de litiges (LANJOUW et SCHANKERMAN [1997]).

[165] L'établissement d'un contrat de licence pour un brevet d'invention permet au détenteur du brevet d'accroître son retour sur investissement en R&D. Une licence permet d'octroyer à une ou plusieurs entreprises le droit d'exploiter un brevet en échange d'un paiement au propriétaire de l'invention. Les clauses financières de l'accord permettent de spécifier un montant fixe, mais elles peuvent aussi inclure des redevances, soit par unité produite, soit proportionnellement aux ventes réalisées sur l'invention.

• le brevet intervenant *ex post* dans le processus de recherche incite les firmes en concurrence pour l'innovation à dupliquer les dépenses de R&D (inefficience « amont ») ;

• le brevet et le droit d'exploiter monopolistiquement une invention créent une inefficacité dans le fonctionnement du marché ou sera exploitée l'invention (inefficience « aval ») ;

• la rémunération de l'effort de R&D de l'inventeur dépendant essentiellement de son savoir-faire commercial, le brevet peut transmettre des incitations biaisées. Toutefois, une firme spécialisée dans l'innovation peut tirer un bénéfice de son activité en cédant un brevet ou une licence à une firme spécialisée dans l'exploitation commerciale de l'innovation.

Bien que le brevet soit un moyen pour les firmes de révéler un indicateur de leur niveau d'activité inventive, il demeure une solution imparfaite aux problèmes d'incitation à l'innovation et propose un compromis entre l'octroi d'un monopole limité et l'obligation de divulgation de l'innovation. De nombreuses difficultés ressortent de la littérature standard sur les brevets révélant l'impossibilité pour les pouvoirs publics de promouvoir simultanément la création de nouvelles connaissances technologiques et leur diffusion. Le choix du régulateur public ne peut être qu'une solution de second rang puisqu'il doit fixer les trois dimensions socialement optimales du brevet à un niveau permettant de rémunérer l'innovateur tout en étant suffisamment incitatif.

* * *

Nous avons montré dans cette section que la théorie néo-classique n'abordait pas les politiques publiques d'innovation dans un cadre théorique unifié, mais qu'elle justifiait plutôt dans une approche «défensive », des interventions du régulateur public dans des cas précis de défaillances du marché. Nous avons pu discerner alors des mesures correctrices et incitatives agissant soit en amont, soit en aval du processus d'innovation. Parmi les premières, nous avons vu que les firmes ont généralement et dans les limites fixées par la politique de la concurrence, tout intérêt à coopérer pour leurs activités de R&D pour internaliser les externalités technologiques quand ces dernières sont élevées. De même les mesures d'aides publiques à l'innovation doivent sélectionner les projets ayant des taux de rendement sociaux élevés, tout en s'appuyant sur des contrats efficaces afin de dissuader les comportements opportunistes des firmes.

Parmi les secondes, il est ressorti que le brevet peut être un outil puissant d'incitation à l'innovation, même s'il constitue par définition une solution imparfaite.

Cependant, à ce stade, en poursuivant le raisonnement de cette approche et selon la qualification que nous avons donné aux technologies des énergies renouvelables[166] intégrant leur dimension environnementale, nous n'avons mis en évidence qu'une partie des défaillances qui peuvent freiner leur adoption. Ces échecs se manifestent dans la phase d'innovation et sont communs à tous les types de technologies. Mais la particularité des technologies environnementales est qu'elles produisent des externalités positives à la fois dans la phase d'innovation et dans la phase de diffusion/utilisation. Plus précisément, à la différence des technologies classiques concurrentes pour la production d'un même bien, les technologies environnementales permettent de limiter les coûts externes négatifs liés à leur utilisation. Il apparaît alors un problème de *double externalité* qui va encore accentuer les *désincitations* des firmes à opter pour une technologie environnementale.

[166] Cf. Chapitre 1.

Section 4. Fondements et portée des incitations à innover des instruments de politique environnementale

Les innovations environnementales possèdent la particularité de donner lieu à un problème de double externalité : les effets de retombée des nouvelles connaissances dissuadent les firmes d'investir de manière optimale dans la création de nouveaux savoirs et la qualité de bien public des avantages environnementaux qu'elles procurent fait que les firmes ne peuvent pas s'approprier entièrement le rendement des investissements environnementaux. Dans le modèle standard la correction de cette dernière distorsion va alors s'opérer indirectement par la mise en œuvre d'instruments de politique environnementale qui ont pour buts d'internaliser les effets externes négatifs induits par l'utilisation de technologies conventionnelles et de stimuler l'innovation et la diffusion de technologies plus propres. L'internalisation, en faisant apparaître les coûts de dépollution, est alors censée restaurer l'efficacité du système des prix et les conditions de la concurrence, en termes de coûts d'adoption et d'utilisation, entre toutes les technologies. Mais quelle est la portée en termes d'incitations à innover des instruments de politique environnementale ?

Dans cette section nous nous proposons de poser d'abord les fondements des instruments de politique environnementale tels qu'ils sont avancés par l'Economie de l'environnement. Nous reprendrons classiquement la dissociation entre les instruments réglementaires et les instruments économiques pour discuter de leur principe et de leur efficience en soulignant le rôle de l'incertitude. Ensuite, afin de chercher à éclairer plus directement notre problématique, nous discuterons les résultats des modèles théoriques traitant particulièrement des effets induits par les instruments de politique environnementale sur l'invention et la diffusion de technologies propres.

4.1. L'internalisation par la voie réglementaire

L'instauration des politiques environnementales à la fin des années 1960 dans les pays de l'OCDE s'est appuyée sur une approche réglementaire. Elle a souvent combiné l'adaptation des réglementations existantes avec la définition de nouvelles réglementations. Cette approche de *« command-and-control regulations »* qui reste la plus utilisée, passe par la promulgation et l'application de lois et des règlements qui

prescrivent des objectifs, des normes, des procédés et/ou des standards auxquels doivent se conformer les pollueurs. Les instruments réglementaires se fondent sur l'interdiction, l'obligation ou la limitation, ce qui correspond à un mode d'internalisation particulier s'appuyant sur la responsabilité civile du pollueur. Ces lois et règlements peuvent donc être analysés comme des incitations qui apportent une rationalité économique au respect des réglementations. En effet, les agents économiques font un arbitrage entre les coûts de mise en conformité et les coûts des pénalités, en intégrant dans leur calcul la probabilité d'un contrôle et la probabilité d'avoir à payer effectivement. L'efficacité des instruments réglementaires est donc étroitement liée au bon fonctionnement d'une police de l'environnement qui assure un contrôle direct de la pollution.

Le contrôle direct (« *direct regulation* ») implique la définition de normes[167] qui reposent sur des critères environnementaux, techniques (ou politiques) ne relevant pas du domaine de compétence de l'économiste. Les normes s'expriment par des seuils fixés pour assurer le bien-être des populations ou de l'activité économique. On dénombre habituellement quatre types de normes (BARDE [1992]) :

- *Les normes de qualité* : elles définissent des objectifs de qualité à atteindre en fixant les caractéristiques auxquelles doivent répondre les grands milieux physiques récepteurs des émissions polluantes ;
- *Les normes d'émission* : elles fixent un plafond maximal d'émissions polluantes que les agents économiques ne doivent pas dépasser sous peine de sanctions administratives, pénales ou financières, le cas limite étant la « norme zéro », c'est-à-dire l'interdiction pure et simple. Dans la mesure où les pollueurs ont économiquement intérêt à polluer (ils subissent un coût de dépollution), la norme assure qu'ils choisiront toujours exactement le niveau maximal de pollution autorisé. Si la norme est correctement fixée, l'objectif du régulateur est atteint. En revanche, si l'évaluation des coûts marginaux de dépollution et du dommage marginal est erronée, la norme est fixée à un niveau qui n'est pas l'optimum. Si elle est trop laxiste, le niveau de pollution sera trop élevé et les agents n'auront aucune incitation à réduire leur pollution. Si la norme est trop sévère, le niveau de pollution sera inférieur au niveau optimal, ce qui, d'un

[167] En plus des différentes normes, les instruments réglementaires comprennent également les procédures de planification pour localiser au mieux les activités polluantes, pour contrôler l'utilisation des sols, les systèmes d'autorisations préalables pour les activités économiques impliquant des produits potentiellement dangereux et les études d'impact qui imposent une analyse des conséquences environnementales d'installations futures.

point de vue de l'efficacité économique, n'est pas souhaitable, car elle engendrera un perte de bien-être social en imposant aux pollueurs un coût de dépollution excessif[168] ;

- *Les normes de produits* : elles définissent les caractéristiques des produits potentiellement polluants ou dangereux pour la santé. Bien que répandue, cette approche est lourde dans son application, car elle nécessite de raisonner industrie par industrie et produit par produit ;
- *Les normes de procédé* : elle définissent le procédé de fabrication ou de traitement des émissions polluantes. Leur définition soulève la question du choix de la technique de référence, ce qui implique la distinction de plusieurs catégories de normes de procédé (BONNIEUX et DESAIGUES [1998]). Ainsi, le dispositif le moins exigeant prescrira des procédés connus et déjà utilisés (*« current available technology »*) à l'ensemble des firmes, alors que le plus exigeant imposera des procédés utilisés par les firmes les plus performantes (*« best available technology »*) ou d'autres qui n'ont pas encore dépassé le stade expérimental (*« experimental standard approach »*). Enfin, la prescription de la meilleure technologie économiquement utilisable (*« best economically useful technology »)* fait intervenir les conditions économiques d'utilisation d'une technologie, ce qui équivaut à une détermination économique de la norme.

Les normes peuvent être choisies selon des critères environnementaux ou économiques. Dans le premier cas, elles visent le plus souvent des objectifs de protection de la santé. Dans le second cas, la fixation de la norme doit permettre d'atteindre un niveau de pollution optimale, ce qui implique une évaluation parfaite des dommages par les autorités. Mais le problème est également ici un problème d'asymétrie d'information. Le pollueur est rationnellement incité à tricher, dans la mesure où en ne respectant pas la norme il réduit ses coûts de dépollution. D'où la nécessité de contrôles rigoureux et fréquents, le problème de hasard moral posé ne pouvant être résolu que si le bénéfice marginal anticipé de la fraude est plus faible que le coût anticipé de la pénalité[169] (SINCLAIR-DESGAGNE et GABEL [1993, 1997]). Les normes de procédé sont ainsi préférables aux normes d'émission car il est plus facile de

[168] BAUMOL et OATES [1971] justifient ainsi une détermination « extra-économique », c'est-à-dire environnementale, de la norme.

[169] Le coût anticipé de la pénalité est égal au produit du montant effectif de la pénalité subie en cas de détection de la fraude et de la probabilité de contrôle.

contrôler l'existence d'un équipement spécifique de dépollution plutôt que de mesurer continuellement des émissions polluantes.

Un des principaux inconvénient des normes est leur incapacité, lorsqu'elles sont fixées à un niveau sous optimal, ce qui est courant, à inciter les agents à augmenter leur effort de dépollution et à innover. Leur avantage est qu'elles ne font subir aux pollueurs aucun autre coût que le coût de dépollution, c'est-à-dire le coût de mise en conformité avec la norme.

4.2. L'internalisation *via* les instruments économiques

Plusieurs types d'instruments économiques peuvent être envisagés pour réduire la différence entre les coûts privés et les coûts sociaux d'une activité. Leur logique est d'élever le coût des comportements polluants en laissant aux producteurs toute flexibilité pour trouver eux-mêmes les stratégies de contrôle de la pollution au moindre coût. Nous présenterons les fondements d'une régulation par les prix, avec la taxe et subvention, et d'une régulation par les quantités au moyen de quotas de permis d'émissions négociables (PEN).

4.2.1. La taxe pigouvienne

Pour PIGOU [1920] si l'activité d'une firme génère une nuisance qui affecte directement, et sans compensation possible par le marché, le bien-être d'autres agents économiques le coût marginal social de la production est plus élevé que le coût marginal privé, ce qui conduit à s'éloigner d'un optimum parétien. La solution pigouvienne consiste à donner un prix à la nuisance en faisant payer à son émetteur une taxe, ou une redevance[170], dont le montant est égal à la différence entre le coût social et le coût privé.

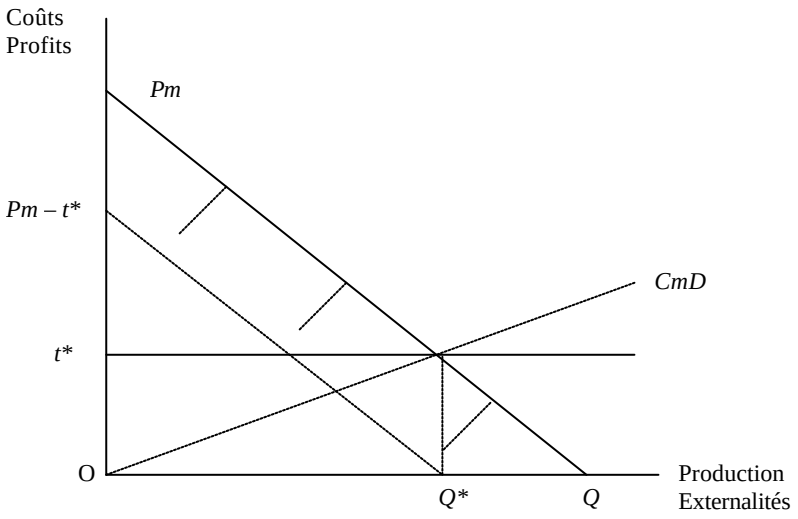
La représentation de la *Figure 1* ci-dessous par le graphique de TURVEY [1963] permet de visualiser l'optimum de production d'externalités à l'intersection de la courbe

[170] D'un point de vue économique il n'y a pas lieu de faire ici de différence entre une taxe et une redevance. D'un point de vue fiscal, la taxe, qui est un prélèvement sans contrepartie au profit de l'Etat ou des collectivités territoriales, le plus souvent non affecté, se distingue de la redevance qui est un prélèvement en contrepartie d'un service en proportion du versement et affecté à un objectif spécifique.

de profit marginal *Pm* d'une firme F et de la courbe de coût marginal de dommages *CmD* que subit un agent A. En l'absence de taxe, le niveau optimal de production, maximisant le profit de la firme, se situe au point *Q* et annule son profit marginal. Quand la firme doit s'acquitter de la taxe *t**, sa courbe de profit marginal se déplace vers la gauche. La courbe de coût marginal des dommages que subit A est une fonction croissante de l'activité de la firme. L'optimum de production et le niveau optimum des externalités correspondent au point d'intersection entre *Pm* et *CmD*. Il correspond au niveau de production *q** qui maximise le bien-être collectif. Au-dessus de *Q**, toute production supplémentaire fait supporter à la société un coût *CmD* supérieur au bénéfice de la production *Pm*, ce qui conduit à une diminution du bien-être collectif.

Lorsque on impose à la firme une taxe *t** par unité de pollution émise, on réduit d'autant son profit marginal. La nouvelle courbe de profit marginal *Pm – t** obtenue annule le nouveau profit marginal de la firme au point *Q** qui est défini comme l'optimum de production.

Figure 1. L'internalisation par la taxe et la production optimale
Source : d'après TURVEY [1963]



D'une part, la taxe pigouvienne est efficace car elle conduit à l'égalisation des coûts marginaux de dépollution. Cette égalisation permet de minimiser la somme des coûts de dépollution pour atteindre un résultat environnemental donné, c'est le principe d'équimarginalité. Il repose sur le fait qu'une taxe peut différencier les objectifs privés de dépollution selon l'efficacité des firmes en matière de dépollution. Pour un même

niveau de taxe, les firmes les plus efficaces, celles dont le coût de dépollution est le plus faible, iront plus loin dans la dépollution que les firmes moins efficaces.

D'autre part, la taxe pigouvienne est efficace car elle permet d'obtenir un niveau de pollution qui égalise les coûts marginaux de dépollution avec le dommage marginal. Elle permet donc d'obtenir la quantité de pollution socialement efficace. Mais ces remarques ne valent que dans le cas d'un raisonnement en situation d'information parfaite. Pour déterminer la taxe optimale, le réglementeur doit connaître toutes les variables concourrant à définir l'optimalité, c'est-à-dire tous les coûts privés et la fonction de dommage. Dans la pratique, il en découle que les taxes environnementales instaurées dans la plupart des pays ne correspondent pas à la taxe pigouvienne : elles en diffèrent tant par leurs taux, souvent inférieurs au taux pigouvien pour exercer une forte incitation à l'adoption de comportements de dépollution, que par leur assiette qui doit être liée le plus étroitement possible à l'externalité pour être efficace (BURGENMEIER [1997]).

La solution proposée par PIGOU pour internaliser la différence entre le coût social et le coût privé a reçu deux principales critiques théoriques de la part de plusieurs auteurs (COASE [1960], BUCHANAN et STUBBLINE [1962], DALES [1968]).

La première critique, concerne l'inefficacité parétienne de la taxe pigouvienne avec la question de l'indemnisation des victimes. Le relecture des textes de PIGOU [1920] n'a pas permis de trancher l'ambiguïté de sa position quant à la question de l'indemnisation. Dans tous les cas, l'instauration d'une taxe sur un pollueur ne permettra d'atteindre une situation PARETO optimale que si elle est associée à une indemnisation des victimes par une subvention calculée à partir des coûts induits par les externalités (BUCHANAN et STUBBLINE [1962]). En effet, la taxe pigouvienne peut conduire à une distorsion si l'allocation optimale des ressources qui maximise la somme algébrique des pertes du pollué et des gains du pollueur est différente de celle qui maximise la somme des pertes du pollué, des gains du pollueur et de la charge de la taxe que ce dernier doit supporter (TURVEY [1963]).

La seconde critique dénonce le caractère unilatéral des externalités et soulève le problème de la réciprocité. En effet, la taxation de la pollution émise par un pollueur lui attribue la responsabilité des dommages et écarte en même temps tout problème de réciprocité. COASE [1960] pose la question de savoir qui, de celui qui émet ou reçoit l'externalité, doit supporter l'internalisation des coûts, ce qui a pour effet de transformer

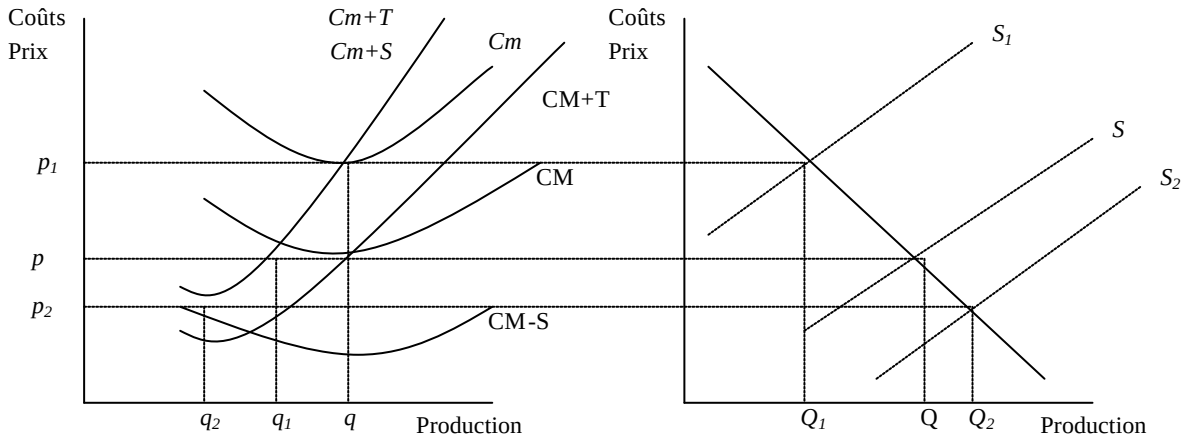
un problème d'allocation des ressources en un problème d'équité et de définition de droits de propriété. Pour le cas des externalités négatives, il introduit la possibilité de deux paiements symétriques : un paiement compensatoire de l'émetteur à la victime, et un paiement «dissuasif » de la victime potentielle à l'émetteur potentiel. Ainsi, si on considère que la firme est propriétaire des ressources, le récepteur de l'externalité doit lui reverser une subvention.

4.2.2. Comparaison de la taxe et de la subvention

L'analyse de COASE sur la taxe ou la subvention se situe plus dans la cadre d'une négociation bilatérale directe entre les agents, que dans un schéma nécessitant le recours à l'Etat. Il est possible de considérer le cas où la victime potentielle verse à une firme une subvention égale au gain social afin qu'elle s'abstienne de polluer.

Figure 2. Comparaison de la taxe et de la subvention au niveau de la firme et de la branche

Source : d'après FAUCHEUX et NOËL [1995]



Une subvention d'un montant *S* est établie par unité de pollution éliminée, avec S (N_1 - N_2), N_1 étant le niveau de pollution maximum fixé, et N_2 le niveau de pollution auquel la firme s'apprête à polluer. Sur la *Figure 2* le premier graphique représente la situation de la firme, le second la situation de la branche. Les couples d'équilibre des valeurs de prix et de quantités (p, q) pour la firme et (P, Q) pour la branche, correspondent pour la firme à l'intersection du minimum du coût moyen et du coût

marginal, et l'offre agrégée pour la branche. L'établissement d'une taxe conduit à déplacer vers le haut les courbes de coûts moyens et de coût marginal. Pour la firme, le nouvel équilibre de court terme, obtenu à l'intersection du prix p et du nouveau coût marginal augmenté de la taxe ($Cm+T$), détermine la nouvelle quantité de production q_1. Comme le prix est désormais situé en dessous du nouveau coût moyen ($CM+T$), un nouvel équilibre de long terme s'établit par une sortie des firmes de la branche au prix p_1 et à la quantité Q_1, et au prix p_1 et à la quantité q pour la firme, la courbe d'offre agrégée se déplaçant vers la gauche en S_1.

En raison de l'asymétrie sur le coût marginal et sur le coût moyen l'effet d'une subvention est plus complexe à analyser. Pour la firme, la courbe de coût marginal intégrant la subvention ($Cm+T$) se positionne au même niveau que la courbe de coût marginal intégrant la taxe[171], une augmentation de la production de la firme correspondra à une réduction de la subvention, par contre le coût moyen diminuera sous l'effet de la subvention. Pour la firme, l'équilibre de court terme (p, q_1) sera le même que dans le cas de la taxe, mais l'équilibre de long terme (p_2, q_2) sera différent : le prix étant situé au-dessus du coût moyen, des firmes vont entrer dans la branche et la courbe d'offre agrégée va se déplacer vers la droite en S_2.

Ainsi, si pour une firme la subvention conduit à une diminution de la production et donc de la pollution, au niveau de la branche, *ceteris paribus*, elle amène à une augmentation de la production et de la pollution, ce qui est un résultat différent de l'instauration d'une taxe.

4.2.3. Les systèmes de permis d'émission négociables

L'absence de marché pour les biens environnementaux conduit à une allocation imparfaite des ressources naturelles et des facteurs de production polluants. Une autre solution d'internalisation consiste à définir un marché là ou il n'en existe pas *a priori* et à laisser jouer les mécanismes de la concurrence. Nous présenterons le système des permis d'émission négociables en rappelant au préalable la filiation de ce système avec la solution de la négociation proposée par COASE [1960].

[171] Si le montant absolu de la subvention est le même que celui de la taxe.

4.2.3.1. Le « théorème » de COASE

Pour COASE [1960] la présence d'externalités est la conséquence de l'inexistence de droits de propriété sur les ressources environnementales. Critiquant le caractère unilatéral de la solution fiscale pigovienne, son « théorème » postule qu'en l'absence de comportements opportunistes des agents[172] et de coûts de transaction[173] liés à l'organisation du marchandage, l'internalisation des externalités peut s'effectuer, sans intervention de l'Etat, dans le cadre d'une négociation volontaire entre l'émetteur et la victime d'une pollution par la définition de droits de propriété sur les biens porteurs d'externalités. La négociation bilatérale entre l'émetteur et le récepteur d'externalités est envisagée autour de deux variantes symétriques :

- l'émetteur de l'externalité verse une indemnité compensatoire au récepteur, propriétaire des ressources, pour les dommages qu'il subit ;
- le récepteur verse à l'émetteur, propriétaire des ressources, une somme afin qu'il diminue son niveau de production et de pollution ou qu'il s'équipe en installations de dépollution.

La variante qui se réalise pour une négociation dépend de l'allocation initiale des droits de propriété entre les parties, ce qui en même temps équivaut à appliquer *a priori* une règle de responsabilité. Quelle que soit la variante retenue et quelle que soit l'allocation initiale des droits de propriété, la négociation dépend de la disposition à payer d'un agent et de la disposition à recevoir d'un autre et son résultat détermine un niveau optimal de production d'externalité. La réalisation de l'échange garantit l'efficacité de la solution. Son résultat est indépendant de la distribution initiale des droits de propriété, mais pas de la répartition des richesses (TURVEY [1963]). Le problème posé par les externalités n'est donc pas un problème d'efficacité mais d'équité.

Le « théorème » attribué à COASE n'est en fait qu'une série d'interprétations et de prolongements, dont les premiers effectués par STIGLER [1966], qui ont suivi la

[172] Des comportements opportunistes ouvriraient la possibilité que les agents ne parviennent pas à se mettre d'accord, ce qui leur serait pourtant mutuellement favorable.

[173] Dans la négociation, les coûts de transaction englobent les coûts liés à l'identification des partenaires de l'accord, à la rédaction du contrat, au suivi de sa bonne exécution et à la mise en place d'un système de sanction en cas de défection des agents.

parution de son article en 1960. Ces analyses se rejoignent toutes sur deux points : l'efficience de l'allocation finale des ressources et l'indépendance du résultat final de la négociation par rapport à l'allocation initiale des droits de propriété.

Le «théorème » et ses interprétations ont reçu deux sortes de critiques pointant ses limites (LEVEQUE [1998]). La première concerne l'indépendance de la distribution initiale des droits de propriété par rapport à l'allocation finale et la présence d'effets de revenu. Quand l'utilité marginale du revenu décroît, l'attribution des droits de propriété au pollueur ou au pollué se traduit par des niveaux de pollution différents. Le consentement à payer pour éviter une pollution n'est en effet pas égal au consentement à recevoir pour l'accepter. Le consentement à payer est contraint par le revenu disponible et il est donc généralement inférieur au consentement à recevoir. Si la partie qui n'est pas propriétaire des droits n'a pas la capacité de payer de compensation au propriétaire, il ne peut pas y avoir d'égalité entre les consentements à payer et à recevoir. L'optimum de pollution n'étant pas réalisé, la dotation initiale des droits de propriété a bien une conséquence sur le résultat final.

La deuxième limite provient de la référence théorique à une économie de coûts de transaction nuls. Ne pas considérer les coûts de transaction conduit à éliminer les institutions de l'analyse et à raisonner comme si les agents n'étaient pas contraints dans leur marge de manœuvre. COASE [1997][174] lui même dans son analyse des institutions infirmera l'hypothèse de coûts de transaction nuls et rejettera le théorème portant son nom. La référence à une économie sans coût de transaction supprime l'existence des externalités et retire en même temps la raison d'être de la recherche de solution d'internalisation (DIXIT et OLSON [2000]). Si les coûts de transaction sont nuls, il n'y a aucun obstacle pour les échanges et les agents réalisent continuellement des transactions. Dès lors qu'un gain mutuel peut être partagé, ils se mettent en contact et

[174] « *J'ai montré dans 'La nature de la firme'* (COASE [1937]) *qu'en l'absence de coûts de transaction il n'y a pas de fondement économique qui justifie l'existence de l'entreprise. Ce que j'ai montré dans 'Le problème du coût social'* (COASE [1960]), *c'est qu'en l'absence de coûts de transaction (…) les institutions qui façonnent le système économique n'ont ni substance, ni objet. (…) Mon argument suggère qu'il est nécessaire d'introduire explicitement des coûts de transaction positifs dans l'analyse économique pour étudier le monde tel qu'il existe.* » (COASE [1997, p. 14]).

concluent instantanément un accord, aucune externalité[175] n'est susceptible alors de se manifester.

4.2.3.2. La création d'un système de permis d'émissions négociables (PEN)

Reprenant l'analyse coasienne, DALES [1968] donne une explication de l'existence des externalités par l'absence ou la mauvaise définition de droits de propriété sur les biens. Plus précisément les externalités négatives liées à la pollution résultent de l'absence de droits de propriété sur les biens environnementaux (l'eau, l'air, le sol). Pour faire l'objet d'un échange marchand dans un marché concurrentiel, les droits de propriété doivent être exclusifs et transférables, et présenter quatre caractéristiques :

- *l'universalité* : les ressources doivent faire l'objet d'une appropriation privative et les titres de propriété correspondants doivent être parfaitement définis ;
- *l'exclusivité* : l'échange marchand fait supporter les coûts et attribue les bénéfices au propriétaire des ressources ;
- *la transférabilité* : tous les droits sont librement transférables *via* un échange volontaire ;
- *l'applicabilité* : les droits de propriété doivent être protégés des appropriations indues.

Si les biens environnementaux font l'objet de droits de propriété exclusifs et transférables, les externalités peuvent être traitées par la négociation coasienne décentralisée. Dans le cas contraire, la solution de DALES est d'établir un faisceau de droits de propriété exclusifs et transférables sur les biens sources d'externalités. Ces droits de propriété, droits à émettre une quantité de pollution, font l'objet d'un échange marchand sur un marché concurrentiel. Mais l'intégration des externalités dans le marché, qui par définition sont hors marché, n'est pas spontanée et fait appel ici à

[175] Nous nous référons ici aux externalités « PARETO pertinentes » (*« Pareto relevant »*), c'est-à-dire aux externalités dont la correction améliore le bien-être social. Dans la référence à une économie de coûts de transaction nuls, les seules externalités possibles sont celles qui, si elle étaient corrigées, entraîneraient une diminution du bien-être collectif.

l'intervention de la puissance publique dans la conception et la mise en œuvre du dispositif. Celui-ci peut être schématisé en trois étapes :

- *la fixation d'un plafond global de pollution* : alors que l'instauration d'une taxe s'inscrit dans une approche par les prix, un système de PEN relève d'une approche par les quantités. L'Etat, ou l'autorité de tutelle du marché, fixe le nombre total de permis d'émission qui pourront être échangés pendant une période donnée. Ce plafond d'émission fixé selon des considérations scientifiques (concentration de pollution dans un milieu) ou politiques (affichage de l'engagement dans une politique environnementale) ne correspond au niveau de pollution optimale que si l'Etat dispose de l'ensemble des informations concernant les coûts de la pollution et de la dépollution ;
- *la répartition des permis entre les agents concernés par l'externalité* : elle est réalisée par l'autorité publique selon différentes modalités. Les droits à polluer peuvent être mis aux enchères sur une place boursière, le prix qui se fixe alors reflète théoriquement le consentement à payer des agents[176] pour la diminution de la pollution qui sert d'assiette au système. Les permis peuvent également être vendus à un prix initial fixé à l'avance[177]. La dernière option consiste à attribuer périodiquement et gratuitement des permis aux agents, par exemple au *prorata* de leurs émissions passées (« règle du *grandfathering* ») ce qui produit un effet distributif immédiat ;
- *l'autorisation d'échange des permis* : la création d'un système de PEN consiste à autoriser et organiser les achats et les ventes dans un cadre réglementaire garantissant la sincérité des échanges (délimitation géographique, mesure de la pollution, sanctions applicables). La confrontation de l'offre et de la demande permet de fixer un prix des permis. Tant que le coût marginal de dépollution est inférieur au prix du permis, les agents choisiront de réduire leurs émissions en optant pour une technologie propre, plutôt que d'acheter un permis. A l'équilibre, le coût marginal de dépollution est égal au prix du permis et il est indifférent pour les agents d'acheter un permis supplémentaire ou de réduire la pollution d'une unité supplémentaire. L'activité du marché et la création d'une offre et d'une demande impliquent des coûts marginaux

[176] La révélation des préférences individuelles devient problématique quand la perception des enjeux liés à la pollution est occultée par les différentes dimensions du phénomène, notamment l'échelle temporelle.

[177] Dans ces deux premiers cas, l'allocation initiale des permis fait apparaître un double dividende, la réduction de la pollution et un montant de recettes publiques collectées, avec un effet redistributif puisque s'opère un transfert monétaire des pollueurs vers la collectivité, ce qui signifie implicitement que les droits sur l'environnement appartiennent à cette dernière qui fait payer pour son utilisation.

de dépollution hétérogènes[178]. Les agents vont aligner leurs coûts marginaux de dépollution sur le prix des permis, ce qui va conduire à l'égalisation de tous les coûts marginaux de dépollution individuels. L'objectif de dépollution est alors atteint au moindre coût.

4.2.4. Approche par les prix *versus* approche par les quantités : le rôle de l'incertitude

Le double objectif assigné aux politiques environnementales exige que soient évaluées parallèlement leur efficience environnementale et leur efficience économique. En théorie, en situation d'information parfaite et en l'absence d'incertitude, c'est-à-dire si les fonctions de dommages et de coûts de dépollution sont parfaitement connues et si les instruments sont parfaitement appliqués, les deux modes de régulation, par les prix et par les quantités, sont équivalents du point de vue de l'efficacité : efficacité environnementale puisque l'optimum de pollution est atteint, efficacité économique sous la condition que la régulation par les quantités (la fixation d'un plafond d'émissions allouées aux enchères) prévoit la possibilité d'échanger des quotas et donc une allocation par le marché[179], moins exigeante en information qu'une individualisation des normes.

En revanche, en univers incertain, les deux modes de régulation, par les prix (taxe) et par les quantités (norme ou permis négociables), ne sont plus équivalents. L'incertitude porte soit sur le bénéfice marginal de réduction des externalités, soit sur le

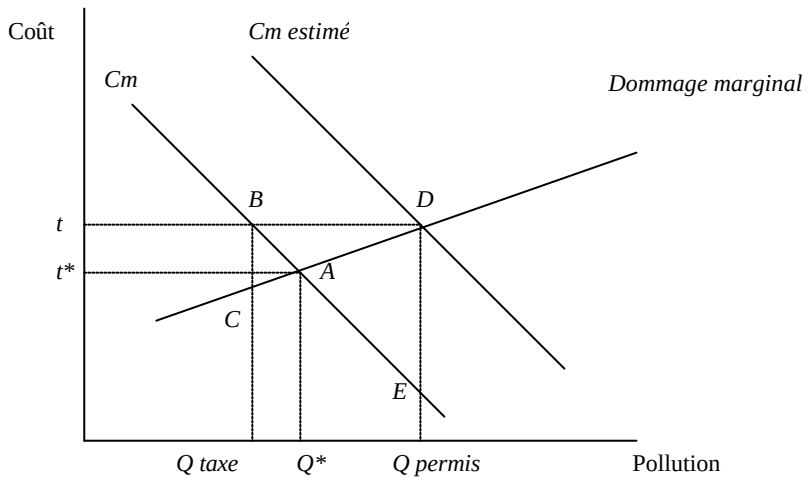
[178] Initialement, les agents qui ont un coût marginal de dépollution inférieur au prix du permis seront potentiellement vendeurs, et ceux qui initialement ont un coût marginal de dépollution supérieur au prix du permis seront potentiellement acheteurs de permis.

[179] Sous les hypothèses habituelles de concurrence pure et parfaite, le taux de taxe qui conduit à l'émission retenue est égal au prix d'équilibre du système de PEN créé dans le cadre de cette limite d'émissions. En univers certain, il a été démontré qu'à chaque modalité initiale d'allocation des permis correspond une taxe ou une combinaison entre une taxe et une subvention qui conduit au même niveau d'émissions (PEZZEY [1992]). Ainsi, une allocation initiale gratuite de type « *grandfathering* » équivaut à une taxe combinée avec un abattement calculé en fonction des émissions passées, et avec une subvention lorsque les émissions sont inférieures au volume des permis qui auraient été alloués à l'entreprise en cas de création du système de PEN.

coût marginal des dommages[180]. Dans un article fondateur WEITZMAN [1974] a montré que, pour réguler une pollution quelconque, le choix entre une taxe et un système de permis négociables, peut être réalisé en comparant les pentes respectives de la courbe agrégée de dommage marginal et de la courbe agrégée de coût marginal de dépollution. Le critère de choix retenu est celui de la minimisation de l'espérance de perte de bien-être[181].

Supposons par exemple que l'incertitude sur la courbe de coût marginal de dépollution et que les pouvoirs publics cherchent à atteindre le niveau optimal de pollution.

Figure 3. Comparaison de la taxe et d'un système de permis d'émission en situation d'incertitude



Théoriquement, dans une démarche de premier rang le régulateur devrait instaurer une taxe au taux t^*, ou dans un système de PEN devraient choisir une quantité Q^*. Lorsque la pente de la courbe du coût marginal de dépollution est beaucoup plus élevée que celle du dommage marginal, l'instauration d'une taxe permet de minimiser

[180] La connaissance du dommage de la pollution est particulièrement difficile pour le régulateur. Cette information est très atomisée car elle peut être supportée par un grand nombre d'individus et elle est difficilement évaluable sous sa forme monétaire.

[181] Le raisonnement relève d'une approche classique de la décision en univers incertain à la VON NEUMAN-MORGENSTERN.

l'espérance de perte de bien-être. Dans le cas inverse, quand la pente de la courbe de dommage marginal est plus élevée que celle du coût marginal de dépollution, selon le critère de minimisation de l'espérance de perte de bien-être, la création d'un système de PEN est préférable.

La *Figure 3* à la page précédente illustre le premier cas, où l'incertitude pour le régulateur ne porte que sur le coût de dépollution, le pollueur étant unique, son coût marginal de dépollution étant Cm. Dans l'incertitude, le régulateur fait une estimation du coût de dépollution $Cm_{estimé}$ qui a de fortes chances d'être différente de la vraie courbe. Sur cette base, il fixe une taxe t ou une quantité Q de permis, pour atteindre le niveau optimal de pollution tel qu'il l'a estimé. Mais la vraie courbe de coût marginal de dépollution est Cm. Les deux instruments impliquent des pertes de bien-être représentées par la surface *ABC* pour la taxe, et par la surface *ADE* pour le système de permis. Sur cet exemple, la perte associée à un système de PEN est plus importante que celle liée à une taxe. Il est alors rationnel de choisir de mettre en œuvre la taxe.

Les différences de résultat entre la taxe et un système de PEN en situation d'incertitude sur les coûts et les dommages sont liées à la variable que contrôle le régulateur. Pour la taxe, c'est le taux de taxe qui est homogène à un prix, pour les permis, c'est la variable quantité, soit le nombre de permis.

4.2.5. Les instruments de politique environnementale : quel impact sur l'innovation technologique ?

Après avoir présenté les fondements théoriques des instruments de politique environnementale, il nous importe maintenant de déterminer dans quelle mesure ils peuvent stimuler l'innovation et la diffusion de nouvelles technologies moins polluantes. Même si une telle dissociation peut apparaître quelque peu artificielle, car peu claire dans la littérature, nous aborderons d'abord les incitations à *inventer*, puis les incitations à *adopter* une nouvelle technologie.

4.2.5.1. L'impact des instruments de politique environnementale sur l'invention

Une partie de la littérature théorique traitant des effets des politiques environnementales sur l'innovation analyse en premier lieu la partie « amont »

(*« technology push »*) du processus innovatif à travers les incitations jouant sur les décisions des firmes à engager des dépenses de R&D. Ces travaux s'appuient sur la notion de progrès technique induit (endogène) par la variation des prix relatifs des facteurs de production proposée dans la théorie de la croissance de HICKS [1932][182] et transposée initialement dans la modélisation microéconomie par KAMIEN et SCHWARTZ [1968].

MAGAT [1979] a comparé les effets induits par l'instauration d'une taxe, d'une subvention, d'un système de PEN, de normes d'émission et de procédé, et a montré que tous les instruments sauf les normes de procédé devraient inciter à innover afin de réduire les émissions de polluants. Si les taxes et les PEN sont fixés de manière à conduire à la même réduction d'émissions qu'une norme d'effluent, les trois instruments sont susceptibles de fournir les mêmes incitations à innover.

FISCHER *et al.* [2003] proposent la comparaison d'une taxe sur les émissions et des systèmes de PEN (gratuits et aux enchères) en fonction de leurs effets sur l'innovation et le bien-être. Les auteurs cherchent à classer ces instruments à partir de quatre critères : le montant des dépenses de R&D engagées par les firmes, la possibilité pour les firmes d'adopter l'innovation en l'imitant[183], le degré de la pente de la courbe des bénéfices environnementaux et le nombre de firmes pollueuses. Le modèle

---

[182] HICKS [1932] s'intéresse au problème de la répartition du revenu national et s'interroge sur l'effet du progrès technique sur la répartition entre revenus du capital et revenus du travail. Un entrepreneur n'adoptera une invention que si elle augmente son profit en réduisant ses coûts de production. Pour une quantité d'*output* inchangée, il utilise donc une quantité inférieure de ressources. Les ressources ainsi dégagées peuvent être utilisées de deux manières différentes. Si la demande du bien auquel correspond l'invention est élastique, les ressources permettent d'augmenter l'offre de ce produit. Si la demande est inélastique, l'offre d'autres biens progresse. Dans les deux cas on observe une augmentation du revenu national. Cependant, il n'y a *a priori* aucune raison pour que l'innovation permette de libérer des quantités des différentes ressources dans les mêmes proportions. En conséquence HICKS distingue trois cas, selon l'effet initial de l'innovation sur le rapport du produit marginal du capital au produit marginal du travail. L'invention est dite *« labour saving »*, « neutre » ou *«capital saving »* selon que ce ratio croît, reste constant ou diminue. La tendance observée par l'auteur est que le travail devient plus cher par rapport au capital, ce qui conduit les firmes à développer des inventions qui économisent du travail.

[183] Les auteurs font l'hypothèse qu'une seule firme innovatrice brevète son innovation. Cependant, compte tenu des *spillovers* son appropriation n'est pas parfaite, et les autres firmes réalisent un arbitrage entre le montant des dépenses engagées pour imiter l'innovation « autour du brevet » et le paiement d'une licence à la firme innovatrice.

considère un nombre fixe *n* de firmes en concurrence pure et parfaite[184] parmi lesquelles une seule firme innove. Il s'organise en trois étapes : (i) la firme innovatrice choisit le montant de son investissement en R&D pour développer une technologie propre ; (ii) les autres *n-1* firmes décident soit d'adopter l'innovation en payant une licence d'exploitation à la firme innovatrice, soit de copier (imparfaitement) l'innovation, soit de ne rien faire ; (iii) à partir d'un niveau de taxe ou d'un prix du permis donnés[185], les *n* firmes réduisent au minimum leurs dépenses de dépollution en égalisant leur coût marginal au prix de la pollution. Les mesures de politique environnementale choisies peuvent influencer les décisions des firmes à travers quatre effets : (i) un effet sur le coût de réduction des émissions (*« abatement cost effect »*), traduisant l'impact de l'innovation sur le coût marginal de diminution des émissions ; (ii) dans le cas d'un système de PEN vendus aux enchères, il existe un effet lié au paiement des émissions (*« emissions payment effect »*) quand la baisse du coût marginal de dépollution apportée par l'innovation provoque une diminution du prix d'équilibre sur le marché des permis[186] ; (iii) un effet d'imitation ; (iv) un effet sur le prix d'adoption de l'innovation, à travers le paiement de la licence.

[184] Nous avons vu *infra* que la littérature de l'économie industrielle standard sur l'innovation se concentre sur les modèles stratégiques d'oligopoles dans lesquels les effets de rente du « premier arrivé » et de préemption sont importants. Les hypothèses posées dans ces modèles ne sont pas reconductibles dans le domaine environnemental où un grand nombre de firmes sont concernées par les émissions polluantes.

[185] Le modèle est résolu à rebours. Les instruments de politique environnementale sont définis avant le processus d'innovation, bien que leur mise en œuvre (y compris la mise aux enchères des permis) intervienne dans la dernière étape du modèle.

[186] Lorsque les firmes doivent acheter des permis pour couvrir leurs émissions, elles réalisent un gain quand le prix des permis baisse. Cet effet est absent au niveau de l'ensemble des firmes quand les permis sont attribués gratuitement puisque les gains et les pertes des acheteurs nets et des vendeurs nets de permis se compensent. Si la firme innovatrice peut s'approprier les gains de l'effet de paiement d'émissions, ou une partie fixe de ces gains, qui autrement reviennent aux autres firmes, le bénéfice privé de l'innovation pour des permis vendus aux enchères est plus important que pour les permis attribués gratuitement, et encore plus important que dans le cas d'une taxe.

Tableau 2. Déterminants des incitations à innover selon les instruments de politique environnementale

Source : d'après FISCHER et al. *[2003]*

Effets	Taxe sur les émissions	Permis négociables attribués gratuitement	Permis négociables attribués aux enchères
Coût de réduction des émissions	+	+	+
Imitation	-	-	-
Paiement des émissions	0	0	+
Prix d'adoption de l'innovation	0	-	-

Aucun des trois instruments n'affiche des effets incitatifs largement supérieurs aux autres et leur classement relatif dépend des critères initialement retenus. Les incitations à innover sont toujours les plus faibles dans le cas d'un système de PEN attribués gratuitement. Pour un assez grand niveau de réduction d'émissions et lorsque les possibilités d'imitation sont faibles une taxe conduit à un plus grand niveau d'innovation que des permis vendus aux enchères. L'évaluation des politiques en terme de bien-être est plus difficile puisqu'elle dépend de la divergence par rapport à la situation optimale. Lorsque la courbe des bénéfices environnementaux a une allure « aplatie », quel que soit le degré d'imitation, seule la taxe conduit à une situation optimale. Plus généralement, plus la pente de la courbe des bénéfices environnementaux est élevée, plus les gains de bien-être sont importants avec un système de PEN plutôt qu'avec une taxe.

Dans l'initiation d'une approche correctrice des externalités qui se veut plus large, CARRARO et SINISCALCO [1994] suggèrent, de manière non formalisée et tout en reconnaissant la difficulté de la question, de combiner les instruments de la politique environnementale avec ceux de la politique d'innovation. Ainsi dans le cas d'une course au brevet d'une nouvelle technologie environnementale, l'association d'une taxe sur les émissions et d'une subvention à l'innovation, doit permettre de raccourcir la période privée optimale de développement de l'innovation pour la rapprocher de la période sociale optimale. Pareillement, pour inciter à adopter une technologie propre déjà disponible, une subvention couvrant une partie des frais fixes d'installation peut être plus efficace qu'une taxe sur les émissions limitant la production et pénalisant la compétitivité d'une firme.

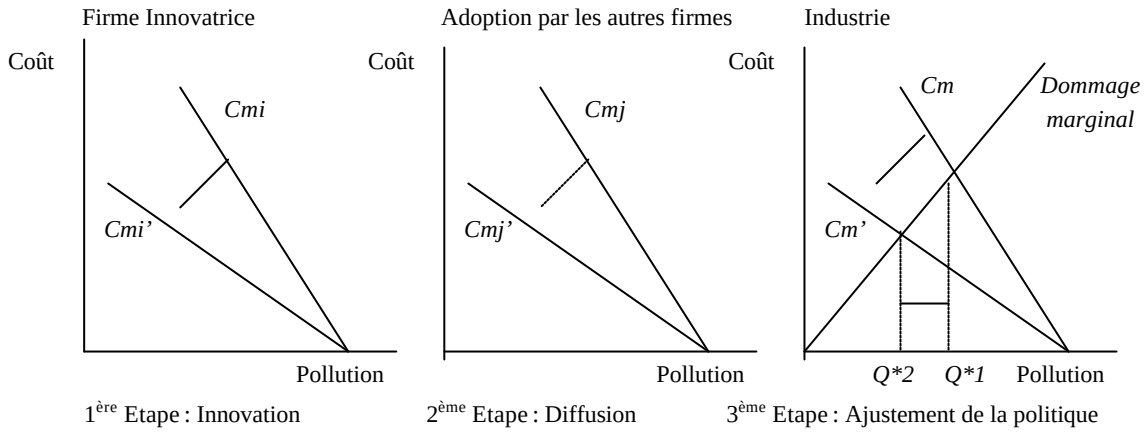
4.2.5.2. L'impact des instruments de politique environnementale sur l'adoption et la diffusion des innovations

La principale branche de la littérature théorique traitant des effets de la politique environnementale sur l'innovation retient le modèle d'un choix discret d'une technologie : les firmes réalisent leur choix en observant les coûts liés à l'utilisation d'une technologie réductrice du coût marginal de dépollution. Ces modèles, parfois présentés comme des « modèles d'innovation », s'apparentent plutôt à des modèles d'adoption et de diffusion des technologies environnementales.

La contribution de référence de MILLIMAN et PRINCE [1989] compare les incitations pour les firmes à adopter une innovation dans les cas de l'établissement d'une taxe, d'une subvention, d'une norme et de systèmes de PEN attribués gratuitement ou vendus aux enchères[187]. Leur but est d'établir un classement relatif de ces instruments en fonction de leur degré de stimulation du changement technologique mesuré par la baisse du coût de dépollution. Les auteurs retiennent les hypothèses d'un marché parfait et d'une information parfaite, la R&D n'est pas modélisée et l'innovation non brevetée. Le changement technique induit par les politiques environnementales suit un processus en trois étapes : l'innovation, la diffusion et l'ajustement de la politique du régulateur.

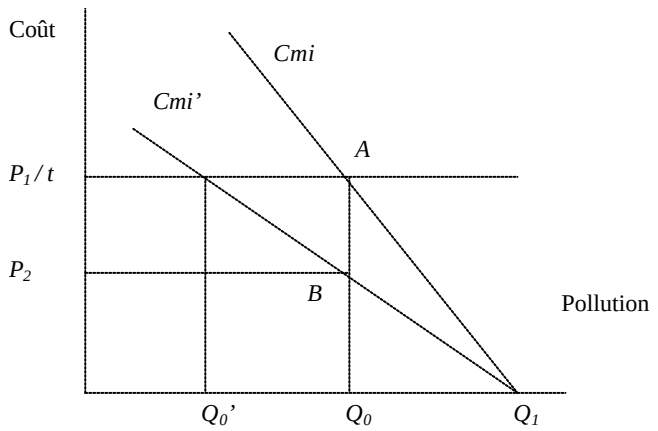
[187] Concernant les systèmes de PEN, les auteurs font l'hypothèse d'une relation négative entre le niveau de diffusion de la technologie et le prix du permis, puisqu'une baisse du coût marginal de dépollution entraîne une baisse de la demande de permis. Compte tenu d'une offre totale de permis égale au plafond de pollution pour l'ensemble des pollueurs, le prix d'équilibre sur le marché des permis est supposé diminuer après l'adoption de la nouvelle technologie.

Figure 4. Les trois étapes du cycle d'innovation
Source : d'après MILLIMAN et PRINCE [1989]



• *1ère Etape Innovation* : Le régulateur choisit un instrument de politique environnementale et un niveau d'application, sans connaître les caractéristiques d'une nouvelle technologie et sans même anticiper qu'une nouvelle technologie puisse être disponible dans le futur. La firme innovatrice *i* a un coût marginal de dépollution initialement représenté par *Cmi.* En innovant son coût marginal s'abaisse de *Cmi* à *Cmi'*. Lors de l'innovation, tous les instruments économiques fournissent des gains supérieurs, ou au moins équivalents, à la norme. L'utilisation d'un instrument économique permet de réduire la pollution et de dégager un bénéfice financier (économie sur le montant de taxe payé, revente des permis non utilisés) ce qui exerce un effet beaucoup plus incitatif que la norme. La *Figure 5* ci-dessous comparant l'effet d'une taxe et d'une norme permet d'illustrer cet argument.

Figure 5. Comparaison de l'incitation à innover dans le cas d'une norme et d'une taxe



L'objectif de réduction de la pollution de Q_1 à Q_0 peut être atteint soit par l'application d'une norme, soit par l'instauration d'une taxe au taux t. En innovant la firme *i* abaisse son coût marginal de dépollution, ce qui graphiquement se traduit par un déplacement de *Cmi* à *Cmi'*. Dans le cas d'une norme d'émission, la firme n'est pas incitée à faire mieux que la norme fixée. Quand son coût marginal de dépollution diminue, elle bénéficie d'une réduction de son coût total de dépollution qui passe de AQ_0Q_1 à BQ_0Q_1. Par contre, dans le cas d'une taxe (ou d'une subvention équivalente), elle est incitée à ajuster ses émissions polluantes aux nouvelles données qu'elle va intégrer dans son calcul économique. Elle a désormais intérêt à dépolluer jusqu'en Q_0' puisque le taux de la taxe t est devenu, pour la quantité de pollution émise Q_0Q_0', supérieur au coût marginal de dépollution. Contrairement à la norme, une taxe ou une subvention incitent à réduire la pollution et le progrès technique bénéficie non seulement aux pollueurs, par le biais d'une diminution de coût, mais aussi aux pollués par une amélioration de la qualité de l'environnement.

• *2ème Etape Diffusion* : Les firmes *j*, initialement non innovatrices, adoptent progressivement l'innovation réalisée par la firme *i*, ce qui abaisse également leur courbe de coût marginal de *Cmj* à *Cmj'*. En présence d'un système de PEN, seule une procédure de mise aux enchères entraînera une baisse de coût pour le pollueur innovateur et les autres firmes. La demande de permis diminue et engendre une baisse des permis de P_1 à P_2, *B* étant le nouveau point d'équilibre[188]. Pour un système de PEN alloués gratuitement, où les transactions se font ensuite au sein de l'industrie et non plus entre le régulateurs et les firmes, la firme innovatrice, dont le coût de dépollution baisse, est vendeuse et la diminution du prix lui est donc défavorable.

• *3ème Etape Ajustement optimal de la politique par le régulateur* : L'innovation s'est totalement diffusée dans l'industrie ce qui conduit à faire basculer la courbe de coût agrégé de dépollution de *Cm* à *Cm'*. Ce nouveau contexte impose un réajustement à la hausse des paramètres environnementaux de la politique par le régulateur afin de retrouver une égalisation du coût marginal *Cm'* et du dommage marginal, ce qui a pour effet de générer des pertes pour l'innovateur quel que soit l'instrument utilisé.

[188] Le nouveau point d'équilibre *B* correspond au point d'intersection de la droite d'offre de permis (verticale issue de P_0) et de la droite de demande représentée par la nouvelle fonction *Cmi'*.

Chacune des trois étapes distinguées par MILLIMAN et PRINCE [*ibid.*] induisent des gains ou des pertes pour l'innovateur dont la somme donne une mesure de l'incitation à innover. Le tableau ci-dessous permet de récapituler en hiérarchisant les instruments.

Tableau 3. Classement des instruments selon les gains pour l'innovateur
Source : à partir de MILLIMAN et PRINCE [1989]

Classement Incitations	Norme d'émission	PEN allocation gratuite	PEN aux enchères	Taxe (subvention)
Innovation **Gain pour l'innovateur**	**4**	**1**	**1**	**1**
Diffusion **Gain pour l'innovateur**	**2**	**4**	**1**	**2**
Ajustement par le régulateur **Gain pour l'innovateur**	/	/	/	/
Bilan **Baisse des coûts pour l'innovateur**	**Incertain**	**Incertain**	Oui	Oui

Les PEN attribués aux enchères et la taxe[189] génèrent les gains à l'innovation les plus importants, viennent ensuite les PEN attribués gratuitement et la norme. Pour ces deux derniers instruments, le bilan est plus incertain et dépend essentiellement de la connaissance de l'allure des courbes de coût de dépollution et de dommage. Il faut souligner ici l'hypothèse qu'à la fois le niveau de la norme, le taux de taxe (ou de subvention), et le nombre de permis émis ne sont pas modifiés après l'adoption de la nouvelle technologie. Cette hypothèse est plausible dans la mesure où ces variables ne peuvent pas être révisées fréquemment, alors que le progrès technique peut être parfois

[189] La taxe ou la subvention ont le même pouvoir incitatif car leurs effets sur le coût moyen et le coût marginal de production de la firme, et donc sur ses émissions polluantes, sont négligés. Partant de cette hypothèse, une subvention octroyée par unité de dépollution, équivalente à une taxe par unité de pollution, conduit pour la firme au même niveau de dépollution et au même profit.

rapide et ses conséquences moins visibles pour l'autorité publique régulatrice que pour les pollueurs[190].

4.2.5.3. Extensions et commentaires

MARIN [1991] a suggéré que les résultats de MILLIMAN et PRINCE [1989] étaient dus à l'hypothèse de firmes toutes identiques. En réponse, MILLIMAN et PRINCE [1992] ont montré que même avec des coûts de dépollution hétérogènes le classement des instruments n'était pas modifié dans le cadre d'une analyse de statique comparative. Dans la même problématique, JUNG *et al.* [1996] recherchent les incitations à adopter une nouvelle technologie mais au niveau agrégé[191] d'une industrie composée de firmes hétérogènes. Pour cela, ils définissent un indicateur des « incitations au niveau du marché » (« *market level incentive - MLI* ») traduisant les variations des profits agrégés selon le type de politique environnementale suivi, et obtiennent le même classement des instruments que MILLIMAN et PRINCE [1989].

Cependant, selon nous le point sujet à discussion ici ne concerne pas tant l'homogénéité ou l'hétérogénéité des firmes, que les éléments de comparaison des deux systèmes de PEN. MILLIMAN et PRINCE [1989] concluent qu'une attribution aux enchères est plus incitative qu'une allocation gratuite. Dans leur raisonnement le fait d'acheter les permis aux enchères pour couvrir les émissions soutient plus l'innovation, compte tenu des coûts supportés, qu'une attribution gratuite. La diminution des émissions apportée par la nouvelle technologie entraîne donc des gains plus importants quand les permis doivent être achetés. Cependant, cette analyse peut apparaître biaisée, car même pour une attribution gratuite, on peut concevoir que les permis ont un coût d'opportunité pour les firmes. Quand une firme dépasse son plafond d'émissions, elle utilise ses permis en proportion et abandonne en même temps la possibilité de les

---

[190] Nous retrouvons ici les difficultés posées par les asymétries d'information mais aussi l'importance des coûts de transaction liés à la modification d'une politique.

[191] JUNG *et al.* [1996] posent un certain nombre d'hypothèses : l'industrie est composée d'un nombre fixe de firmes adoptant toutes la nouvelle technologie moins polluante ; toutes les firmes ont les mêmes coûts de dépollution ; l'adoption de la nouvelle technologie n'affecte pas le prix de marché de l'*output* de l'industrie, ce qui implique que les ajustements du niveau de production dans l'incitation à innover sont négligés ; lorsque la technologie propre se diffuse, le prix du permis baisse en même temps que le coût marginal des firmes.

vendre sur le marché et d'en tirer un gain. Le prix du permis affiché sur le marché correspond au prix implicite que paie la firme pour utiliser le permis afin de couvrir ses émissions. Dans ce cas, il est possible de considérer que le gain auquel la firme renonce en utilisant le permis est équivalent aux dépenses entraînées par l'achat des permis aux enchères, ce qui a pour conséquence de rapprocher les effets incitatifs des deux systèmes de PEN.

REQUATE et UNOLD [2003] étudient les incitations à innover des politiques environnementales, mais au lieu de comparer l'effet des instruments et les coûts avant et après l'innovation pour l'ensemble de l'industrie, ils cherchent à déterminer de manière endogène le nombre de firmes innovantes à l'équilibre pour un objectif de dépollution donné. Dans un cadre proche de celui de MILLIMAN et PRINCE [1989] où le régulateur choisit l'instrument et son degré d'application sans anticiper l'apparition d'une nouvelle technologie, REQUATE et UNOLD [*ibid.*] montrent que l'incitation à innover de la taxe (et de la subvention) est supérieure à celle des permis, quel que soit le système, et de la norme[192]. Même s'ils ne le mentionnent pas explicitement, les auteurs postulent que les deux systèmes de PEN font supporter aux firmes les mêmes coûts marginaux de dépollution, ce qui revient à considérer que les permis alloués par «*grandfathering* » ont un coût d'opportunité. Dans les deux systèmes de PEN, le prix des permis diminue à mesure que l'innovation se diffuse parmi les firmes. Cela signifie qu'au niveau individuel, les firmes qui n'ont pas encore innové peuvent être incitées à se comporter en «passager clandestin » en bénéficiant de la baisse du prix des permis, conséquence de l'innovation des autres firmes, pour réduire elles-mêmes leur coût de dépollution sans innover. Au total, REQUATE et UNOLD [*ibid.*] montrent qu'il est nécessaire de distinguer le sens des incitations au niveau individuel des firmes et les gains au niveau agrégé de l'industrie et qu'une baisse du prix des permis peut conduire les firmes n'ayant pas encore innové à ne pas choisir la nouvelle technologie.

* * *

Après avoir exposé dans la section précédente les moyens de correction dans le modèle de base des externalités de R&D, les problèmes de double défaillance du marché dont souffrent les innovations environnementales nous ont conduit à étudier

[192] Les résultats de REQUATE et UNOLD [2003] ne permettent pas réellement de distinguer l'efficacité des PEN et de la norme en terme d'incitation à l'innovation.

dans la présente section la portée des incitations à innover induites par les politiques environnementales. Il ressort de la littérature théorique que les instruments économiques incitent davantage à l'innovation que la réglementation. La confrontation des classements des instruments obtenus par les différents auteurs révèle toutefois un certain nombre de divergences qui s'expliquent par les hypothèses retenues, et notamment par la prise en compte ou non de l'ensemble des coûts associés à l'utilisation de chaque instrument. Cependant, la principale limite de ces analyses est leur caractère statique, puisqu'elle comparent les instruments et les incitations avant et après l'innovation, et ne permettent pas de capter les éventuelles variations d'incitation à innover des firmes au cours de l'ensemble du processus de diffusion d'une nouvelle technologie. En outre, même si les caractéristiques des nouvelles technologies adoptées ne sont pas véritablement spécifiées, celles-ci sont considérées implicitement comme des technologies de « bout de chaîne » ne permettant que des progrès incrémentaux de dépollution. Ce type d'approche seule apparaît restrictive et donc inopérante au regard de notre problématique reposant sur le développement d'innovations environnementales radicales, comme celles des TER, dans un contexte institutionnel.

Conclusion du Chapitre 2

Sous la pression des contraintes que représentent l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et la tendance au réchauffement climatique, les innovations technologiques apparaissent comme des variables d'action essentielles. Toutefois, la *technologie* a souvent été associée à l'image d'une « arme à double tranchant » car elle induit d'une part des externalités positives améliorant le bien-être *via* les connaissances nouvelles, et d'autre part des externalités environnementales négatives. Dans le paysage énergétique actuel, particulièrement pour la production d'électricité, une diversification vers les technologies des énergies renouvelables peut contribuer à éviter les contraintes évoquées. L'ouverture de nouvelles trajectoires technologiques passe alors par le développement d'innovations radicales. Mais l'étude de la structuration d'un nouveau système technologique ouvrant une place aux ER demande de tenir compte de la dimension temporelle et des interactions entre les différents acteurs, comme les firmes et les institutions de régulation publique. En effet, la mise en place graduelle d'une nouvelle configuration technologique va de pair avec une transformation du cadre institutionnel.

Ce *Chapitre 2* avait pour objet d'examiner les incitations à innover en faveur de technologies environnementales radicales sous l'éclairage des fondements de l'analyse économique standard. Nous avons mis en évidence que de telles innovations conduisent à se préoccuper d'un problème de « double externalités positives », issu des phases d'innovation et de diffusion-utilisation, nécessitant d'utiliser successivement les apports de l'économie de l'innovation et de l'économie de l'environnement.

La *Section 1* a souligné au préalable que la conception économique dominante du changement technique s'appuie, de manière explicite ou implicite, sur un modèle linéaire de l'innovation suranné qu'il nous faudra dépasser pour prendre en compte les effets de retour et les interactions entre les différentes étapes de l'innovation.

Dans la *Section 2*, nous avons brièvement rappelé comment la théorie néo-classique « élémentaire » représentait la technologie, à travers la fonction de production, dans un traitement purement allocatif de l'innovation. Dans ce cas, l'innovation, résultat d'un processus, équivaut à un choix optimal de techniques déjà réalisées et néglige les effets de création et les problèmes de gestion des phases de transition entre deux technologies. Nous avons ensuite abordé à partir du modèle d'ARROW [1962a] les concepts fondamentaux de l'analyse économique standard de la R&D assimilant la

technologie à une information. Les défaillances engendrées par l'application du modèle d'équilibre général aux activités de R&D ont apporté une justification de l'intervention de l'Etat dans ce domaine. Nous avons donné ensuite uns synthèse des développements récents des modèles micro-économiques traitant des relations entre les activités de R&D et des structures de marché, en soulignant l'inadéquation de leurs hypothèses avec notre problématique. En effet, l'avantage compétitif recherché par l'innovation (s'extraire même temporairement de la concurrence) ne dépend pas tant de l'optimisation à l'intérieur de contraintes fixées que de la *capacité* d'innovation et de changement technologique permettant de déplacer, voire d'annihiler ces contraintes.

Dans la *Section 3* nous avons souligné que la théorie standard n'accordait pas une place précise à la politique d'innovation et à la politique industrielle. Nous avons ensuite posé les principes et les limites des mécanismes de soutien proposés pour stimuler l'innovation. Cela nous a conduit à établir que, pour les innovations environnementales qui ont la particularité de poser un problème de double externalité, à la fois dans les phases d'innovation et d'utilisation, ces mesures sont insuffisantes puisqu'elles ne corrigent qu'une partie des défaillances.

C'est pourquoi dans la *Section 4* nous avons présenté les fondements théoriques des instruments, réglementaires et économiques, des politiques de l'environnement destinées à internaliser les coûts externes associés à l'utilisation de technologies polluantes. L'exposé et le commentaire des modèles sur le sujet ont permis de déterminer que les instruments économiques étaient les plus à même d'induire des effets incitatifs en faveur de technologies plus propres. Cependant, les applications qui ont été tirées de ces modèles théoriques ne se sont traduites que par des politiques d'adaptation réduisant les émissions polluantes en aval. Ces mesures ont parfois montré leur efficacité pour des atteintes environnementales « classiques » en suscitant l'essor de technologies incrémentales de «bout de chaîne », mais elles n'ont pas été en mesure de créer un « environnement de sélection » favorable conduisant à l'adoption de technologies radicales.

Au terme de ce deuxième chapitre, nous sommes donc en mesure d'écarter, sans toutefois en minimiser la portée des analyses abordées, la représentation de l'innovation de la théorie économique standard. Le *Chapitre 3*, en abordant les apports de la théorie évolutionniste du changement technique, sera pour nous l'occasion de préciser la conception de l'innovation que nous choisissons pour notre thèse.

CHAPITRE 3

Analyse Economique Evolutionniste et Innovations Technologiques Environnementales

Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter le cadre théorique dans lequel nous souhaitons situer l'analyse. Ce *corpus* théorique s'inscrit dans la perspective d'une conception évolutionniste[193] du changement technique. Plusieurs écrits soulignent les difficultés de définition et de présentation du courant évolutionniste (CORIAT et WEINSTEIN [1995], PAULRE [1997], BASLE *et al.* [1997, 1999]). Celles-ci sont sans doute liées à la relative jeunesse de ses écrits, si on considère que la théorie évolutionniste contemporaine s'est constituée en programme de recherche à partir de l'ouvrage fondateur de NELSON et WINTER [1982], mais cela est plus certainement dû au fait qu'aujourd'hui plusieurs approches hétérodoxes, plus complémentaires que concurrentes, se réclament de l'évolutionnisme. Il n'est donc pas aisé de définir les limites de ce qui apparaît plus être une approche en cours de structuration, plutôt qu'un programme de recherche unifié véritablement constitué. Pour ces raisons et par souci de commodité méthodologique, le courant évolutionniste est souvent abordé « négativement », c'est-à-dire par rapport aux points de rupture qu'il introduit par rapport au paradigme néoclassique. Il est possible de distinguer un évolutionnisme au sens étroit et un évolutionnisme au sens large (PAULRE [1997]). Les travaux, comme ceux de NELSON et WINTER [1982] ou DOSI et NELSON [1994], relevant de la première conception reproduisent ou s'inspirent des principes d'analyse de la sélection naturelle et de l'évolution en biologie. Les travaux évolutionnistes au sens large, comme ceux de DOSI [1988a, 1988b] ou ARTHUR [1989], s'inscrivent dans l'étude de l'évolution dynamique des systèmes afin d'en dégager les lois et les régularités qui conduisent à cette évolution.

Ces éléments nous amènent à considérer la théorie évolutionniste de l'innovation comme une «boîte à outils », dans laquelle nous puiserons les instruments analytiques nécessaires à l'étude de notre problématique. En conséquence, les développements qui vont suivre ne prétendent pas à une description exhaustive d'un appareil conceptuel parfaitement articulé. Certains travaux évolutionnistes vont s'avérer pertinents au regard

[193] On peut noter que la traduction anglaise d'évolutionniste est « *evolutionnary* » et non « *evolutionnist*» ce qui atténue la référence à l'analogie biologique. Bien que certains auteurs français emploient le néologisme « évolutionnaire » (notamment PAULRE [1997], BROUSSEAU [2000]), nous emploierons pour notre part le terme « évolutionniste ».

du sujet qui nous occupe, c'est pourquoi nous devons préciser les grandes lignes de la construction du cadre théorique dans lequel ils s'inscrivent.

La *Section 1* présentera, à travers les critiques de l'approche standard mais surtout les inspirations positives, la construction des fondements de l'approche évolutionniste de l'innovation et du changement technique ainsi que ses hypothèses. Nous établirons les principes micro-économiques de l'analyse évolutionniste.

La *Section 2* nous permettra de rentrer plus en détail dans la conception évolutionniste de l'innovation. Nous mettrons d'abord en évidence le modèle de l'innovation et les faits stylisés qu'elle retient. A partir d'une nouvelle approche sur les externalités de connaissances, nous présenterons ensuite les nouvelles capacités reconnues aux firmes. Enfin, dans une optique plus macro-économique nous verrons quels sont les types de régularités technico-économiques, structurant la dynamique des industries, reconnues par les auteurs évolutionnistes.

La *Section 3* doit nous permettre d'arriver à une reformulation des politiques technologique et environnementale pour soutenir le développement de technologies « vertes », comme celles des énergies renouvelables. Après avoir abordé la justification de l'intervention de l'Etat, nous intégrerons la problématique environnementale dans l'analyse évolutionniste de l'innovation. Enfin, à travers l'apport des modèles de compétition étudiant les situations de verrouillage technologique, nous essaierons de tirer des enseignements pour guider l'action publique en matière de soutien à une technologie « verte » en développement.

Section 1. Les fondements de l'analyse évolutionniste de l'innovation et ses hypothèses

Cette section va nous permettre de présenter les fondements de l'approche évolutionniste contemporaine de l'innovation qui s'est développée essentiellement à partir de l'ouvrage fondateur de NELSON et WINTER [1982]. Dans la mesure où l'analyse évolutionniste de l'innovation est une approche relativement récente, il est nécessaire dans un premier temps d'aborder ses différents fondements et les grandes hypothèses qui sont mises en avant. Nous allons voir que la motivation des auteurs évolutionnistes de proposer une analyse alternative au programme de recherche néoclassique naît d'un certain nombre d'insatisfactions qu'ils formulent à son encontre. Dans une démarche plus positive, la construction du courant évolutionniste puise un certain nombre d'inspirations chez différents auteurs. De nombreux évolutionnistes se présentant d'abord comme « néo-schumpétériens », nous essaierons d'apprécier la teneur de cette filiation. Les modèles biologiques (ALCHIAN [1950]) représentent l'autre principale source d'inspiration et soulèvent la problématique de l'utilisation des analogies biologiques dans la théorie économique. Nous aborderons ensuite les hypothèses de base de l'approche évolutionniste concernant le comportement des agents économiques en essayant de mettre en évidence leur originalité. Enfin, nous présenterons le modèle de compétition technologique de NELSON et WINTER [1982, p. 281] dans lequel sont étudiés les interactions entre la structure de marché, les dépenses de R&D et le changement technique.

1.1. La critique des « fondations de l'orthodoxie contemporaine[194] »

Une des motivations exprimée par NELSON et WINTER [1982] dans l'élaboration d'une théorie évolutionniste s'appuie directement dans un rejet du programme de recherche néoclassique. Les critiques qu'ils expriment renvoient à quatre reproches principaux.

[194] Le chapitre 3 de l'ouvrage de NELSON et WINTER [1982, p. 51] s'intitule « *The foundations of contemporary orthodoxy* ».

1.1.1. L'appréhension des problèmes économiques

Dans un premier temps, ils critiquent la théorie orthodoxe dans sa manière de poser les problèmes économiques. Celle-ci considère en effet comme donné au niveau microéconomique les plans de production possibles d'une firme, c'est-à-dire le catalogue des techniques productives (NELSON et WINTER [1982, p. 4, 60-61]). Pour NELSON et WINTER non seulement cette conception n'existe pas dans la réalité économique, mais l'adoption de cette hypothèse conduit à s'interdire d'aborder des questions pertinentes comme l'explication du processus conduisant à établir le catalogue des techniques, l'analyse des facteurs conduisant au changement technique ou l'explication des raisons d'un accès différent des firmes à l'ensemble des techniques disponibles. Si l'on veut recenser les variables explicatives de la dynamique économique observée, il faut alors inclure l'analyse des « compétences » et des « règles de décision » des firmes (*ibid.* p. 4). Celles-ci peuvent être données à un moment précis du temps, mais dans la réalité elles sont soumises à un changement perpétuel.

1.1.2. L'absence d'un équilibre unique

Comme tous les auteurs qui se réclament de l'évolutionnisme, NELSON et WINTER considèrent que l'analyse économique ne doit pas se focaliser sur les «états hypothétiques de l'équilibre de l'industrie[195] ». De ce fait l'attention doit se porter sur les processus dynamiques qui engendrent des changements économiques irréversibles sensibles aux trajectoires technologiques suivies[196]. Certaines formulations du comportement des agents économiques qui en découlent peuvent engendrer des équilibres ponctués : de longues périodes de stabilité peuvent être entrecoupées de changements soudains dont on ne peut prédire la nature ou le moment. D'autres peuvent engendrer des équilibres multiples, ce qui suppose que des « accidents historiques »

[195] *« (…) we do not focus our analysis on hypothetical states of 'industry equilibrium' (…) »*, NELSON et WINTER [1982, p. 4].

[196] Dans l'introduction de leur ouvrage NELSON et WINTER [1982, p. 3] affirment que l'une des prémisses à la construction de leur analyse tient au fait que *« (…) economic change is important and interesting. Among the major intellectual tasks of the field of economic history, for example, certainly non is more worthy of attention than that of understanding the great complex of cumulative change in technology and economic organization that has transformed the human situation in the course of the past few centuries »*.

déterminent quel équilibre sera atteint ou approché à un moment particulier. D'autres encore peuvent ne pas engendrer d'équilibre mais un changement perpétuel. Dans ce cas, même si la théorie de l'équilibre ne peut pas être appliquée, les comportements peuvent être analysés dans le but de comprendre les paramètres dynamiques du système. Ce type d'analyse des processus de changement implique le recours à des formes de modélisation particulières pour caractériser la dynamique et rendre compte des principaux traits de l'évolution. Dans ce cadre NELSON et WINTER [1982, p. 46] font alors une distinction entre les théories « formelles » et les théories «appréciatives[197] ». Pour eux ces deux formes de théories ne s'excluent pas *a priori* et leur combinaison implique que la première puisse être modifiée en fonction des résultats obtenus par la seconde. Contrairement à la démarche néoclassique qui accorde une sorte de primauté à la théorie formelle, l'approche évolutionniste réalise une ouverture en direction de l'histoire à travers deux formes. D'une part, NELSON et WINTER [1982, p. VII] mettent en avant l'importance des phénomènes d'irréversibilité et soulignent le poids du passé, avec la notion de *« path dependence »*, et ses effets décisifs sur les décisions micro-économiques, et d'autre part ils préconisent que l'analyse doit prendre en compte les phénomènes liés au changement historique. Cela les a conduit récemment avec d'autres auteurs à proposer des modèles *« history friendly »* destinés à mieux comprendre le changement structurel qui se diffuse dans plusieurs branches d'activités de l'économie, afin d'appréhender les dynamiques sectorielles et les moteurs de leur évolution (MALERBA *et al.* [1999]).

1.1.3. L'hypothèse de la non maximisation du profit

La troisième critique adressée à la théorie néoclassique vise l'hypothèse de la maximisation du profit. Cette préoccupation est ancienne chez les évolutionnistes,

[197] Une théorie « formelle » est, ou peut être, présentée sous forme mathématique avec des hypothèses et des déductions. Elle l'offre l'avantage d'être précise ; par contre parmi ses inconvénients il y a les restrictions que l'on doit forcément faire au niveau de sa portée pour formaliser toutes les hypothèses. Une théorie « appréciative » englobe des postulats et des hypothèses qui ne se prêtent pas facilement à une transposition en langage mathématique. Une analyse rigoureuse peut toujours être utilisée pour parvenir à des conclusions et ensuite les critiquer. Ses avantages englobent une couverture plus étendue des hypothèses au sujet des comportements et des observations factuelles. Parmi les désavantages, il y a le manque de formalité et de précision.

puisqu'elle a été exprimée assez tôt par WINTER [1964] qui s'interrogeait sur la portée de cette hypothèse dans le cadre du débat entre ALCHIAN, PENROSE et FRIEDMAN sur la sélection naturelle et la vraisemblance empirique des comportements économiques optimaux. Pour WINTER la maximisation du profit présente un caractère normatif et ne peut pas être considérée comme empiriquement valide. En effet, en économie elle résulte d'une convention, même si la littérature «béhavioriste » a montré assez tôt que dans la réalité industrielle les firmes se fixent une pluralité d'objectifs (SIMON [1959, 1975], CYERT et MARCH [1963])[198]. Dans le cadre des processus concurrentiels auxquels elle est confrontée, une firme ne découvre que progressivement ses objectifs, ces derniers dépendant aussi bien des relations à l'intérieur de la firme que de son environnement externe. WINTER [1964] s'interroge sur la possibilité qu'ont les firmes de réaliser des calculs optimaux dans un environnement qui se transforme et qui fait évoluer en permanence les sources d'information disponibles pour un décideur. Ainsi, quand les décisions sont complexes et incertaines, les décideurs opèrent une division du travail pour rechercher une solution «satisfaisante » puisque l'obtention de la meilleure solution est impossible dans un environnement évolutif. La décomposition des tâches permet de trouver des procédures permettant de respecter la diversité des agents composant l'organisation : contrairement à ce que suppose l'hypothèse de maximisation du profit, la firme ne peut pas être réduite à un individu unique, concentrant tous les pouvoirs, capable d'assumer toutes les décisions de manière parfaitement rationnelle. WINTER choisit d'observer les firmes qui survivent sur le marché plutôt que de repérer celles qui sont capables d'y entrer. Il cherche à déterminer les critères de survie des firmes afin de déterminer les procédures robustes qui leur permettent de perdurer. Pour WINTER quand on tient compte de la dimension temporelle rien ne prouve que le comportement maximisateur soit la norme, car il faudrait supposer que toutes les firmes observées s'y conforment. Or, si certaines maximisent leur profit sur une courte période, d'autres ne le font pas, et rien ne garantit que sur la longue période les premières survivront et la règle de la maximisation se généralisera à l'ensemble des firmes. De

[198] Notamment à la suite des contributions fondamentales de SIMON [1959, 1975] et de CYERT et MARCH [1963] la vision de la firme ne s'apparente plus à un simple « point ». Ces auteurs proposent une vision plus réaliste d'une firme composée de groupes différents ayant des objectifs qui ne sont pas identiques. Les hypothèses qu'ils formulent consistent à substituer à l'objectif unique de maximisation du profit un ensemble d'objectifs pécuniaires (profit…) et non pécuniaires (carrière des salariés, statut des dirigeants…).

nombreux critères interviennent dans le processus de sélection des firmes comme les économies d'échelle, l'accumulation de l'expérience, les caractéristiques de l'environnement qui modèlent les critères de rentabilité et de survie dans le temps. A la suite de cette analyse, il ne sera donc pas surprenant que NELSON et WINTER [1982] parviennent à montrer que les mécanismes de sélection de l'évolution industrielle choisissent les firmes qui atteignent des résultats au moins satisfaisants et non celles qui ont obtenu des résultats optimaux.

1.1.4. La remise en question méthodologique de la fonction de production

La critique de la maximisation du profit, en plus de celle du « catalogue des techniques » déjà évoquée, conduit NELSON et WINTER [1982] à développer un quatrième argument remettant en question la fonction de production. Le recours à la fonction de production devrait impliquer l'établissement de la liste de tous les *inputs* initiaux ainsi qu'une description exhaustive de l'état de l'art des activités productives disponibles, ce que permet d'éviter l'hypothèse d'additivité des processus productifs. La critique de cette hypothèse par NELSON et WINTER est d'ordre méthodologique : la fonction de production décrit les facteurs de production en simplifiant excessivement la manière dont les firmes produisent. Ainsi le risque est double : il est de perdre de vue que les grandeurs mesurées dans la fonction de production résultent de conventions et de prendre ces conventions pour la réalité. Par ailleurs, l'abstraction liée à l'hypothèse d'addidivité de la fonction de production empêche d'observer correctement les aspects qualitatifs des connaissances productives, notamment les connaissances et les savoir-faire tacites qui résultent des caractéristiques cognitives des individus composant les firmes. Pour NELSON et WINTER il existe une contradiction dans le fait que la fonction de production agrège de manière abstraite et strictement quantifiée des *inputs*, alors que la définition des biens peut faire référence à la date et au lieu de leur utilisation. La question se pose alors de savoir comment la même quantité d'*inputs* utilisés dans un contexte spécifique (de temps et d'espace) peut changer de nature et engendre des processus productifs différents. Même si des solutions techniques[199] pourraient

[199] Une solution technique consisterait à introduire des « intervalles élémentaires » pour le temps et des « régions élémentaires » pour l'espace, mais cela ne résout pas le problème de l'additivité des facteurs (ARENA et LAZARIC [2003]).

permettre d'outrepasser ce problème, pour NELSON et WINTER la solution ne consiste pas à ajouter des dimensions supplémentaires pour caractériser la fonction de production, mais à reconnaître les combinaisons de facteurs et les connaissances productives spécifiques qui leur sont associées[200]. Le problème principal est donc celui de l'identification de la connaissance spécifique d'un site. WINTER [1995] met ce problème en relation avec ceux liés aux transferts ou à l'extension des activités d'une firme : quand une firme transfère ses activités, les résultats qu'elle obtient sont rarement ceux qui étaient escomptés, même si elle tente de copier à l'identique ses activités courantes. En dehors des contraintes institutionnelles qui façonnent les sites de production, comme l'existence des systèmes nationaux d'innovation, il existe des effets d'apprentissage par la pratique qui dépendent essentiellement des facteurs individuels et organisationnels spécifiques.

Ces quatre principales critiques des fondements théoriques du modèle néoclassique illustrent la nécessité pour NELSON et WINTER [1982] de construire une approche évolutionniste susceptible de répondre aux questions qui sont laissées en suspens. Cependant, elles ne résument pas toutes les sources d'inspiration de leur analyse, puisque les auteurs ne souhaitent pas seulement s'opposer à «l'orthodoxie contemporaine », ils se réfèrent également positivement à d'autres contributions, notamment celle de SCHUMPETER.

1.2. Les inspirations positives

Parallèlement aux critiques, les auteurs évolutionnistes revendiquent explicitement certaines filiations. Nous nous focaliserons sur les liens avec les travaux de SCHUMPETER et sur les modèles « biologiques » depuis l'article d'ALCHIAN [1950].

1.2.1. L'inspiration schumpétérienne du courant évolutionniste : filiation et démarcations

De nombreux auteurs évolutionnistes contemporains expriment un intérêt manifeste pour les travaux de SCHUMPETER. NELSON et WINTER [1982, p. 39] qualifient ouvertement leurs travaux évolutionnistes de *« néo-schumpétériens »* et reconnaissent

[200] Voir *supra* la taxonomie de PAVITT [1984].

une dette intellectuelle majeure à l'égard de SCHUMPETER en ajoutant que *« Schumpeter pointed out the right problem – how to understand economic change – and his vision encompassed many of the important elements of the answer. »* (*ibid.* p. IX).

Il est possible de discerner chez NELSON et WINTER [1982] quatre thèmes principaux retenus parmi les apports de SCHUMPETER.

1.2.1.1. Le changement économique

Le premier thème, comme l'illustre la précédente citation, concerne le changement économique. Les auteurs reconnaissent à SCHUMPETER d'avoir développé *« (…) a view of capitalism as an engine of progressive change »* (*ibid.*, p. 39). Cependant, la référence dans leur ouvrage n'est pas plus précise et on peut déjà s'interroger sur le contraste entre l'utilisation de l'adjectif « schumpétérien » et la relative pauvreté de l'utilisation effective des concepts propres à SCHUMPETER.

1.2.1.2. L'innovation

Le deuxième thème, central, a trait à l'innovation. Celle-ci est vue comme l'instrument qui permet d'assimiler ce que NELSON et WINTER appellent la « concurrence dynamique » à un processus de sélection des firmes. Selon les économistes évolutionnistes modernes ce thème constitue un des apports principaux de SCHUMPETER (CLARK et JUMA [1988]). Toutefois, par rapport à l'approche schumpétérienne, l'analyse évolutionniste se caractérise par la reconnaissance du rôle des innovations mineures et une conception du progrès technique comme le résultat (partiel) de processus incrémentaux cumulatifs et endogènes. C'est ce que soulignent NELSON et WINTER [1982, p. 10] en affirmant *« The broader connotations of 'evolutionary' include a concern with processes of long-term and progressive change. »* Pour autant, l'analyse évolutionniste n'ignore pas les ruptures, mais elles sont considérées soit comme exogènes (DOSI [1984])[201], soit traitées comme un phénomène stochastique (NELSON et WINTER [1982]). SCHUMPETER [1939] privilégie le caractère

[201] Les changements exogènes vont concerner l'émergence de nouveaux paradigmes technologiques, alors que les changements endogènes vont concerner le progrès technique le long de trajectoires technologiques définies par le paradigme. Voir *supra* Section 2.5.

discontinu des changements créés par les innovations. Selon lui, les innovations ne peuvent pas être dérivées par continuité ou de façon endogène à partir des techniques existantes. Contrairement aux évolutionnistes, il semble exclure l'apprentissage par l'usage (*learning by doing*) en écartant la possibilité que les vieilles combinaisons, en se transformant, deviennent automatiquement des nouvelles (SCHUMPETER [1935]). Dans ses travaux SCHUMPETER décompose le changement technique, suivant la vision linéaire, en trois phases bien distinctes : invention, innovation et imitation. L'innovation englobe le changement technique mais ne s'y réduit pas puisqu'il considère aussi les innovations concernant des débouchés nouveaux, des nouvelles organisations… L'innovation se distingue de l'invention : la première relève de l'économie, alors que la seconde relève de la logique technique. L'acte d'innovation relève plus d'une volonté héroïque que d'une construction. C'est l'entrepreneur schumpétérien[202], défini comme un sorte de «super agent », qui est chargé, par la création d'une nouvelle entreprise, d'exécuter de nouvelles combinaisons productives qui vont entraîner le mécanisme du développement (SCHUMPETER [1935]). On ne trouve pas chez SCHUMPETER de véritable analyse du changement technique. Privilégiant plus les aspects financiers, il ne s'est pas réellement intéressé à l'origine de l'innovation et aux interactions entre la science et la technologie. Les évolutionnistes s'attachent, par contre, à étudier les conditions de l'évolution technique à partir de l'analyse des conditions de diffusion et d'évolution des connaissances.

SCHUMPETER [1939] associe le changement technique à une transformation, dans le sens d'un déplacement mais aussi d'une déformation, de la fonction de production[203]. Cependant, le sens de cette notion a évolué dans ses écrits. Alors que dans la *Théorie de l'Evolution Economique* [1935][204] prévalait un capitalisme concurrentiel[205] dans lequel

[202] Sa fonction est à distinguer de celle de l'inventeur, de l'administrateur ou du capitaliste : c'est le capitaliste (le banquier), et non l'entrepreneur, qui va apporter les moyens financiers pour réaliser les nouvelles combinaisons et qui assume les risques (SCHUMPETER [1935]).

[203] C'est-à-dire la production d'une quantité ou d'une valeur de biens plus importante pour un coût inchangé.

[204] Cette première approche de la relation de la taille de la firme et de l'innovation est souvent référencée dans la littérature « néo-schumpétérienne » (Nelson et WINTER [1982], KAMIEN et SCHWARTZ [1982], MALERBA et ORSENIGO [1995]) sous l'appellation « *SCHUMPETER Mark I* ». SCHUMPETER s'inspire pour construire ce premier modèle *Mark I* des caractéristiques de la structure de l'industrie européenne à la fin du XIXème siècle.

il introduisait l'entrepreneur-innovateur, dans *Business Cycles* [1939][206] prévaut un capitalisme « trustifié » où la petite entreprise innovatrice disparaît au profit des grandes firmes oligopolistiques. SCHUMPETER développera cette analyse dans *Capitalisme, Socialisme et Démocratie* [1942] en soulignant le caractère bureaucratique de la R&D dans les grandes firmes dans lesquelles l'innovation devient une fonction « routinière » et, dans d'une certaine manière, « institutionnalisée » (LE DORTZ [1999]). Tout se passe alors comme si la grande entreprise était en mesure de développer une activité innovatrice seule, sachant que les sources d'informations externes (les firmes concurrentes, les laboratoires de recherche, les universités) et le système d'innovation dans lequel elles se situent joue un rôle important. Ce dernier élément sera pris en compte par les évolutionnistes[207].

1.2.1.3. Les comportements des agents

Le troisième thème porte sur l'appréhension schumpétérienne des comportements des agents économiques. SCHUMPETER, comme les évolutionnistes, est assimilé à un théoricien de la rationalité limitée. Cette interprétation trouve son origine dans le fait que l'entrepreneur schumpétérien n'est pas un acteur rationnel. Il agit en quelque sorte « à côté » de l'équilibre dans un contexte d'incertitude radicale et manque de données pour prendre des décisions s'écartant des routines habituelles ; poursuivant des buts complexes, il ne s'engage pas dans des calculs « hédonistes » rationnels[208].

---

[205] Dans la *Théorie de l'Evolution Economique* [1935], SCHUMPETER définit au préalable un état d'équilibre hypothétique qu'il appelle le circuit économique. C'est un capitalisme de concurrence avec une entrée libre, de nombreuses firmes de petite taille aux comportements mécanistes prédéfinis et où aucun changement interne (il n'y a pas au début d'entrepreneur) ou externe (il n'y a pas d'intervention de l'Etat) n'intervient. De part la stabilité et la sécurité qu'elle apporte, la situation d'équilibre apparaît comme une condition nécessaire au déclenchement de l'évolution économique par l'action de l'entrepreneur-innovateur.

[206] *Business Cycles* [1939] et *Capitalisme, Socialisme et Démocratie* [1942] représentent l'approche *SCHUMPETER Mark II*. Ce second régime s'inspire des caractéristiques de l'industrie américaine au cours de la première moitié du XXème siècle.

[207] Cf. Chapitre 4.

[208] Des calculs hédonistes rationnels du type : « Quel surplus de bien-être va-t-il résulter de telle ou telle décision ? ».

1.2.1.4. L'hypothèse schumpétérienne

Le dernier thème concerne «l'hypothèse schumpétérienne ». Cette dernière est évoquée par NELSON et WINTER [1982, p. 278] qui soulignent que dans *Capitalisme, Socialisme et Démocratie* (SCHUMPETER [1942]) on retrouve l'idée selon laquelle *« (…) a market structure involving large firms with a considerable degree of market power is the price that society must pay for rapid technological advance. »*

1.2.1.5. Une inspiration réductrice

D'une manière générale, la filiation schumpétérienne du courant évolutionniste est loin de faire l'unanimité, comme en témoignent les nombreuses contributions qui abordent ce thème (voir notamment ANDERSEN [1994], MAGNUSSON [1994], LE DORTZ [1999], FAGERBERG [2003]). NELSON et WINTER [1982] proposent une interprétation assez réductrice des apports de SCHUMPETER. En effet, si les évolutionnistes s'inspirent de la théorie des phénomènes concurrentiels et des phénomènes d'évolution proposée par SCHUMPETER, ils ne s'intéressent pas à d'autres de ses apports fondamentaux. Ainsi le rôle des entrepreneurs-innovateurs, c'est-à-dire les firmes *leaders* de la compétition industrielle, souligné par NELSON et WINTER [1982, p. 275], ne peut pas être dissocié de sa dimension sociologique. Ensuite, la théorie schumpétérienne de l'entrepreneur et de la concurrence n'apparaît pas de prime abord comme une version économique de la théorie de la sélection naturelle, mais plutôt comme une explication socio-économique des conditions qui permettent à un «modèle social » de devenir prédominant dans un contexte sociologique et historique particulier. Enfin, les travaux de Schumpeter [1942] sur l'entreprise ne se réduisent pas à l'hypothèse schumpétérienne. Ils font apparaître une réflexion plus riche qui conduira les économistes à s'intéresser davantage aux formes organisationnelles concrètes des entreprises modernes (ARENA et DANGEL HAGNAUER [2002]).

Finalement, si on considère l'ensemble des principaux apports de l'analyse de SCHUMPETER, l'inspiration schumpétérienne chez NELSON et WINTER [1982] se révèle assez réduite, ce qui n'empêche pas cependant les autres auteurs évolutionnistes modernes de reprendre le plus souvent leur interprétation.

1.2.2. L'inspiration des modèles biologiques

Dans leur ouvrage NELSON et WINTER [1982] exposent longuement les origines et les fondements de l'approche évolutionniste. En plus de la référence à SCHUMPETER, les auteurs insistent sur quelques contributions essentielles à la construction de leur approche, notamment sur l'inspiration tirée des modèles biologiques. Parmi elles, on trouve les articles d'ALCHIAN [1950], suivi de PENROSE [1952] et FRIEDMAN [1953], qui ont alimenté à l'époque un débat intense dans l'*American Economic Review* sur la théorie de la firme et l'argument de la sélection naturelle. Ce débat a vu se confronter les arguments respectifs des théories béhavioristes et managériales de la firme et de la théorie néoclassique. Les premières, fondées sur des études empiriques, dénonçaient le caractère irréaliste des hypothèses comportementales marginalistes, alors que les seconde, exploitant certaines de leurs failles méthodologiques, arguaient que même si les firmes ne connaissent pas avec précision leurs coûts marginaux et leur niveau de profit, et même si elles ne peuvent en permanence optimiser, elles optent pour des comportements qui s'apparentent à la maximisation du profit.

1.2.2.1. Le modèle de sélection d'ALCHIAN [1950]

La position d'ALCHIAN, proposant une ligne de défense de la théorie néoclassique, est venue ouvrir une sorte de troisième voie en postulant son irréalisme méthodologique et en tentant de l'endogénéiser. Selon lui on ne peut pas soutenir l'hypothèse de la rationalité parfaite, même si les représentations analytiques qu'elle implique demeurent pertinentes puisqu'elles ne sont liées ni aux motivations, ni aux capacités de prévision des agents. Sa volonté est alors de démontrer que cette hypothèse n'est pas nécessaire pour valider les théorèmes néoclassiques.

ALCHIAN [1950] s'interroge sur les principes qui fondent la décision des firmes en univers d'information incertaine. Son intuition initiale est d'incorporer dans la théorie économique les principes de l'évolution biologique et de la sélection naturelle. Renonçant aux hypothèses d'information certaine et d'agents maximisateurs[209], il

[209] ALCHIAN [1950] postule qu'en situation de simple risque la maximisation est impossible. Quand le résultat d'une action est risqué, la référence à l'espérance d'utilité dans la détermination d'un optimum est

cherche à établir un nouveau cadre d'analyse des processus de sélection de marché, dans une démarche qui se veut marshalienne et darwinienne, pour expliquer deux phénomènes : (i) la sélection des agents qui réalisent les profits les plus élevés ; (ii) l'adoption par les agents de comportements tendant à permettre l'obtention de ces profits les plus élevés.

Dans un premier temps ALCHIAN [1950] souligne que, même si les firmes agissent de manière aléatoire, seules celles qui ont la « chance » (*« luck and chance »*) de se comporter d'une façon conforme à un comportement rationnel survivront à long terme[210]. La concurrence sur le marché va avoir tendance à sélectionner les firmes qui ne font pas de perte et, à plus long terme, celles qui font le plus de profit. Les théorèmes néoclassiques peuvent ainsi expliquer le comportement d'une « population » de firmes en concurrence, même s'ils ne rendent pas compte de celui de chaque firme. L'environnement sélectionne les firmes les plus adaptées au critère de sélection, et tout se passe comme si chacune d'elles cherchait à satisfaire ce critère.

Dans un deuxième temps, ALCHIAN soutient l'idée que, compte tenu de l'impossibilité d'établir facilement des relations entre leurs actions et leurs résultats, les firmes suivent des « règles de conduite » routinières (*« guiding rules of action »* ou *« modes of behaviour »*), assurant leur survie grâce à un niveau de profit « suffisant » effectivement réalisé, et non plus par la recherche d'un profit « maximum » potentiel. Les agents utilisent les mêmes routines tant qu'elles leur paraissent satisfaisantes : soit que les résultats réalisés ne sont pas inférieurs aux critères fixés, soit qu'ils ne sont pas informés de pratiques produisant de meilleurs résultats. Sinon, ils font évoluer leurs routines par l'innovation, en testant et adoptant de nouvelles pratiques, ou par l'imitation, en comparant leurs performances relatives et en adoptant les routines des

---

insuffisante. Les agents opèrent un arbitrage entre un niveau d'utilité espérée et un niveau de risque. Ils maximisent leur utilité ou leur profit sous contrainte de leur préférence (ou de leur aversion) individuelle pour un niveau de risque. Celui-ci apparaît bien comme un obstacle à la maximisation du profit. Pour soutenir ce raisonnement ALCHIAN ne se réfère à aucun moment à la notion d'incertitude radicale (KNIGHT [1921]), ni à celle de rationalité limitée (SIMON [1955, 1959]). Il expose un modèle introduisant les principes de l'évolution biologique et de la sélection naturelle.

[210] Une des hypothèses fortes d'ALCHIAN [1950] est que le profit traduit l'adaptation des décisions de l'agent à son environnement et a un impact sur la survie de la firme.

firmes qui ont obtenus les meilleurs résultats[211]. Ainsi, les comportements de recherche de « satisfaction » (*« satisfacing »*) viennent se substituer à ceux de maximisation.

ALCHIAN établit les bases d'un modèle de sélection des routines par la concurrence en s'inspirant de la génétique des populations. D'un côté, les firmes dont les modèles de comportement permettent de réaliser les profits les plus élevés ont les probabilités de survie les plus importantes, de l'autre, celles dont les pratiques sont les moins efficaces vont avoir tendance à adopter celles qui assurent des niveaux de profits plus élevés. La combinaison des effets de sélection, d'innovation et d'imitation va conduire la firme représentative[212] à tendre vers le modèle de la firme marginaliste qui assure les profits les plus élevés possibles. ALCHIAN en conclu que la théorie néoclassique et l'hypothèse de maximisation des profits n'est pas remise en question par l'irréalisme de cette hypothèse. Elle reste pertinente puisqu'un processus de sélection conduit la population de firmes réelles à se comporter comme la population de firmes théoriques de la théorie néoclassique.

Ce type d'analyse établit en quelque sorte le passage d'une rationalité *ex ante*, sur les choix des agents, à une rationalité *ex post*, sur les choix de l'environnement. ALCHIAN soutient que s'il y a maximisation du profit c'est le résultat *ex post* d'un processus conduit au niveau de l'industrie dans son ensemble et non au niveau de chaque firme (ou des entrepreneurs). Le « degré d'optimisation » d'une firme survivante dépendra pour une large part des performances de l'ensemble des firmes.

1.2.2.2. Le débat théorique sur le processus de la sélection naturelle

Lors de sa publication, la position de ALCHIAN a rapidement suscité un vif débat théorique centré sur le processus de sélection naturelle.

PENROSE [1952, 1953] a répliqué à ALCHIAN avec virulence sur la base de trois arguments que nous pouvons synthétiser :

---

[211] *« Failure and success reflects (…) not only imitative behaviour but the willingness to abandon it at the 'right' time and circumstances (…) when conditions have changed »* (ALCHIAN [1950, p. 216]).

[212] La firme représentative peut être caractérisée par la moyenne des modèles de comportement de l'ensemble des firmes.

(i) Si la sélection naturelle résulte des « forces du marché », ALCHIAN suppose que la compétition entre les firmes pré-existe. Qu'est ce qui suscite alors la compétition, si ce n'est la recherche de profits ? Pour PENROSE la perspective de profits positifs est insuffisante pour inciter les firmes à exploiter des opportunités qui vont contribuer à augmenter leurs profits. On peut penser que cet argument est décalé par rapport à la pensée d'ALCHIAN. En effet, il affirme[213] que certaines entreprises peuvent maximiser leurs profits tout en n'étant pas capable de déterminer *ex ante* si leurs actions sont optimales. ALCHIAN insiste clairement sur la réalisation effective de profits positifs en tant que résultat des décisions des firmes et non en tant que but.

(ii) PENROSE reproche alors aux modèles biologiques de ne pas avoir de pouvoir normatif et de n'être capable d'expliquer les résultats qu'après coup. ALCHIAN a proposé une nouvelle théorie conceptualisant le comportement des firmes à partir de l'observation de leurs interactions. Mais, selon PENROSE, une théorie permettant de déterminer les firmes survivantes à long terme devrait prendre en compte toutes leurs actions et interactions induites par leur environnement, ce qui est impossible compte tenu du savoir (limité) des économistes. Cette critique peut paraître facile, sachant que les difficultés liées aux prédictions n'ont pas empêché les biologistes de mettre en œuvre la théorie évolutionniste.

(iii) Enfin, le troisième argument de PENROSE vise la passivité des firmes et des décideurs dans le modèle alchianien[214] : ceux-ci subissent la sélection de leur environnement comme une sanction et ne peuvent pas agir sur lui. Le processus est indépendant de la motivation des décideurs et des méthodes d'acquisition des ressources (humaines, naturelles, etc…) qui permettent aux firmes de croître. PENROSE apporte toutefois ici une réflexion nouvelle : la sélection des firmes ne peut être issue d'un processus aveugle fondé sur un comportement totalement aléatoire des décideurs, mais sur un processus d'apprentissage de la technologie et de découverte des ressources dont elle a besoin.

Dans un article devenu classique, FRIEDMAN [1953] a poursuivi en avançant que l'analyse de la sélection d'ALCHIAN était conciliable avec la rationalité et l'information

---

[213] La seconde section de l'article de ALCHIAN ([1950, p.213]) s'intitule *« Succes is based on results, not motivation »*, ce qui est assez significatif.

[214] *« Competition cannot reasonably be expected to exist if men are presumed to act randomly»* (PENROSE [1953, p.605]).

parfaites[215]. Développant une analogie biologique[216], il avance que les entreprises qui survivent à la concurrence sont celles qui réagissent « comme si[217]» elles savaient maximiser *ex ante* leurs futurs profits, et ceci quels que soient les facteurs qui déterminent leurs comportements (routines, tirage au sort…). FRIEDMAN est donc partisan d'un irréalisme méthodologique « pur » qui ne se justifie que sur le plan méthodologique. Selon lui, il y a sélection par le profit parce que les firmes qui en réalisent peuvent développer leur activité, alors que les autres ne peuvent que la réduire. FRIEDMAN prévoit qu'à la fin du processus de sélection seules les firmes qui ont adopté un comportement cohérent avec l'hypothèse de maximisation du profit vont subsister. On retrouve ce même argument chez ALCHIAN [1950], mais contrairement à lui, FRIEDMAN ne propose pas de modèles routiniers de comportement et ne précise pas sur quoi porte la sélection. Cela pose un problème car un raisonnement en terme de génétique des populations demande une description de ce qui est sélectionné et transmis d'un individu à l'autre (soit l'équivalent du code génétique), or rien de tel n'existe dans l'analyse de FRIEDMAN.

WINTER [1964, 1971/1993], soulevant une faiblesse dans l'argumentation de FRIEDMAN, fit remarquer que le processus de sélection nécessitait une continuité temporelle de comportement des firmes : celles qui sont proches de la maximisation et dont la profitabilité sera supérieure aux autres, doivent conserver ce comportement un certain temps avant d'accroître leur part de marché. FRIEDMAN, de même qu'ALCHIAN, se fondait sur des firmes aux comportements aléatoires. Or il n'y a *a priori* aucune raison de concevoir qu'une firme qui maximise son profit à un moment donné maintienne son comportement dans les périodes suivantes. Par contre, si les firmes ont des réactions « habituelles », celles qui maximisent vont se développer au détriment des autres. On peut imaginer que leur croissance va entraîner une modification dans le

---

[215] *«(…) the behavior of businessmen in some way or other approximated behavior consistent with the maximization of returns, it seems unlikely that they would remain in business for long.(…) The process of "natural selection" thus helps to validate the hypothesis can be based largely on the judgement that it summarizes appropriately the conditions for survival.»* (FRIEDMAN [1953, p. 22]).

[216] FRIEDMAN [1953] utilise l'image des feuilles d'un arbre qui, en recherchant systématiquement la lumière, se conduisent comme si elles cherchaient à maximiser leurs besoins.

[217] *« Firms behave* as if *they were seeking rationally to maximize their expected returns. »* (FRIEDMAN [1953, p. 22]).

système des prix, contribuant de ce fait à modeler un autre environnement économique dans lequel les mêmes firmes ne seront pas forcément à nouveau sélectionnées. On voit ainsi qu'un ordonnancement des firmes en fonction de leur degré de proximité du comportement maximisateur du profit n'est possible que dans un environnement spécifique. Lorsque le processus dynamique transforme l'environnement économique, il sollicite en même temps un renouvellement de l'action des firmes.

1.2.2.3. La référence biologique chez NELSON et WINTER [1982]

L'ensemble du débat suscité par l'article d'ALCHIAN [1950] se retrouve chez NELSON et WINTER [1982]. Leur volonté est de faire progresser cette discussion de manière décisive en construisant une théorie fondée sur l'analogie biologique et destinée à mieux comprendre les processus d'interactions du changement économique : *« Our use of the term 'evolutionnary theory' to describe our alternative to orthodoxy also requires some discussion. It is above all a signal that we have borrowed basic ideas from biology, thus exercising an option to witch economists are entitled in perpetuity by virtue of the stimulus our predecessor MALTHUS provided to DARWIN's thinking. We have already referred to one borrowed idea that is central in our scheme – the idea of economic 'natural selection'. Market environments provide a definition of success for business firms, and definition is very closely related to their ability to survive and grow.* (NELSON et WINTER [1982, p.9]).

Suivant la référence biologique, il s'agit alors d'identifier dans les comportements des agents économiques l'imitation, l'innovation et la réalisation de profits positifs. Ces trois notions deviennent les contreparties économiques respectives :

- *Des éléments de permanence ou d'hérédité* : pour les évolutionnistes les routines à la base des actions des agents économiques vont jouer les mêmes rôles que les gènes en biologie, c'est-à-dire qu'ils représentent le « patrimoine génétique » portant les informations utiles à la reproduction et à la transmission entre les générations ;

- *Du principe de mutation* : c'est un principe dynamique qui conduit vers les évolutions. Ce principe est repéré par les évolutionnistes dans les comportements de *« search »* (de recherche) qui sont à la base des innovations. Ces comportements fortement risqués, dont les résultats ne sont pas prévisibles, sont provoqués par les

situations de menace que traverse la firme (ou l'économie) et en assure la transformation ;

• *Du mécanisme de sélection* : c'est l'environnement concurrentiel[218] des firmes qui va sélectionner en fonction du critère de non-négativité des profits certains comportements à partir des gènes, des mutations et des différentes évolutions possibles.

Ces différentes caractéristiques, en particulier le rôle joué par les routines, expliquent pourquoi NELSON et WINTER caractérisent leur approche de « génétique organisationnelle » [*ibid.*, p.9]. Cette dernière est définie comme les processus par lesquels les traits caractéristiques des organisations, comme la capacité de production et celle de faire des profits, sont sélectionnés et transmis à travers le temps. Contrairement à FRIEDMAN [1953] qui a eu recours à l'argument du *« as if »* pour justifier l'hypothèse de la maximisation à long terme, WINTER [1964] a soutenu assez tôt que si l'hypothèse de rationalité limitée excluait l'optimisation, elle restait cependant compatible avec l'existence d'un processus de sélection évolutionniste. La notion de routine intervient dans ce contexte à partir d'une reprise partielle des arguments d'ALCHIAN [1950], mais la sélection va opérer à deux niveaux, celui de la firme et celui de l'industrie.

1.2.2.4. Les critiques liées à l'utilisation des métaphores biologiques

L'établissement de liaisons entre les concepts biologiques et économiques ne va pas sans soulever de difficultés.

La place de l'analogie biologique chez NELSON et WINTER [1982] a été largement discutée. Depuis SCHUMPETER les auteurs dont ils se sont inspirés ont exprimé des réticences à ce sujet. Pour PENROSE [1952] l'emploi des analogies biologiques revient à considérer qu'un principe exogène, la sélection naturelle, agit indépendamment des décisions conscientes et volontaires des agents économiques. L'influence de ces derniers peut être sous-estimée alors que les marchés et les institutions peuvent être le résultat involontaire de comportements délibérés. PENROSE propose une analyse qui suppose l'existence d'agents actifs mais « peu conscients » des résultats finaux de leurs actions délibérées. Les configurations des institutions et les

[218] Celui-ci est constitué par l'ensemble des résultats (considérés comme exogènes) des actions de toutes les firmes.

résultats des marchés ne sont donc dans ce cas que l'aboutissement des choix spontanés et délibérés des acteurs.

D'autres auteurs pensent que la dynamique proposée par NELSON et WINTER [1982] accorde une place trop importante aux processus stochastiques exogènes. Pour WITT [1991] l'évolution doit être perçue comme la transformation d'un système au cours du temps *via* un changement engendré de manière endogène, ce qui implique la nécessité d'expliciter les mécanismes endogènes. Mais l'évolution économique ne peut résulter que de l'interaction entre des facteurs internes et des facteurs externes, et sa nature ne peut être définie qu'à travers la manière dont les mécanismes endogènes tentent de modifier et de s'adapter à l'environnement (MUNIER [1999]). Si on suppose que les processus qui engendrent l'évolution sont exogènes, il faut se poser la question de l'origine des mutations, et dans ce cas, la seule référence à un processus stochastique ne peut constituer la seule explication (PAULRE [1997, 1999]).

Dans le processus de sélection, la primauté accordée aux gènes, au détriment des phénotypes, est souvent contestée. En biologie la différence entre les génotypes[219] et les phénotypes résulte de la transmission par l'hérédité des gènes et non des caractères acquis. Les évolutionnistes distinguent les caractères de base de la firme et ceux acquis par les agents par l'apprentissage, qui eux se transmettent dans le temps[220]. En ce sens leur démarche se révèle être *a priori* plus lamarkienne[221] que darwinienne (EGE [1993, 2002]).

Pour EGE [1993, p. 484] *« Une théorie qui suppose la soumission passive d'un individu à une loi toute puissante - la sélection naturelle -, une problématique qui refuse toute pertinence théorique à la question de l'origine et du mode de production des variations, ne peuvent rendre compte que de la surface des phénomènes de changements technique et d'innovation. »* Le problème posé, largement débattu dans la

[219] C'est-à-dire le patrimoine génétique.

[220] *« One is the population of genotypes, defined as the genetic inheritance of living creatures. The second is the population of phenotypes, defined in terms of a set of variables that happen to be of interest to the analyst, but wich include those that influence the 'fitness' of each living creature. »*, NELSON [1995, p. 57].

[221] Contrairement à DARWIN, LAMARCK a formulé l'hypothèse, admise en sciences sociales mais encore débattue aujourd'hui en biologie, qu'il existait des boucles de rétroaction de l'environnement vers les génotypes, c'est-à-dire que les individus ont une capacité d'apprentissage. Les modèles de sélection de ALCHIAN [1950] et de NELSON et WINTER [1982] faisant intervenir les apprentissages et les démarches par « essais -erreurs » relèvent de cette analyse.

littérature évolutionniste, est celui du choix des unités de sélection. En s'opposant à un individualisme méthodologique strict, HODGSON [1994] soutien qu'il est nécessaire de prendre en compte plusieurs niveaux de sélection en incluant celui des groupes sociaux à travers la sélection des habitudes, des individus, des routines et des institutions. Selon lui il n'y a aucune incompatibilité entre le principe darwinien de la sélection naturelle et le respect de l'intentionnalité individuelle HODGSON [2002]. Pour d'autres auteurs, comme FOSTER [2001], le processus de sélection ne peut concerner qu'une population d'individus hétérogènes.

Il nous semble que les références liées aux métaphores biologiques doivent apporter à l'économiste un schéma de pensée qui, pour être opérationnel et réellement enrichissant, ne doit pas être appliqué strictement. Même si nous nous sommes limités qu'à l'examen d'une petite partie des thèses de ce débat, cette thématique a suscité et suscite encore aujourd'hui une abondante littérature. FREEMAN [1991] a convenu du rôle positif et stimulant des analogies biologiques dans le développement d'une approche historique des systèmes économiques et a reconnu également l'importance des processus sélectifs dans le développement de la science et de la technologie. Cependant, il met en garde contre les dangers d'une utilisation trop poussée de la référence biologique dans les sciences sociales, parce que les systèmes sociaux sont beaucoup plus complexes et possèdent plus de niveaux de sélection que le milieu naturel, mais surtout parce que le rôle de «l'intervention intentionnelle[222] » est très différente dans l'évolution de la technologie. HODGSON [2002] après avoir recensé les objections qui sont apportées aux analogies biologiques en économie, suggère la référence à un *« darwinisme universel »* constitué d'un *« cœur »* de principes darwiniens généraux, qui, complétés d'explications spécifiques à chaque domaine scientifique peuvent s'appliquer à de nombreux phénomènes. Comme RALLET [1999] nous pouvons considérer que les économistes évolutionnistes doivent « inventer » la biologie à laquelle ils se réfèrent, comme les économistes néoclassiques ont inventé la physique mécanique qui leur a servi à légitimer scientifiquement leur approche. Finalement c'est la démarche à laquelle nous invitent NELSON et WINTER ([1982, p. 11]) lorsqu'ils affirment : *« We are pleased to exploit any idea from biology that seems helpful in the understanding of economics problems, but we are equally prepared to pass over*

[222] *« The teleological aspect of human evolutionary processes. »* (FREEMAN [1991, p. 228]).

anything that seems awkward, or to modify accepted biological theories radically in the interest of getting better economic *theory* ».

1.3. Les principes de l'approche évolutionniste

Les points suivants vont nous permettre de présenter les principales hypothèses de l'analyse évolutionniste. Ces hypothèses mettent en avant certains concepts qui vont avoir une portée générale et qui entraîneront des conséquences pour une redéfinition de l'innovation.

1.3.1. Une approche principalement micro-économique

En choisissant initialement les firmes comme objet d'analyse et leurs comportements hétérogènes, l'analyse évolutionniste s'affirme comme principalement micro-économique.

1.3.1.1. Les firmes au centre de l'analyse évolutionniste

Parmi les agents économiques, les firmes occupent la première place dans les approches évolutionnistes. *A priori*, les consommateurs, dont l'évolution des préférences et l'adaptation à des offres de meilleure qualité ou de plus grande variété jouent un rôle important dans la sélection du marché, devraient être étudiés plus spécifiquement. Or ce n'est pas souvent le cas, compte tenu du fait que les innovations étudiées sont souvent des innovations de procédés, et que par conséquent les usagers eux-mêmes sont des firmes. Par contre, nous verrons que d'autres institutions, comme par exemple des centres de recherche publics, peuvent avoir une place significative dans l'analyse évolutionniste.

Le caractère micro-économique de l'approche évolutionniste conduit à porter une attention particulière aux interactions entre les acteurs qui ne se résument pas seulement à des relations concurrentielles. Les études empiriques montrent l'importance des relations entre firmes et avec les institutions[223]. Les études des systèmes nationaux

[223] Cela a contribué à développer particulièrement l'analyse des alliances inter-firmes.

d'innovations[224] (SNI) ont également permis de mettre à jour la complexité de ces relations (LUNDVALL [1992]).

1.3.1.2. L'hétérogénéité des comportements des agents

L'hétérogénéité des comportements des agents est un autre élément central dans l'approche évolutionniste. C'est la variété des comportements et des situations individuelles qui entretient la dynamique du système économique. L'approche évolutionniste rejette donc une approche en termes d'agent représentatif ou d'agents homogènes, caractérisée par un comportement complexe[225]. Au contraire, elle conçoit l'Economie, comme contenant « beaucoup » d'individus distincts les uns des autres, chacun ne connaissant que les aspects locaux de l'économie qui le concernent directement. Selon KIRMAN [1991, p. 107] dans cette conception *« Ils* [les agents] *s'ajustent en fonction des facteurs locaux de l'économie et en fonction des autres agents avec lesquels ils font des transactions ou desquels ils reçoivent des informations. »* Les agents économiques sont donc en quelque sorte « myopes ».

CORIAT et WEINSTEIN [1995, p.115] relèvent la singularité de ces hypothèses et vont jusqu'à qualifier l'approche évolutionniste *« d'ultra-individualiste »*. Pour notre part, et afin de ne pas conférer à la théorie évolutionniste une connotation idéologique qu'elle n'a pas, nous préférons retenir la notion *« d'hétérogénéité radicale »* proposée par RALLET [1999, p.33] par analogie avec celle d'incertitude radicale. En fonction de ces caractéristiques le changement ne peut apparaître de manière endogène qu'à la condition qu'existent des facteurs d'asymétrie concernant plus particulièrement les capacités innovatrices, d'imitation et de productivité des firmes. L'évolution du système n'est pas seulement entretenue par des chocs externes, sa dynamique est également en partie endogène et liée à des différences internes.

Pour que le système change, des facteurs de nouveauté et des différences doivent apparaître, ce qui traduit une certaine hétérogénéité. Cela a pour conséquence que le système doit être flexible vis-à-vis d'une certaine variété interne. C'est une des

---

[224] Voir le Chapitre 4.

[225] Dans ce cas, l'interaction est limitée à celle entre l'individu et son environnement et elle est toujours étudiée du point de vue de l'individu lui-même.

conditions nécessaires pour rendre l'innovation possible. Si le système est trop rigide aucun écart de comportement n'est envisageable.

La notion de diversité se retrouve à différents niveaux et peut caractériser différents ensembles. A un premier niveau l'analyse évolutionniste traite de l'hétérogénéité des firmes. Un second niveau permet de caractériser l'hétérogénéité des modes de changement des secteurs industriels et des logiques d'innovations sectorielles (PAVITT [1984]). Enfin, à un troisième niveau c'est la variété des dynamiques nationales qui peut être soulignée à travers la notion de SNI (LUNDVALL [1992]).

Par ailleurs, dans l'analyse évolutionniste l'hypothèse d'hétérogénéité des agents est une hypothèse cohérente avec l'accent qui est mis sur les processus d'apprentissage. Ces derniers permettent aux agents, dotés de capacités cognitives qui leur sont propres, d'accumuler des connaissances qui sont en grande partie spécifiques à la firme. Si l'on maintient la notion d'agent représentatif, ces phénomènes ne peuvent pas être pris en compte. Par contre, l'hypothèse d'hétérogénéité permet d'examiner les manifestations et les origines de performance et de potentiels différents au sein d'une même branche industrielle. Nous serons conduit à aborder d'autres dimensions de l'analyse évolutionniste qui introduisent des mécanismes ou des comportements qui vont venir limiter certaines hétérogénéités.

1.3.2. Des agents économiques dotés d'une rationalité limitée

NELSON et WINTER [1982] établissent comme un des fondements de l'évolutionnisme contemporain la reconsidération de l'hypothèse de comportement d'un agent économique maximisateur doté d'une rationalité substantielle. Ils préfèrent opter pour des agents, ou des organisations, qui doivent faire face à un environnement complexe et changeant, tout en étant dotés de capacités cognitives limitées. Ainsi, NELSON et WINTER font appel à la notion de rationalité limitée, ou rationalité procédurale, développée par SIMON [1955, 1959][226]. Il existe une double opposition entre la rationalité procédurale et la rationalité substantive de l'approche néoclassique. D'une part, la première conception porte sur les procédures de décision, alors que la

[226] Selon certains auteurs évolutionnistes, SIMON apporte ici les fondements micro-économiques dont la théorie évolutionniste avait besoin pour développer un nouveau type d'analyse. Ainsi, DOSI [2002, p.3] a qualifié la théorie évolutionniste de *« post Simonian Economics »*.

seconde porte sur les résultats. D'autre part, la rationalité procédurale ne prend pas les objectifs et les moyens comme donnés, mais comme les objets mêmes d'une recherche, la conception néoclassique considérant l'objectif et les moyens utilisables par les agents comme donnés *a priori*. La rationalité procédurale doit permettre d'étudier de manière réaliste et plus profonde, les processus de prise de décision de la firme, et «dans » la firme, dans des situations complexes d'incertitude radicale de l'environnement (KNIGHT [1921])[227]. Elle permet de mettre l'accent sur les processus d'apprentissage et de résolution de problèmes.

L'information dont dispose l'entreprise évolutionniste sur son environnement concurrentiel a deux caractéristiques (LESOURNE *et al.* [2002]) : (i) elle ne possède qu'un caractère local ; (ii) elle n'a qu'une valeur instantanée. Le marché est alors un espace connexe dans le sens où les contextes locaux de chaque firme en concurrence se recouvrent. La firme, s'appuyant sur une information locale, ne perçoit pas instantanément les chocs qui interviennent en dehors de son contexte local, comme la variation du prix d'un produit substituable ou une innovation introduite par un de ses concurrents. Les ajustements qu'elle opère se font donc avec un certain retard. L'information perçue par les firmes n'a qu'une valeur instantanée si les concurrents introduisent des changements imprévisibles. Dans ce cas également, les firmes sont conduites à ajuster leurs actions séquentiellement. Cependant, les firmes en concurrence ne se contentent pas seulement de s'adapter séquentiellement à une information locale ou instantanée. Elles prennent des décisions sur la base de calculs hypothétiques, c'est-à-dire dans l'espoir de s'ouvrir de nouvelles opportunités de profits. Etant donné l'incapacité des firmes à prévoir les états futurs de l'environnement ces calculs sont subjectifs. Cela signifie que la firme évolutionniste peut faire des mauvais choix stratégiques et commettre des erreurs.

Ces éléments peuvent être synthétisés en explicitant les hypothèses liées à la rationalité des firmes évolutionnistes (LESOURNE *et al.* [2002]) :

---

[227] Pour KNIGHT [1921] l'incertitude est inextricablement liée à l'évaluation par le décideur d'une situation non encore survenue dans le but de prendre une décision. Dans la mesure où l'incertitude est liée à une appréciation, la réduction de l'incertitude passe également et d'abord par cette appréciation : directement, en choisissant des décisions qui pourront se révéler *ex post* les meilleures, mais aussi, indirectement, en organisant l'activité économique dans le but de soutenir les décisions prises et d'assurer leur réalisation.

- *Les firmes ont une rationalité limitée* : elles ont pour objectif de réaliser un profit positif, ou d'atteindre un taux de profit dépassant un certain seuil, mais elles déterminent leurs actions sur la base d'un calcul réalisé avec des capacités de traitement de l'information limitées et sur la base d'une information locale. Elles ne peuvent pas identifier à chaque période l'ensemble des actions possibles pour faire un choix optimal dans un contexte d'interaction. Les firmes ne maximisent pas, elles « satisfont » (*« satisficing »*) certains critères. Pour cela, elles mettent en œuvre des routines, c'est-à-dire des processus de décision qui s'appuient à la fois sur des règles de décision et des processus d'apprentissage ;
- *Les firmes ont une rationalité adaptative* : les firmes peuvent améliorer leur situation concurrentielle en révisant leurs anticipations en fonction des nouvelles informations et adaptant leur stratégie. La rationalité *adaptative* correspond à des règles dynamiques d'apprentissage des firmes dans le but d'améliorer leur situation ;
- *Les firmes ont une rationalité créatrice* : les firmes peuvent également prendre l'initiative de provoquer des changements dans leur environnement. Ces changements ne sont pas obligatoirement guidés par des opportunités de profit, mais ils peuvent être décidés à la suite de calculs hypothétiques. Ainsi, pour les firmes dotées de rationalité *créatrice* l'environnement local ne représente pas une contrainte puisqu'elles cherchent à le modifier à leur avantage.

1.3.3. Le rôle des routines

En faisant le constat que la firme n'optimisait pas une fonction de production et n'allouait pas des *inputs* de façon rationnelle, NELSON et WINTER [1982] ont rejeté l'approche standard de la rationalité économique. Dans leur analyse, la firme possède un ensemble de compétences individuelles et collectives, de techniques de production, de procédures organisationnelles, qu'elle coordonne en fonction des problèmes (de production, d'innovation) et des opportunités qu'elle rencontre. Cet ensemble productif, constitué d'un ensemble de décisions individuelles et collectives plus ou moins satisfaisantes, conduit à des processus de production reposant en grande partie sur des décisions passées.

CORIAT et WEINSTEIN [1995, p. 115] remarquent que les hypothèses retenues par l'analyse évolutionniste conduisent à *« faire exploser »* la firme en prenant en compte tous les agents qui la composent. De ce fait se pose la question de savoir comment

s'effectue la coordination d'une firme qui est à la fois un ensemble d'individus distincts et hétérogènes, mais aussi une entité qui existe en tant que telle[228]. S'inspirant des travaux de SIMON [1961] et de CYERT et MARCH [1963], NELSON et WINTER [1982] avancent que la cohérence des décisions de la firme est assurée par les routines organisationnelles suivies par les agents dotées de compétences individuelles.

1.3.3.1. Les compétences individuelles des agents

En premier lieu, NELSON et WINTER [1982] décrivent les individus composant la firme comme dotés de compétences en partie tacites et en partie codifiées. Ils définissent celles-ci comme *« a capability for a smooth sequence of co-ordinated behaviour that is ordinarily effective relative to its objectives, given the context in which it normaly occurs »* (*ibid.*, p.73). La firme est dotée de « répertoires » de connaissances productives, individuelles et collectives. Ces répertoires sont situés dans des « mémoires formelles », à travers des ouvrages, des documents, des *artefacts*, mais aussi des mémoires et des compétences individuelles.

La firme ne mobilise jamais tous ses répertoires, une partie seulement est mise en œuvre selon les circonstances[229]. Cela signifie qu'elle dispose de plusieurs options pour réaliser les combinaisons productives et c'est la manière dont elle les met en œuvre qui crée un processus productif adapté à un environnement donné. Si les répertoires de connaissances et de compétences sont en grande partie individuels, c'est la firme en tant qu'organisation qui les transforme et les active automatiquement. Les décisions de la firme sont comme «programmées »[230], c'est-à-dire que face à des situations connues, les agents vont avoir tendance à répéter les actions qui se sont déjà révélées

---

[228] *« What is central to a productive organizational performance is coordination ; what is central to coordination is that individual members, knowing their jobs, correctly interpret and respond to the messages they receive.»* NELSON et WINTER [1982, p. 104].

[229] Les répertoires de connaissances ne sont pas tous présents « physiquement » dans la fonction de production, une partie des connaissances n'est pas toujours activée de façon continue dans l'activité productive.

[230] Parmi les avantages procurés par l'automaticité des choix, le principal est d'éliminer les délibérations et les calculs, qui, dans une optique de rationalité procédurale, posent des problèmes et d'aboutir à des comportements qui vont être prévisibles. Pour reprendre la métaphore biologique, les routines ici représentent la contrepartie des gènes d'un organisme.

satisfaisantes dans le passé dans le même type d'environnement et qui ont été retenues pour cela.

Suivant un processus d'apprentissage, les routines reposent souvent sur des connaissances et des savoir-faire tacites, difficiles à expliciter dans tous les détails. Ainsi, il ne suffit pas d'une instruction verbale sur la façon d'effectuer une tâche pour être performant, mais celle-ci ne constitue qu'une connaissance de départ complétée ensuite par un processus d'apprentissage. Les connaissances tacites sont difficiles à exprimer, à observer, à transmettre et à externaliser[231] : cela peut être lié à des techniques de communication, à des problèmes de transferts de compétences et de coûts économiques.

1.3.3.2. Les routines organisationnelles

De la même façon que les agents essaient de se remémorer ce qu'ils ont déjà effectué dans des situations similaires en cherchant dans leur répertoire de réponses, les organisations utilisent des routines organisationnelles spécifiques qui constituent leur connaissance opérationnelle ou leur qualification. Les routines sont donc définies comme l'équivalent au niveau de la firme des «savoir-faire » des individus[232]. NELSON et WINTER [1982, p. 97] expliquent leur pensée en écrivant *« We use 'routine' in a highly flexible way, much as 'program' is used in discussion of computer programming. It may refer to a repetitive pattern of activity in an entire organization, to an individual skill (…)».* Les routines ont une double nature : elles représentent à la fois l'ensemble des connaissances de leurs membres et leurs compétences, mais elles sont aussi la mise en œuvre de ces dernières. Comme le souligne LAZARIC [1999], les routines intègrent la dimension d'un «stock inerte de connaissances » et en même temps l'activation de ce stock. Cependant, bien que NELSON et WINTER [1982] se réfèrent explicitement aux compétences individuelles dans leur définition des routines, les compétences organisationnelles ne sont pas assimilables selon eux à la somme des savoir-faire individuels. Selon les auteurs (*ibid.*, p.105) *« To view organizational memory as reducible to individual members memories is to overlook, or undervalue, the linking of*

[231] Les routines tacites constituent un actif spécifique, au sens de WILLIAMSON, pour la firme qui en assure la maîtrise. Voir le *Chapitre 4*.

[232] *« Routines are the skills of an organization »* NELSON et WINTER [1982, p. 124].

those individual memories by shared experiences in the past, experiences that have established the extremely detailed and specific communication system that underlies routine performance ».

1.3.3.3. L'évolution des routines, l'innovation et l'apprentissage

A partir des caractéristiques précédentes des routines une question émerge concernant leur évolution et leur changement. Si les routines apparaissent comme des automatismes permettant de faire face à des situations complexes en « satisfaisant », le problème qui se pose est de savoir comment ces automatismes peuvent évoluer et comment ils vont intégrer de nouvelles connaissances[233]. C'est là que le concept de routine peut apparaître ambigu. D'abord NELSON et WINTER assimilent les routines à des comportements répétitifs et à des organisations qui ne sont pas confrontées à des situations fortement instables et incertaines[234]. Cependant il existe des routines, ou des procédures, qui, dans un environnement concurrentiel et radicalement incertain vont pousser la firme à explorer de nouveaux produits, de nouvelles technologies ou de nouvelles formes d'organisation. La nature de l'environnement de sélection implique alors de doter les firmes de capacités cognitives. Pour cela NELSON et WINTER [1982, p. 18] introduisent une catégorie de routines spécifiques, les *« routines changing »*, qui vont venir modifier les autres types de routines, celles qui relèvent du *« satisficing »*. Dans leur interprétation de la dynamique du changement technique les auteurs

[233] Sur ce point, comme l'analyse ZUSCOVITCH [1993, p. 463], il est nécessaire de dépasser le débat superficiel qui oppose les routines à des mécanismes de délibération pure : *« Le comportement automatique n'est pas seulement un moyen pour éviter de penser mais c'est un mécanisme de réponse et d'apprentissage très efficient (…). Une représentation naïve de la routine peut conduire à opposer d'un côté la simple routine de l'intervalle à la maximisation parfaitement informée de l'autre. Selon ce point de vue, plus nous sommes rationnels, plus nous sommes capables de nous adapter au changement. Or, rien n'est moins certain. Plus la routine que nous adoptons et simple et automatique, plus un changement déclenchera une réponse dans le sens où quelque chose de fondamental s'est produit. Nous essaierons plutôt de remplir cette rationalité de routines transitoires avec des catégories variées de routines en fonction de leur intensité (et de leur complexité) et d'étudier comment elles dépistent la nouveauté et nous rendent réactifs au changement. La rationalité consciente jouera un rôle différent lié aux routines mais ne se substituera pas à elles ».*

[234] Selon NELSON et WINTER [1982, p. 96] le comportement des organisations qui ont pour activité principale une activité de R&D ou de conseil ne peut pas être identifié par des routines.

distinguent plusieurs stades de mutation jusqu'à l'étape de l'innovation (*ibid.*, p.112-124) :

- *La copie* (*« replication »*) : les routines peuvent évoluer à travers leur copie. D'un point de vue interne à la firme cela se traduit par une augmentation des capacités de production qui poussent les firmes les plus performantes à transférer ou à copier des activités productives. Le changement peut être aussi induit par une pression externe poussant les firmes à copier les « meilleures pratiques » pour les adapter aux spécificités du milieu local.
- *L'imitation* : les firmes qui imitent introduisent de nouveaux éléments en combinant différemment les *inputs*. Par exemple, dans le cas du *reverse engineering* les *inputs* ne sont pas toujours connus et le but est de produire le même *input* final.
- *La disparition* (*« contraction process »*) : les performances des firmes dépendent de variables aléatoires comme la réussite (non prévisible) des processus d'innovation et des comportements passés. A long terme, les firmes qui ne savent pas saisir les opportunités de l'environnement ou dont les routines et la technologie ne sont pas satisfaisantes sur la longue période, ne passeront pas au travers du mécanisme de sélection. Il est possible de s'interroger ici sur la nature de ces changements guidés essentiellement par la capacité technique d'innovation et qui n'intègrent pas dans les mutations « l'identité organisationnelle » des firmes (ARENA et LAZARIC [2003]).
- *L'innovation* : l'extension par les firmes de certaines pratiques ou l'imitation des concurrents introduit des mutations profondes de l'environnement. Les firmes adaptent leur comportement plus ou moins activement afin de résister à la pression sélective[235]. Le processus de recherche et d'exploration se cristallise ensuite par la mise en œuvre d'innovations technologiques permettant à la firme de proposer de nouveaux produits avec ou sans R&D. Pour NELSON et WINTER l'innovation est le résultat d'un comportement de « quête » (*« search »*). Le concept de *« search »* permet de rendre compte du changement par l'engagement dans un processus risqué «d'essais-erreurs », dont la justification ne peut apparaître qu'*ex post*. Il correspond à la contrepartie du concept de « mutation » dans la théorie évolutionniste en biologie.

[235] Nous avons vu que NELSON et WINTER [1982] substituent à l'hypothèse de maximisation du profit l'hypothèse « d'évolution adaptative » signifiant que les firmes modifient leur taux de profit en fonction des normes en vigueur dans leur voisinage.

Dans ce schéma de l'innovation NELSON et WINTER [1982] n'explicitent pas clairement l'origine des capacités d'exploration des possibilités d'innovation des agents. Le schéma initial qu'ils présentent met moins en avant des agents réactifs se comportant de manière aléatoire, que le rôle contraignant de leur environnement de sélection. Finalement on peut se demander si le comportement de *search* n'est pas qu'un autre nom du hasard. L'analyse évolutionniste de la firme a considérablement progressé sur ce point : dans les analyses récentes le rôle actif de l'environnement de sélection est toujours présent, mais l'attention des auteurs évolutionnistes s'est de plus en plus portée sur la capacité propre des agents (DOSI *et al.* [1990], COHENDET et LLERENA [1999]). Cette évolution s'explique par l'importance croissante qu'a pris l'innovation en tant que cadre de la différenciation concurrentielle. Les agents, et la firme, sont redéfinis par leurs compétences et leur capacité se manifeste par une capacité d'apprentissage : *« (…) l'agent évolutionniste ne fait pas que chercher, il apprend. »* (RALLET [1999], p. 38). Dans cette idée l'étude de l'évolution technologique et de la contribution des agents à celle-ci pourrait se résumer à la question de savoir comment ceux-ci sélectionnent et accumulent les connaissances utiles à leur activité de production. Toutefois un problème se pose : cette seconde approche dynamique, dans laquelle les agents construisent et orientent le changement technique, est-elle compatible avec l'approche initiale de NELSON et WINTER [1982] dans laquelle les agents suivent des règles, s'imitent, et quand leur survie est menacée se transforment en explorant de nouvelles opportunités ? L'articulation des deux analyses n'est pas très claire ; la seconde approche se superposant en fait à la première s'est largement développée en accordant une importance cruciale à la notion d'apprentissage. C'est ce qui fait écrire à PAULRE [1997, p. 252] que *« l'objet central de l'approche évolutionniste est l'apprentissage, (…) c'est-à-dire (…) la capacité de s'adapter et de cumuler les effets passés de l'adaptation »*, et à RALLET [1999, p. 39] que le risque est alors de donner l'impression que *« (…) tout est apprentissage dans le monde évolutionniste »*.

1.4. Le modèle schumpétérien de compétition technologique de NELSON et WINTER [1982]

Les éléments de base de l'analyse évolutionniste que nous avons présentés depuis le début de cette section ouvrent la voie à une théorie de la concurrence dans

laquelle les actions des entreprises sont décentralisées. La rationalité des firmes n'est pas résolue *ex ante* et ni les conséquences de leurs actions, ni les critères de leur survie ne sont connus avec certitude *ex ante*. Formellement, dans les modèles évolutionnistes la concurrence se traduit par un double phénomène prenant la forme soit d'un processus d'apprentissage conduisant les firmes à ajuster leurs actions, soit comme un processus de sélection qui favorise les comportements de certaines firmes et élimine les autres.

Rompant avec les hypothèses des modèles néoclassiques, NELSON et WINTER [1982, pp. 281-287] proposent un modèle évolutionniste schumpétérien de compétition technologique dans lequel le processus est en continuel déséquilibre, les ensembles de choix possibles ne sont plus donnés et les conséquences d'un choix ou d'un autre ne sont pas connues. Le modèle étudie l'impact des comportements d'adaptation et d'évolution des firmes sur la formation endogène de la structure de marché. L'accent est mis sur le progrès technique[236] et les dépenses de R&D sont au centre du processus d'innovation. Les auteurs examinent en particulier les comportements d'imitation et d'innovation technologiques des firmes et attribue à ces comportements des résultats différenciés.

1.4.1. Les hypothèses du modèle

Le modèle considère une industrie dans laquelle il y a au départ n firmes monoproduit en concurrence, indicées $i = 1...n$, qui produisent un bien unique homogène. Le but est d'étudier la variation de n au cours du temps, c'est-à-dire la tendance ou non à la concentration. La demande totale D_t est une fonction décroissante du prix. S_t, l'offre totale à la période t, est égale à la somme des offres individuelles des firmes produisant à cette période. Pour chaque période t, il existe un prix unique p_t qui va égaliser la demande et l'offre totales. A travers leur productivité, les firmes sont différenciées par les technologies qu'elles utilisent. A chaque moment, chaque firme i n'utilise que la meilleure technologie qu'elle connaît et produit une quantité q_{it} qui dépend de son stock de capital K_{it} et de la productivité de ce stock A_{it} suivant la fonction : $Q_{it} = A_{it} K_{it}$

[236] En conséquence les innovations organisationnelles sont exclues.

L'ensemble des techniques est caractérisé par des rendements d'échelle constants et des coefficients d'*inputs* fixes (ils sont donc complémentaires). L'offre d'*inputs* est supposée élastique et leur prix est constant durant toute la période considérée. Chaque technologie requiert la même quantité d'*inputs* complémentaires par unité de capital. Les firmes sont distinguées uniquement par la quantité d'*output* par unité de capital. c est le coût d'une unité de capital, étant donné les quantités et les prix des *inputs* complémentaires. Par hypothèse c est identique pour toutes les firmes, quelle que soit la technologie utilisée.

La variation du stock de capital entre deux périodes de temps dépend de l'investissement I et du taux de dépréciation du capital d : $\Delta K_{it} = I_{it} - d\,K_{it}$

1.4.2. Les séquences des niveaux de productivité, d'investissement et d'évolution de l'industrie

Pendant la période considérée les firmes engagent des dépenses de R&D. Celles-ci sont définies par unité de capital. Une firme peut découvrir une technologie plus performante soit en innovant, soit en imitant les technologies des autres firmes. La productivité A_i peut donc varier selon deux mécanismes :

- pour imiter les firmes engagent une dépense de R&D r_{im}
- pour innover les firmes engagent une dépense de R&D r_{in}

Les deux types d'activités de R&D sont modélisés comme des processus en deux étapes de prélèvement d'échantillons au hasard[237]. Soit le processus de R&D n'aboutit pas, et la firme maintient son niveau de productivité en cours ; soit il aboutit selon une

[237] Pour une période donnée la probabilité qu'une firme puisse tirer parmi les possibilités d'innovation est proportionnelle aux dépenses de la firme dans ces domaines. Ensuite sur plusieurs périodes, le nombre moyen de tirages d'innovation et d'imitation par période est proportionnel à la moyenne des dépenses de la firme par période dans chaque type de R&D. Un tirage d'innovation est un prélèvement d'échantillon au hasard compte tenu d'une distribution de probabilités des différents choix technologiques. Un tirage d'imitation permettra avec certitude à la firme « capable » d'accéder à la meilleure technologie disponible.

probabilité qui est fonction du montant des dépenses de R&D en t et de l'efficacité de cette activité[238], notée a_m pour la R&D imitative et a_n pour la R&D innovante :

- Probabilité que la R&D imitative soit un succès = $Min\left[a_m r_{im} K_{it}, 1\right]$
- Probabilité que la R&D innovante soit un succès = $Min\left[a_n r_{in} K_{it}, 1\right]$

Quand la R&D imitative aboutit, cela signifie que la firme a l'opportunité d'observer et de copier la meilleure technologie disponible égale à $\hat{A}_t$. Dans le cas de la R&D innovante pour une firme i à la période t, une réussite conduit au tirage d'une variable aléatoire $\tilde{A}_{it}$. NELSON et WINTER (*ibid.* p. 294) retiennent ensuite deux spécifications de la distribution des probabilités des options technologiques, correspondant à deux régimes de changement technologique. Dans le premier régime dit « basé sur la science » (*« science-based industry »*, *ibid.* p. 294), la distribution de probabilité est indépendante de la firme mais dépendante du temps, si l'on considère un taux de progrès technique exogène, issu des progrès de la recherche fondamentale. Dans le deuxième régime, dit de «technologie cumulative » (*« cumulative technology »*) la distribution des résultats de la R&D est dépendante du niveau actuel de productivité de la firme, il n'y a aucune détermination exogène des possibilités techniques.

Lorsqu'une firme s'engage en même temps dans des activités de R&D imitative et innovante, sa productivité en $t+1$ sera, selon sa réussite, la meilleure productivité qu'elle ait pu obtenir, soit : $A_{it+1} = Max\left[A_{it}, \bar{A}_t, \tilde{A}_{it}\right]$

Le profit de chaque firme par unité de capital s'écrit : $\prod_{it} = p_t A_{it} - c - r_{in} - r_{im}$

A chaque période l'investissement I_{it} est déterminé par une règle faisant intervenir trois indicateurs :

- le ratio $\frac{p_t A_{it}}{c}$ entre le chiffre d'affaires et le coût par unité de capital détermine le taux de croissance espéré par la firme à la période t ;
- la part de marché $\frac{q_{it}}{S_t}$ influence la stratégie de prix des entreprises ;

[238] a est un coefficient identique pour toute l'industrie qui indique la rapidité potentielle d'évolution du secteur pour les activités d'imitation et d'innovation : plus a_m est élevé, plus la diffusion des technologies existantes peut être rapide ; plus a_n est élevé plus le rythme potentiel d'innovation peut être rapide.

- le profit par unité de capital $\prod_{it}$ définit la capacité de financement de l'investissement.

Il est donc possible d'écrire : $I_{it} = F\left(\frac{p_t A_{it}}{c}, \frac{q_{it}}{S_t}, \prod_{it}\right)$

où F est une fonction non négative, non décroissante dans son premier argument et non croissante dans les deux autres.

A chaque période *t*, chaque firme *i* met sur le marché une production égale à sa capacité de production $A_{it}K_{it}$, la somme des productions détermine le prix d'équilibre sur le marché qui va agir sur la rentabilité de chaque firme. Entre deux périodes, la production q_i va varier en fonction de la productivité A_i et du niveau d'investissement I_i. Elle dépend donc d'éléments stochastiques liés à la R&D.

1.4.3. Les simulations

Compte tenu de la complexité du modèle son comportement ne peut être étudié qu'au moyen de simulations numériques[239]. Celles-ci doivent permettre d'analyser la compétition technologique vue comme une compétition entre les firmes innovatrices et imitatrices.

[239] Pour les simulations NELSON et WINTER retiennent cinq configurations initiales de l'industrie avec respectivement deux, quatre, huit, seize et trente-deux firmes. Au départ l'ensemble des firmes possèdent la même taille et le même niveau de productivité. Une moitié des firmes réalise des dépenses de R&D pour innover et pour imiter ; l'autre moitié uniquement dans le but d'imiter. Les niveaux de r_{im} et r_{in} sont ajustés de telle sorte que les niveaux de départ des dépenses totales d'imitation et d'innovation soient les mêmes dans toutes les expériences. Deux régimes de financement de l'investissement sont alternativement étudiés : dans le cadre du premier, la firme peut emprunter 2,5 fois ses profits nets ; dans le second elle peut uniquement emprunter à la hauteur de ses profits. Les dix simulations réalisées couvrent 101 périodes (une période de départ + 100 périodes). L'industrie considérée possède une technologie « basée sur la science » où la productivité augmente régulièrement d'une période à l'autre.

1.4.3.1. L'évolution des structures de marché

La simulation s'appuie sur deux structures de marché initiales, une concentrée et une non concentrée, dans lesquelles les firmes font de la R&D imitative et de la R&D innovante. Dans tous les cas la simulation révèle une tendance à la concentration, mais si la structure initiale est déjà concentrée la structure évolue moins que dans le cas contraire. Les tests des données microéconomiques tirées des simulations font apparaître, *ceteris paribus*, les tendances suivantes :

- *Plus le progrès technique est rapide, plus il agit sur la tendance à la concentration* : une firme qui réussit à innover possède un avantage significatif, puisqu'elle accroît sa marge. Ses investissements augmentent en valeur absolue par rapport à la période précédente et elle accroît ainsi sa probabilité d'innover à nouveau ;
- *La variance des résultats de la R&D innovante agit peu sur la tendance à la concentration* : la probabilité d'adopter une technologie plus efficiente influence plus la tendance à la concentration que la variance des résultats de la R&D. Plus la probabilité d'une nouvelle technologie est faible, plus la tendance à la concentration est forte. Selon l'interprétation de NELSON et WINTER dans les secteurs qui ont peu de chances de voir se réaliser des innovations majeures et où les firmes peuvent s'approprier durablement leur bénéfice, il y a une tendance à la concentration assez forte ;
- *Les difficultés d'innovation agissent significativement sur la tendance à la concentration* : plus une innovation est complexe à imiter, plus elle va conférer à l'innovateur un avantage durable ;
- *Une politique d'investissement soutenue en capacités de production influence la tendance à la concentration* : la politique d'investissement agit indirectement sur le niveau des prix. Toute entreprise qui augmente ses capacités de production «creuse l'écart » avec les firmes les moins productives. Par contre, une politique d'investissement moins « agressive » peut permettre aux firmes les moins efficientes de rattraper leur retard.

Pour résumer, les évolutions vers la concentration de l'industrie sont d'autant plus fortes que le progrès technique est rapide, la probabilité d'innover est faible, l'imitation difficile et les politiques d'investissement agressives.

1.4.3.2. La sélection des comportements d'innovation

Dans les simulations l'hypothèse est faite que la moitié des firmes réalisent des dépenses de R&D dans le but d'imiter et d'innover, l'autre moitié n'engageant que des dépenses d'innovation. Quand les firmes les plus rentables ont des comportements d'investissement agressifs, quelles que soient les valeurs des autres données, les imitateurs auront toujours des marges plus élevées que les innovateurs, puisqu'il est plus coûteux de conduire des activités de R&D pour innover que d'imiter. Lorsque la politique d'investissement n'est pas agressive les innovateurs sont favorisés par rapport aux imitateurs quand la croissance de la productivité maximale est rapide et que l'imitation est difficile.

Quand le progrès technique est exogène (« fondé sur la science ») une concurrence intense des imitateurs, par une politique d'investissement agressive, ne produit pas d'impact négatif sur la productivité moyenne du secteur. En effet, même si l'innovation réussie est limitée, une forte imitation permet de diffuser largement les gains de productivité dans le secteur. Lorsque le progrès technique est endogène en dépendant uniquement des investissements des firmes dans la R&D innovante, une concurrence vive des imitateurs a un effet négatif sur la productivité moyenne du secteur.

1.4.4. Commentaires

Ce modèle évolutionniste proposé par NELSON et WINTER [1982] se distingue sur deux principaux points des modèles néoclassiques de compétition technologique que nous avons présentés dans le *Chapitre 2* : on peut rappeler que les stratégies des firmes ne sont pas issues d'un calcul de maximisation et que l'industrie n'est pas supposée être en équilibre, la compétition technologique étant un processus et non un état. Selon les auteurs (*ibid.*, p. 287) *« The model defines a stochastic dynamic system in which, over time, productivity levels tend to rise and unit production costs tend to fall as better technologies are found. »*

Le processus d'innovation est endogène en ce sens que la recherche d'une meilleure technologie n'est pas soumise *a priori* à la pression du marché. Ce sont

l'orientation des recherches, matérialisées par une trajectoire technologique[240], et la situation présente « héritée » du passé qui rendent compte du comportement des firmes, les contraintes (exogènes) du passé ne sont prises en compte qu'*ex post*. Dans un tel système, chaque firme peut posséder une trajectoire technologique spécifique et donc rien n'empêche la coexistence de plusieurs technologies.

A partir d'une remise en cause des hypothèses de base de la théorie néoclassique, qui limitent selon eux l'analyse de plusieurs problèmes économiques, les auteurs évolutionnistes contemporains tentent de construire un schéma analytique original fondé avant tout sur une vision dynamique de l'économie. Pour cela, ils puisent une partie de leurs inspirations à la fois dans certains thèmes de la théorie schumpétérienne et dans les modèles « biologiques » classiques axés sur la théorie de la firme et le principe de la sélection naturelle. Ces références se retrouvent dans l'ouvrage fondateur de NELSON et WINTER [1982]. Nous avons ensuite abordé les principes de base de l'analyse évolutionniste moderne. Celle-ci, s'affirmant comme principalement micro-économique, postule que les agents sont hétérogènes et dotés d'une rationalité limitée. Ces hypothèses permettent de soutenir que les processus productifs des agents et des firmes repose sur des routines, c'est-à-dire des compétences qui se sont révélées satisfaisantes dans des situations similaires passées. Les routines traduisent donc les capacités cognitives des agents mais aussi la mise en œuvre de celles-ci. L'évolution des routines *via* l'apprentissage, permet de répondre aux nouvelles caractéristiques de l'environnement de sélection par des comportements d'imitation ou d'innovation (*« search »*). Toute la difficulté de l'analyse évolutionniste de la concurrence consiste alors à articuler et à trouver une pondération entre la capacité d'apprentissage des agents et le rôle contraignant de l'environnement de sélection. Les développements théoriques récents semblent trancher en accordant une place prépondérante à l'apprentissage.

Enfin, nous avons conclu cette section par la présentation du modèle évolutionniste de compétition technologique de NELSON et WINTER [1982, p. 281-287]. En concevant la compétition technologique comme un processus en déséquilibre, les auteurs étudient l'évolution endogène de la structure de marché à partir des comportements d'imitation et d'innovation technologique des firmes. Par simulation, leurs résultats montrent que les tendances vers une concentration de l'industrie sont plus

[240] Cf. Section 2.

marquées lorsque le progrès technique est rapide, la probabilité d'innover faible, l'imitation difficile et les politiques d'investissement agressives.

Section 2. La conception évolutionniste de l'innovation

Cette section a pour objet de préciser les caractéristiques du modèle conceptuel de l'innovation construit et employé par l'approche évolutionniste. Nous examinerons celui-ci dans le but de proposer une reformulation des incitations des firmes à innover en faveur d'une technologie environnementale et des principes d'intervention de la politique technologique.

Dans un premier point, nous verrons que les évolutionnistes abandonnent l'idée de la linéarité du schéma d'innovation pour lui préférer un modèle interactif, constitué de plusieurs processus, et dans lequel sont mises en avant les activités de conception et les apprentissages. L'innovation sera alors présentée comme une activité de « résolution de problèmes » nécessitant la mobilisation par les firmes de connaissances tacites et codifiées. Ces connaissances, et les différents types d'apprentissages dont elles sont issues, sont propres à chaque firme ce qui confère un caractère local et cumulatif au processus d'innovation. Cette dimension de l'innovation nous amènera vers la définition d'une nouvelle approche des externalités de connaissances reconnaissant aux firmes une capacité d'absorption et une capacité d'émission des connaissances. Enfin, aux niveaux méso et macro-économiques nous montrerons comment les évolutionnistes analysent les régularités technico-économiques à travers les notions de paradigmes et de trajectoires technologiques, de régimes technologiques et de cycle de vie industriel.

2.1. Quel changement de modèle d'innovation ?

La conceptualisation de l'innovation qui sous-tend l'analyse économique standard, que nous avons présentée dans le chapitre précédent, repose sur un modèle linéaire. Dans cette optique, les auteurs considèrent que l'ensemble des possibilités d'avancées technologiques est disponible « en dehors » de la firme. Cette dernière a pour rôle d'allouer, de façon optimale, les ressources consacrées à la R&D.

S'appuyant sur des études empiriques, certains auteurs ont essayé de mettre à jour une réalité du processus d'innovation assez éloignée de l'analyse standard (ROSENBERG [1982]). Les transformations des organisations de R&D peuvent s'expliquer à partir d'un changement de paradigme productif à l'origine d'une transformation des processus d'innovation : on passe ainsi d'un modèle linéaire à un

modèle interactif de l'innovation. C'est ce que soulignent BOYER et DIDIER [1998, p. 15] en remarquant que la différence entre la recherche et l'innovation commence à être reconnue et admise dans l'analyse économique : *« L'activité de R&D expérimental (…) a longtemps été considérée comme le déterminant premier du développement économique. Au cours des années 1980, la vision des relations entre technologie et économie et la conception de la place de l'innovation technologique se sont élargies et modifiées. Les modèles interactifs ont remplacé le modèle précédent dit 'linéaire', afin de mettre l'accent sur le rôle de la conception industrielle et sur les relations entre phases aval (liées au marché) et phases amont (liées à la technologie) de l'innovation, ainsi que sur les nombreuses interactions entre la science, la technologie et les activités industrielles et commerciales du processus d'innovation. »* Pour ces auteurs, le changement de modèle d'innovation serait attribué à une transformation du « paradigme productif » qui s'est manifesté à la fin des années 1960 aux Etats-Unis (après les deux chocs pétroliers en Europe et au Japon) par un certain épuisement des sources de la productivité de la production de masse industrielle. Dans ce paradigme, un petit nombre de pays, parmi lesquels les Etats-Unis, *« comptait sur les avancées des connaissances fondamentales et de la recherche appliquée pour découvrir de nouveaux procédés et processus »* (*ibid.* p. 24). Dans les années 1970, la mise en place d'un nouveau paradigme productif peut être observée dans les industries motrices de l'après-guerre, dans une diversification de la demande qui fait passer d'un marché de vendeurs à un marché d'acheteurs, et d'une concurrence qui portait sur les coûts à une concurrence sur la qualité et la nouveauté des produits. Dans ce nouveau paradigme productif le succès de l'innovation devient en grande partie déterminé par la qualité des relations avec le marché (PERRIN [2001]).

2.2. Le modèle interactif de l'innovation de KLINE et ROSENBERG [1986] : la conception au centre du processus d'innovation

L'analyse évolutionniste reconnaît le caractère non linéaire du processus d'innovation (NELSON et WINTER [1982], LUNDVALL [1988]). D'un point de vue strictement analytique, les évolutionnistes maintiennent la décomposition entre la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement, mais pour considérer particulièrement les *feedbacks* entre ces trois phases.

2.2.1. La reconnaissance des activités de conception

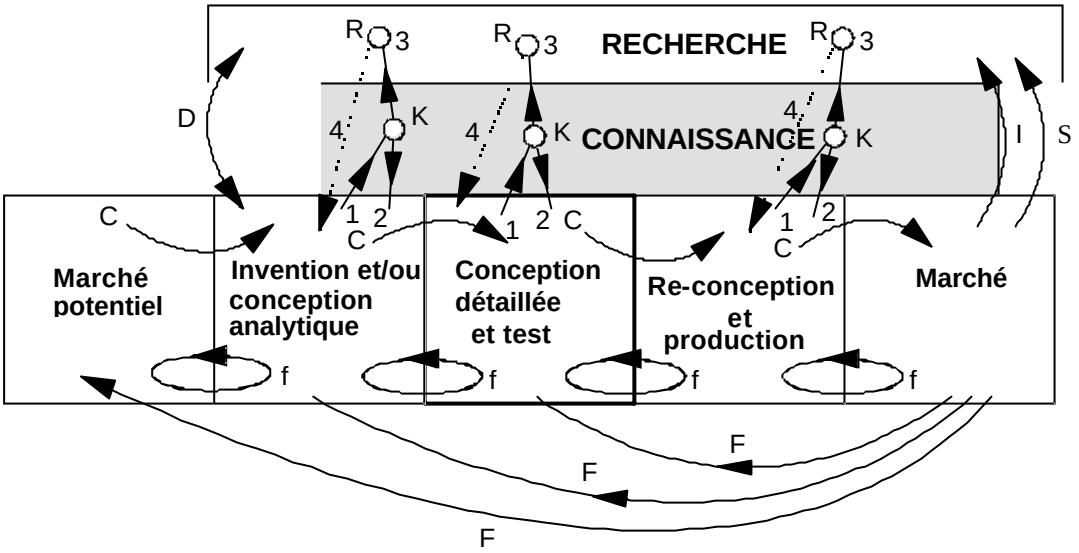
A la suite notamment des travaux de ROSENBERG, économiste et historien des techniques, sur les modèles d'innovation et sur la firme japonaise (firme J) en tant qu'organisation innovante, la recherche fondamentale comme principale force d'impulsion de l'innovation a commencé à être remise en question au profit des activités de conception (ROSENBERG [1982], KLINE et ROSENBERG [1986], AOKI et ROSENBERG [1987], PERRIN [1991]). PERRIN [2001, p. 19] définit la conception de produit (*product design*) comme *« (…) l'ensemble des activités et des processus qui permettent de passer de l'idée d'un nouveau produit (ou de l'amélioration d'un produit existant) à la fourniture de l'ensemble des informations (plans, descriptifs, logiciels…) qui permettent de lancer la production de ce produit et d'en assurer l'usage et la maintenabilité. »*

D'une manière plus précise KLINE et ROSENBERG [1986], en s'appuyant sur plusieurs exemples historiques, comme celui de l'industrie aéronautique, avancent que la phase d'initiation dans la majorité des cas d'innovation n'est pas la recherche mais la conception. Pour eux les activités de conception sont à l'origine de l'innovation, et même plus, puisqu'elles jouent un rôle central dans le succès ou l'échec du processus d'innovation : *« (…) the central process of innovation is not science but design. A design in some form is essential to initiating technical innovations, and redesigns are essential to ultimate success (…). »* (*ibib*. p.286) A partir de cette nouvelle compréhension du processus d'innovation, KLINE et ROSENBERG proposent leur modèle d'innovation de « la chaîne interconnectée » (*« the chain-linked model »*).

2.2.2. Le modèle de la chaîne interconnectée de KLINE et ROSENBERG [1986]

Figure 1. Le modèle de la chaîne interconnectée

Source : à partir de KLINE et ROSENBERG [1986]



C : chaîne centrale de l'innovation

f : boucles courtes de rétroaction (*feedbacks*) entre des activités connexes de la chaîne centrale

F : boucles longues de rétroaction entre des activités non connexes de la chaîne centrale

D : relations directes entre la recherche et l'invention

S : soutien de la recherche scientifique

K-R : lien connaissance-recherche ; si le problème est résolu au niveau K, ce lien n'est pas activé

Le modèle de la chaîne interconnectée présente la caractéristique particulière qu'il n'y a pas un seul, mais plusieurs processus d'innovation.

Le premier et principal processus d'innovation est la chaîne centrale d'innovation (*« the central-chain-of-innovation »*) indiquée par la lettre **C**. Elle est constituée par une série d'activités de conception : invention (nouveau principe technique qui remplit une fonction) ou conception analytique (*« analytic design »*, nouvelles combinaisons de composants ou de sous-ensembles pour un artefact donné), conception détaillée, reconception, production et distribution.

Le deuxième processus d'innovation concerne les *feedbacks* courts (relations **f**), reliant chaque phase (aval) de la chaîne centrale avec celle qui la précède immédiatement, et les *feedbacks* longs reliant les besoins perçus sur le marché et les utilisateurs du produit aux différentes phases en amont (relations **F**).

Le troisième type de processus porte sur les relations entre la science et l'innovation, c'est-à-dire entre les sphères de la connaissance et de l'innovation. Au sein des activités de conception de la chaîne centrale, il y a une relation quasi-permanente avec la sphère de la connaissance (relations 1 et 2). Si les connaissances disponibles à un moment donné ne permettent pas de répondre aux problèmes des concepteurs, une question peut être posée à la sphère de la recherche (relation 3). Les phases de la chaîne centrale de la conception tissent ainsi des relations permanentes avec la sphère de la connaissance, les relations directes avec la recherche ou les innovations radicales sont assez rares (relations **D**).

Le quatrième et dernier processus d'innovation (relations **I** et **S**) correspond aux innovations technologiques nécessaires aux avancées de la science.

KLINE et ROSENBERG [1986, p. 291] concluent que *« the use of the* accumulated knowledge *called modern science is essential to modern innovation ; it is a necessary an often crucial part of technical innovation, but it is not usually the initiating step. It is rather employed at all points along the central-chain-of-innovation, as needed. It is always when this knowledge fails, from all known sources, that we resort to the much more costly and time-consuming process of* mission-oriented research *to solve the problems of a specific development task*[241]*. »*

Une telle imbrication des phases du processus a comme avantages un développement plus rapide, une plus grande flexibilité et un partage systématique de l'information. Dans ce contexte, la distinction entre les innovations mineures et les innovations radicales peut être vue comme perdant en partie de son sens. L'analyse se déplace plus spécifiquement sur les relations entre les différents acteurs d'un processus dont les étapes sont imbriquées, c'est-à-dire que l'analyse de la constitution et du fonctionnement en *réseau* devient essentielle pour comprendre le phénomène de l'innovation. Le processus interactif de l'innovation montre que l'apprentissage joue un rôle primordial afin de mettre en œuvre et valoriser les échanges d'informations entre

[241] Souligné par nous.

les différentes unités[242] impliquées dans le processus. Les modifications et les améliorations successives de performances sur l'un des composants ou des sous-ensembles d'une innovation peuvent induire des effets sur d'autres composants, entraînant ainsi une recomposition d'une partie de l'innovation.

2.2.3. Commentaires et développe ments : de la R&D à la R,D&E

Les pratiques de R&D des firmes japonaises étudiées dans les années 1980 et 1990 ont donné de la pertinence au modèle interactif de KLINE et ROSENBERG (GUILHON [1995]). Par exemple, dans leur étude de la firme japonaise (la firme « J »)[243], AOKI et ROSENBERG [1987] ont souligné l'importance des départements d'ingénierie dans la définition de l'agenda des recherches des laboratoires centraux de recherche des entreprises. Historiquement les pratiques de R&D des firmes japonaises se sont structurées autour des activités de conception et d'ingénierie[244].

La compréhension de l'innovation comme un processus interactif entre différents départements internes et externes aux firmes a conduit certains auteurs, comme MILLER [1994], a passer du concept de R&D à celui de R,D&E, c'est-à-dire de « recherche, développement et *engineering* ». Le concept de R,D&E permet de prendre en compte les activités de conception des produits, mais également de conception des activités de production, ainsi que les activités de tests et d'essais[245]. Toutefois, comme

[242] Dans ce modèle les marchés et les organisations ne sont pas des institutions distinctes qui réaliseraient alternativement les mêmes tâches d'allocation suivant la nature des marchandises qui sont échangées ou le type d'information que chaque agent économique détient. Au contraire, ils sont considérés ensemble comme des éléments complémentaires d'un processus unique.

[243] On peut souligner que le modèle linéaire de l'innovation était compatible avec une structure hiérarchique et divisionnelle de la firme, la firme A (la firme américaine), dans laquelle l'information est centralisée. Le modèle interactif est, par contre, en adéquation avec la firme japonaise (la firme J), coordonnée horizontalement, afin d'assurer une meilleure circulation de l'information entre les postes de travail par des *feedbacks* courts, et dans laquelle seules les décision impliquant un haut degré d'incertitude, telles que la R&D, restent placées sous un contrôle hiérarchique (AOKI [1986]).

[244] En effet, de longue date dans l'histoire économique du Japon, la technique a joué un rôle plus important que la science. Le Japon a toujours structuré sa politique technologique autour des activités de *reverse engineering* afin de rattraper, assimiler et adapter les technologies développées par les pays les plus avancés.

[245] MILLER [1994] montre que l'industrie mondiale de l'automobile ne consacre que 4,5% de ses personnels de R,D&E pour des activités de recherche fondamentale. Près de 90% des personnels de la

le souligne PERRIN [2001] le concept de R,D&E ne doit pas être interprété comme une extension du concept classique de R&D, puisque le terme développement n'a pas la même signification dans les deux acronymes. Dans la R&D, le « développement » porte sur les activités de développement expérimental qui suivent les phases de recherche fondamentale et de recherche appliquée. Dans la R,D&E le « développement » concerne les activités de conception d'un nouveau produit ou de re-conception d'un produit déjà existant en fonction des contraintes de coût, de qualité et de délai. Les activités d'essai deviennent ainsi une source importante de nouvelles connaissances techniques pour les services en charge des activités de conception.

FORAY [2003] met cependant en garde les analystes qui cherchent à détecter les nouvelles formes de l'innovation, contre la tendance consistant souvent à privilégier une forme particulière et unique de schéma de l'innovation. Pour lui les nouveaux modèles de l'innovation sont irréductibles à un seul *« archétype »*. Il propose d'élargir le champs d'analyse en combinant trois *« idéaux types »* pour appréhender les *« nouveaux modèles de l'innovation »* : (i) un modèle d'innovation fondé sur la science, (ii) un modèle dans lequel les *« usagers-leaders »*, dont les besoins sont en avance sur ceux du marché, interagissent avec le producteur pour améliorer la conception du produit innovant, et (iii) un modèle d'innovation qui s'exprime dans le cadre d'accords inter-firmes portant, non pas sur de la R&D, mais sur des normes et des standards technologiques communs.

2.3. Les faits stylisés de l'innovation technologique dans l'optique évolutionniste

A partir de faits stylisés les économistes évolutionnistes ont mis à jour un certain nombre de propriétés du processus d'innovation qui se révèlent éloignées de celles proposées par l'analyse néoclassique (DOSI [1988a, 1988b], NELSON [1995]). L'innovation réussie par une firme va reposer sur la mise en cohérence de nouvelles possibilités techniques et d'une demande solvable. Dans l'interprétation évolutionniste la technologie n'est pas pleinement réalisée au moment de son apparition ; elle ne peut pas être considérée comme une donnée puisqu'elle est le résultat d'un processus graduel

---

R,D&E de l'industrie automobile mondiale sont affectés à des activités de conception directement liées au développement du produit.

de développement dans le temps. En outre, ce processus ne se déroule pas *in vitro* mais dans un contexte spécifique qui contribue lui-même à déterminer les caractères et la durée de développement de la technologie et qui s'en trouve lui-même modifié (AMENDOLA et GAFFARD [1988]).

2.3.1. L'innovation : une activité de résolution de problèmes

DOSI [1988b, p. 222] définit l'innovation de façon large comme concernant « *(…) the search for, and the discovery, experimentation, development, imitation, and adoption of new products, new production processes and new organisational set-ups* ». Dans cette définition, qui dépasse le débat *technology push* versus *demand pull*[246], DOSI affirme que l'innovation technologique implique nécessairement la solution à des problèmes, c'est-à-dire une «découverte », une «création ». Ces problèmes sont mal « structurés » et l'information disponible ne suffit pas en elle-même à proposer des solutions. Cette vision de l'innovation s'écarte donc de l'analyse standard de la technologie comme une information, où la firme puise dans un *pool* de connaissances déjà constituées mises à la disposition de tous. Au contraire, ici l'activité de « résolution de problème[247] » demande la mobilisation par la firme de plusieurs types de connaissances regroupées dans sa « *base de connaissances technologiques* » (NELSON et WINTER [1982]). Cette dernière est composée d'*inputs* informationnels, de l'ensemble des connaissances acquises par la firme, mais surtout de l'ensemble de ses savoir-faire, de ses capacités cognitives[248] qui vont lui permettre d'exploiter des opportunités

[246] Cf. *Chapitre 2*.

[247] L'activité de résolution de problème pose ainsi les fondements d'une approche théorique de la firme en terme de compétences, routines et apprentissages.

[248] Ces types de connaissances mises en œuvre dans une activité innovatrice se rapprochent des quatre catégories de connaissances précisées par LUNDVALL et JOHNSON [1994] : le « *know-what* » fait référence à la connaissance des faits, c'est-à-dire de ce qui est habituellement appelé l'information qui peut être codifiée et communiquée d'une manière relativement directe ; le « *know-why* » se réfère à la connaissance des lois et des principes scientifiques qui sont souvent produits au sein d'organisations spécialisées (universités, laboratoires de recherche publique). Selon les niveaux de complexité, cette forme de savoir peut également être codifiée et communiquée assez facilement ; le « *know-how* » est lié aux compétences, c'est-à-dire aux capacités que possède une firme ou une équipe de recherche. Il désigne la mise en œuvre de connaissances, de savoirs tacites, indissociables de leur contexte de production, permettant de résoudre des problèmes ; la complexité croissante de la base de connaissance qu'une firme doit maîtriser peut

technologiques internes ou externes. Dans le cas d'une organisation, comme une firme, la base de connaissances technologiques rassemble les connaissances qui vont au-delà du capital humain et de la somme des connaissances des individus. Il est nécessaire alors de tenir compte des connaissances intégrées dans les procédures de l'organisation, les équipements utilisés, les règles particulières de circulation de l'information interne…

Au sein de la base de connaissances technologiques, les évolutionnistes attachent une importance cruciale à la différenciation entre les connaissances tacites et les connaissances codifiées (FORAY [2000], COWAN *et al.* [2000]). Les connaissances tacites, mal définies par nature, concernent les connaissances qui sont incorporées à leur « support humain » comme le savoir faire, les croyances ou l'utilisation du langage. Elles sont donc spécifiques aux agents qui les mettent en œuvre. Leur accès, transport, stockage, échange et transaction sont difficiles[249], même si elles peuvent être partagées en partie par des agents qui possèdent un apprentissage et une expérience communs. Au contraire, les connaissances codifiées sont des connaissances formalisées, articulées, de telle sorte qu'elles peuvent être explicitées en un langage et donc être stockées indépendamment de leur support humain. Par exemple, les connaissances scientifiques, en partie universelles et publiques, sont codifiées et mises en forme de façon à permettre leur transmission et à économiser leurs coûts de diffusion.

Les deux types de connaissances sont complémentaires pour mener une activité de résolution de problème, même dans les secteurs « fondés sur la science[250] ». Les connaissances sous forme de flux informationnels sont abondantes et disponibles, mais l'élément de connaissance rare et stratégique est celui qui consiste à sélectionner et à mettre en œuvre ces informations dans une activité de résolution de problème spécifique. L'approche évolutionniste analyse l'imbrication des connaissances tacites et codifiées dans le processus de recherche, et, selon elle, on ne peut pas comprendre

---

conduire une firme à partager et à combiner ses connaissances avec d'autres firmes en participant à des réseaux industriels ; le *« know who »* a trait à l'information pour savoir « qui fait quoi et comment ». Il représente la capacité qu'a une firme pour établir des relations avec d'autres firmes afin de bénéficier de leur expertise.

[249] Par exemple, le fait qu'une personne n'est pas capable d'expliquer certaines choses qu'elle est capable de faire traduit la présence de connaissances tacites.

[250] Pour reprendre la dénomination de la typologie des trajectoires technologiques de PAVITT [1984], p. 72.

l'activité d'innovation en dehors de l'activité de résolution de problème, c'est-à-dire en dehors des pratiques utilisées dans l'industrie. Toutefois, comme l'affirment COWAN et FORAY [1997, p. 600] *« (…) codification is never complete »*, c'est-à-dire qu'il n'est pas toujours possible d'articuler parfaitement des connaissances tacites pour les diffuser.

2.3.2. Le caractère local et cumulatif du processus d'innovation

L'analyse évolutionniste reconnaît les caractères spécifique, cumulatif et tacite des connaissances technologiques, c'est-à-dire que tant les opportunités technologiques déjà réalisées que celles qui sont virtuellement réalisables sont, pour une large part, spécifiques et locales à chaque firme. ATKINSON et STIGLITZ [1969], repris par STIGLITZ [1987], avaient initié un renouvellement la vision du changement technique en indiquant que celui-ci ne correspond pas à un déplacement complet de la fonction de production mais plutôt à un déplacement d'un point de cette fonction[251]. A un moment donné, une firme ne connaît et n'explore qu'une partie de l'ensemble théorique des choix techniques tel qu'il peut être représenté par la fonction de production. Ainsi, le choix d'une technologie ne dépend plus seulement des prix courants des facteurs de production, mais également de leurs prix futurs et de la valeur des connaissances « potentielles » associées à chacune des technologies. Même quand le changement technique a pour origine un changement des prix relatifs, les nouvelles technologies sont ou deviennent supérieures aux anciennes indépendamment des prix relatifs, c'est-à-dire qu'elles auraient pu être adoptées dans l'ancien système de prix (DOSI [1988a])[252]. La découverte des autres possibilités techniques qui existent à ce moment là suppose de

[251] L'apprentissage est associé à un processus spécifique (un point de la fonction de production) de sorte que la firme qui alloue des ressources doit prévoir que tout changement futur de la technologie en *t+1* lui fera perdre des gains associés à l'apprentissage localisé sur la technologie choisie en *t*. La firme ne peut pas changer transitoirement de technique en choisissant de suivre les évolutions successives de la structure des prix relatifs. En effet, du fait des apprentissages localisés, la technologie « transitoire » risque d'être conservée après le rétablissement en *t+1* de la structure caractéristique en *t-1*. Le concept de changement technique localisé accorde donc de l'importance à l'*Histoire*.

[252] DOSI [1988a, p. 1144] illustre cette analyse en s'appuyant sur l'exemple de la micro-électronique : *« Taking all these characteristics together, it is clear that electronic based production techniques are generally unequivocally superior to electromechanical ones irrespective of relatives prices. That is, the new wage/profit frontiers associated with the new techniques do not generally intersect the 'old' ones for any positive value. »*

mener une activité de recherche coûteuse en ressources et qui demande du temps, d'autant plus que les opportunités techniques qui sont connues à un moment donné sont elles-mêmes le résultat d'activités de recherche précédentes qui ont déjà absorbé des ressources. « L'Histoire » des recherches précédemment engagées et « l'acquis technologique[253] » propres à chaque firme ont donc une grande importance en ce qu'ils créent une «contrainte de continuité » et une irréversibilité pour les recherches futures (JACQUIER-ROUX [1994]) [254].

La reconnaissance du caractère local du changement technique trouve ses fondements dans les phénomènes d'apprentissage par la pratique (*« learning by doing»*, ARROW [1962b]), d'apprentissage par l'usage (*« learning by using»*, ROSENBERG [1982]), d'apprentissage par l'apprentissage, dans lequel les connaissances issues d'une pratique et structurant le processus d'apprentissage peuvent également servir à mieux réaliser un autre processus d'apprentissage (*« learning by learning »*, STIGLITZ [1987], LE BAS et ZUSCOVITCH [1993])[255], d'apprentissage par interaction, qui se manifeste par exemple entre les producteurs et les utilisateurs d'un bien d'équipement (*« learning by interacting»*, LUNDVALL [1988]). L'assimilation des connaissances techniques est une activité qui est alors elle-même soumise à des rendements croissants (des économies d'échelle dynamiques) et la spécialisation dans l'acquisition des connaissances contribue à renforcer le caractère local des progrès techniques.

---

[253] C'est-à-dire la base de connaissances technologiques propre à chaque firme.

[254] JACQUIER-ROUX [1994] rappelle que la valorisation des apprentissages d'une firme est soumise à une « contrainte de continuité ». En effet, cette valorisation est par nature différée dans le temps, et il faut pour la réaliser que l'organisation soit reconduite au-delà de la durée du programme de R&D pour lequel elle s'est mobilisée. De là, il s'agit non seulement de garantir l'utilisation à terme de ces apprentissages, mais aussi de les orienter d'un point de vue qualitatif afin d'assurer la pérennité de la structure de R&D comme lieu d'innovation. L'auteur distingue deux directions d'apprentissage que la firme doit concilier. Ainsi les apprentissages doivent constituer d'une part des « ressources de spécialisation », en améliorant l'excellence d'une firme dans un domaine précis, et d'autre part des «ressources de flexibilité », lui autorisant une réorientation de ses recherches ou de réagir à un changement dans son environnement. L'accumulation des ressources de spécialisation est du registre du *« learning by doing »* et permet des économies d'échelle (dynamiques). L'accumulation de ressources de flexibilité permet la réalisation d'économies de variété (dynamiques) et diminue l'irréversibilité des engagements de la firme.

[255] Ce dernier type d'apprentissage est un facteur important de la « capacité d'absorption » de la firme (COHEN et LEVINTHAL [1989]), voir *supra* p.58.

Le caractère plus ou moins local de l'acquisition des connaissances dépend également du type de l'activité de recherche. Par exemple, la recherche appliquée, portant sur des procédés particuliers, possède un fort caractère local, contrairement à la recherche fondamentale dont les retombées touchent un domaine technologique plus étendu. Cela implique des phénomènes d'accumulation, l'expérience acquise rend de plus en plus facile certaines tâches, et les compétences acquises sont exclusives aux firmes accomplissant les efforts nécessaires. A la différence des connaissances scientifiques, ce type de progrès techniques, même s'ils ne sont pas protégés légalement, ne peuvent pas se diffuser sans coût puisqu'ils demandent nécessairement de l'apprentissage et de la pratique. Cela nous amène à proposer un renouvellement de l'approche des externalités de connaissance.

2.4. Une nouvelle approche des externalités de connaissances et ses implications

La conception évolutionniste de l'innovation va donner lieu à un renouvellement de l'approche traditionnelle des externalités de connaissances. Nous allons voir d'une part, qu'elle reconnaît aux firmes une capacité d'absorption des nouvelles connaissances techniques, et d'autre part qu'elle leur attribue une capacité d'émission de leurs connaissances.

2.4.1. Le rôle dual de la R&D interne : la capacité d'innovation et la capacité d'absorption

Nous montrerons que la nouvelle approche des externalités implique une complémentarité entre les fonctions de la R&D interne et de la R&D externe. Nous présenterons et commenterons ensuite l'analyse de COHEN et LEVINTHAL [1989] sur la capacité d'absorption de la firme.

2.4.1.1. La complémentarité entre la R&D interne et la R&D externe

Dans l'approche standard, les innovations technologiques apparaissent comme une production de connaissances[256], elles-mêmes assimilées à de l'information pure non appropriable (ARROW [1962a]). FORAY [1991] note que cette approche souffre d'une analyse insuffisante du contenu « réel » des activités de R&D. Il va même plus loin dans sa critique en précisant que *« l'assimilation de la production de connaissances technologiques à un coût fixe est* dangereuse, *dans la mesure où elle repose sur une vision partielle et approximative de ce qui est effectivement entrepris dans une unité de R&D : les différentes prestations de service de recherche (…), les actions de mise en conformité des innovations (…)* (*ibid.*, p.781) *»*. Dans l'analyse standard, l'objectif central consiste à minimiser les coûts de duplication et les formes d'organisation des activités de R&D et des capacités d'innovation et d'apprentissage des firmes n'ont pas vraiment d'intérêt.

La considération de la capacité limitée des firmes à exploiter les résultats des recherches réalisées par les autres entreprises ouvre une voie vers la remise en cause du modèle classique d'ARROW [1962]. Si l'on accorde une importance particulière aux connaissances tacites et à l'apprentissage, comme le font les économistes évolutionnistes, l'arbitrage de la firme entre *« faire soi-même »* et *« compter sur l'effort des autres »* ne peut être réduit à un simple problème de comparaison de coûts (coûts d'investissement en R&D *versus* coûts de transmission), puisque pour bénéficier des retombées de la R&D *« il faut faire un peu soi-même »* (FORAY [1991, p. 784]). Les activités de R&D sont aussi un processus d'apprentissage (ROSENBERG [1982]). La firme doit alors organiser ses relations entre la R&D et l'apprentissage internes et la R&D et l'apprentissage externes[257]. La R&D externe est comprise comme la production de recherche en dehors d'une firme *via* la R&D sous contrat, la R&D coopérative, les

---

[256] Les investissements en R&D sont les principaux *inputs* de cette production.

[257] LE BAS et ZUSCOVITCH [1993] soulignent qu'à un niveau d'abstraction élevé tout apprentissage technologique peut être décrit comme une séquence « recherche – accumulation – appréciation – résultat ». C'est-à-dire que la firme doit rechercher de l'information, l'incorporer dans ses actifs technologiques ou dans ses compétences économiques et l'évaluer. Le résultat est qu'*a priori* sous l'effet de l'apprentissage la firme progresse et accroît son efficience. La difficulté est de pouvoir évaluer la valeur ajoutée de l'apprentissage, même si elle n'est pas accaparée en totalité par la firme, afin de mesurer la capacité de cette dernière à apprendre.

centres de R&D publics et les effets de report de R&D (FORAY et MOWERY [1990]). La R&D interne, en plus de la production de nouvelles connaissances technologiques, a pour fonction d'assurer à la firme la possibilité d'exploiter les potentiels technologiques présents dans son environnement. Cette fonction consiste, d'une part, à soulever de nouveaux problèmes productifs et à mobiliser sur eux des capacités de R&D externe et, d'autre part, à rendre applicable les connaissances produites à l'extérieur afin qu'elles soient exploitables par la firme. En effet, la diffusion de nouvelles connaissances ne se réduit pas à une simple duplication de l'information, mais consiste à transformer un principe général codifiable en une technologie spécifique et adaptée à un lieu et à des modes de production particuliers. Dans une perspective temporelle, une firme ne peut donc pas avoir recours à un apprentissage purement interne et il y a toujours acquisition de ressources ou de connaissances techniques externes. Symétriquement, il n'y a pas d'apprentissage externe sans apprentissage interne (LE BAS et ZUSCOVITCH [1993]).

2.4.1.2. Le modèle de COHEN et LEVINTHAL [1989] : la capacité d'absorption

Ainsi, COHEN et LEVINTHAL [1989, 1990] ont mis en évidence que les investissements en R&D assurent un double rôle : (i) celui de la promotion et du développement des compétences de la firme pour introduire des innovations et (ii) celui du développement d'une « capacité d'absorption » (ou d'apprentissage) des firmes afin d'exploiter au mieux les recherches réalisées par d'autres organismes. La capacité d'absorption améliore ainsi à son tour la capacité d'innovation. Selon les auteurs, la capacité d'absorption d'une firme repose sur les capacités individuelles des membres qui la composent, sur la capacité à recueillir les informations de son environnement et à les transmettre entre les différents départements de la firme. Les fonctions « d'interface » entre la firme et son environnement et entre ses différents départements, sont donc cruciales pour optimiser l'exploitation des informations[258].

[258] COHEN et LEVINTHAL [1990, p. 131] expliquent : « *A firm's absorptive capacity is not, however, simply the sum of the absorptive capacities of its employees and it is therefore useful to consider what aspects of absorptive capacity are distinctly organizational. Absorptive capacity refers not only to the acquisition or assimilation of information by an organization but also to the organization's ability to exploit it. Therefore, an organization's absorptive capacity does not simply depend on the organization's direct interface with the external environment. It also depends on transfers of knowledge across and within sub-units that may be quite removed from the original point of entry. Thus, to understand the*

Selon la formalisation utilisée par les auteurs (*ibid.*, 1989), la base de connaissances technologiques de la firme *i* est définie par Z_i ayant pour expression :

$$Z_i = M_i + g_i \left(q \sum_{j \neq i} M_j + T \right) \qquad (1)$$

dans laquelle M_i désigne l'investissement de la firme en R&D ; g_i est la fraction des connaissances externes capturées, assimilées et exploitées par la firme ; elle représente sa capacité d'absorption ; q représente le degré de diffusion (le niveau des *spillovers*) intra-industrie ; M_j désigne les investissements en R&D des autres firmes pour $j \neq i$, et T le niveau de connaissance extra-industrielle.

Les recherches menées par une firme j peuvent profiter à une firme i selon le degré d'appropriabilité des connaissances indiqué par $q\left(0 \leq q \leq 1\right)$. Si q prend comme valeur 1, les efforts de R&D sont totalement accessibles pour la firme réceptrice. Dans le cas opposé $q = 0$, les connaissances sont exclusivement appropriées par la firme émettrice.

La base de connaissances externes disponible pour la firme i est représentée par l'expression $\left(q \sum_{j \neq i} M_j + T \right)$. Elle est capable d'en capter une fraction avec g_i . Lorsque $g_i = 1$, la firme absorbe la totalité de la connaissance externe disponible. Cette capacité d'absorption g_i est fonction non seulement des efforts de recherche propres à la firme M_i mais aussi d'un vecteur b synthétisant les caractéristiques des connaissances scientifiques et technologiques externes jouant sur la facilité d'absorption :

$$g_i \equiv g\left(M_i, b\right) \qquad (2)$$

Lorsque b augmente, l'aptitude de la firme à assimiler les connaissances externes dépend davantage de sa propre R&D. Deux effets peuvent être déduits de cette relation de dépendance : (i) plus b est grand, plus l'impact marginal de la R&D interne sur la capacité d'absorption de la firme est important ; (ii) pour un niveau donné de M_i, la capacité d'absorption est une fonction décroissante de b . Autrement dit, lorsque les

---

source's of a firm's absorptive capacity, we focus on the structure of communication between the external environment and the organization, and also on the character and distribution of expertise within the organization. »

connaissances externes deviennent plus difficiles à assimiler, la firme en capte moins pour un niveau de R&D donné.

L'équation (1) indique que l'appropriation des résultats des recherches des autres firmes dépend de l'évolution de q et de b. D'une part, seules les connaissances diffusées peuvent être assimilées, et, d'autre, part la firme ne peut pas assimiler « passivement » les connaissances externes disponibles qui peuvent être complexes. Elle doit investir dans sa propre R&D, et sa décision d'investissement dépend alors de q et de b.

2.4.1.3. Commentaires

L'analyse de COHEN et LEVINTHAL [1989], centrée sur la capacité d'absorption, soulève des questions sur la capacité de recherche d'informations de la firme. En effet on peut être amené à penser que cette recherche peut se faire sans coût et sans stratégie particulière, alors que la firme est présentée comme « active » vis-à-vis de son environnement. Cette fonction de recherche de l'information peut apparaître comme décisive car si la capacité de recherche est défaillante, et même si une firme dispose d'une bonne capacité de traitement de l'information, l'efficacité des investissements en R&D sera faible.

Ensuite, on peut regretter que le besoin de la firme d'investir en R&D pour profiter des recherches réalisées par les autres firmes ne soit pas explicitement incorporé dans le modèle. En effet, dans l'équation (1) il n'est pas spécifié de manière endogène que la capacité d'absorption g_i dépend de ses propres investissements en R&D M_i et de la nature des recherches. Les difficultés liées à la capacité d'absorption ne dépendent que des recherches externes b. Dans ce sens KAMIEN et ZANG [2000] ont proposé une représentation des efforts effectifs de R&D en faisant de la capacité d'absorption une variable stratégique. Leur modèle permet ainsi de prendre en compte de manière endogène la relation entre la capacité d'absorption et les dépenses de R&D. La capacité d'absorption dépend non seulement des dépenses internes de R&D, mais aussi du degré de spécificité des recherches de la firme. Ainsi, l'effort effectif en R&D de la firme dépend directement de ses propres recherches, de sa capacité d'absorption (elle-même dépendant directement de ses recherches internes et de leur spécificité), des caractéristiques exogènes de la diffusion, ainsi que de la spécificité de la R&D des

autres firmes et de leurs dépenses dans ce domaine. KAMIEN et ZANG [2000] s'intéressent aux coopérations en R&D (*research joint venture*) et analysent dans quelle mesure la présence ou l'absence de coopération dans les dépenses de R&D oriente le choix des firmes concernant le niveau de spécificité de leur R&D. Ce choix dépend principalement de l'ampleur des effets de *spillovers* vis-à-vis des firmes concurrentes. Leur cadre d'analyse théorique ainsi que leur problématique sont certes éloignés de l'analyse évolutionniste de l'innovation, puisque leur démarche met essentiellement en avant les motivations stratégiques des firmes[259], et on peut trouver dommageable comme FORAY [1991, p. 788] que *« (…) le couvercle de la boîte noire soit déjà refermé, sans que les structures d'organisation de la R&D en aient été extraites »*.

Le modèle développé par COHEN et LEVINTHAL [1989] permet cependant à travers la capacité d'absorption de mettre en évidence la double nature du produit de la R&D. D'une part, ce produit est constitué d'informations utiles au développement d'innovations par les tiers, d'autre part il comprend un ensemble d'apprentissages qui dotent la firme elle-même de capacités pour des activités futures[260]. En élargissant l'analyse, on peut avancer que ces capacités sont pour la firme non seulement des capacités d'absorption, mais aussi des capacités de « création nouvelle ». Ainsi, en concevant les apprentissages induits par la R&D aussi bien comme des connaissances que comme des capacités d'amélioration des comportements de recherche grâce à l'expérience, les gains d'une activité de R&D se trouvent considérablement élargis et de ce fait il n'est plus certain que le rendement privé des recherches soit largement plus faible que leur rendement social[261]. Une première implication directe en terme d'incitation est que l'effet dissuasif de l'indivisibilité de la R&D est diminué, puisque même un échec en terme d'information est compensé par les apprentissages développés pendant le programme d'innovation.

Ainsi, cette conception de la R&D aboutit à une inversion de la thèse d'ARROW [1962a] selon laquelle les résultats de la R&D, biens publics immédiatement disponibles et applicables, ont des coûts de diffusion très faibles par rapport aux coûts de production, d'où un risque de sous-investissement en R&D compte tenu d'une

[259] Les auteurs se basent et prolongent l'analyse de d'ASPREMONT et JACQUEMIN [1988] (cf. Chapitre 2).

[260] Les *spillovers* technologiques jouent donc de manière interne à la firme.

[261] En effet, d'une part l'imitation peut être freinée par les firmes innovantes (le rendement privé est augmenté), et d'autre part elle est coûteuse pour l'imitateur lui-même (le rendement social est réduit).

appropriation imparfaite. Cette analyse confond en effet, les coûts de duplication des résultats de la R&D, qui entraînent effectivement des coûts très faibles, et les coûts d'apprentissage permettant l'applicabilité des nouvelles connaissances par rapport à un lieu et un utilisateur spécifiques, qui sont eux conséquents. La reconnaissance d'une capacité d'absorption permet alors de donner une autre explication : si les coûts de diffusion des innovations sont faibles c'est grâce à l'importance de l'effort préalable de R&D qui permet de développer une capacité d'apprentissage pour incorporer les résultats de R&D, c'est-à-dire des connaissances à la fois codifiées et tacites. La faiblesse des coûts de diffusion est donc fonction de l'effort de R&D engagé par les firmes.

2.4.2. La capacité d'émission des connaissances

La mise en évidence d'une capacité d'absorption des connaissances externes par les firmes remet en question la vision traditionnelle, passive, des externalités de recherche sur lesquelles les firmes n'ont aucune emprise. Mais, si compte tenu des dimensions tacite et hétérogène des connaissances, les firmes réceptrices doivent réaliser des investissements monétaires et organisationnels pour les absorber, de manière inverse les résultats de la recherche sont naturellement, au moins en partie et à court terme, appropriables par les firmes, puisque les connaissances ne s'échappent pas automatiquement et immédiatement de leur source créatrice.

Partant de ce constat, PENIN [2003] développe l'idée que le processus d'émission des connaissances est en partie contrôlable par les firmes, et que ces dernières disposent alors d'une capacité d'émission de leurs connaissances leur permettant de décider quand, comment et à qui les divulguer, si elles décident de les divulguer. Ainsi l'auteur cite COHENDET et MEYER-KRAHMER [2001, p.60] pour définir la capacité d'émission de connaissances comme *« (…) the ability to tune the disclosure-secrecy dimension »*. La principale question qui se pose alors concerne la nature des incitations que vont avoir les firmes à révéler volontairement leurs connaissances sachant qu'*a priori* cela est coûteux pour elles[262].

[262] La capacité d'émission des connaissances est un thème encore peu abordé dans la littérature économique. De nombreuses questions sur la capacité d'émission restent à aborder : quels types de firmes diffusent des connaissances, quels sont les moyens par lesquels elles les diffusent, à quels types de firmes elles les diffusent ?

2.4.2.1. Les vecteurs d'émission universelle des connaissances

PENIN [2003] s'intéresse spécifiquement à « l'émission universelle » de connaissances codifiées touchant un maximum d'individus. Il différencie ainsi la diffusion universelle de connaissances, non restreinte, de la diffusion restreinte à l'intérieur d'un « réseau » spécifique de production de connaissances, comme celui constitué par exemple par un accord de coopération en R&D (*research joint venture*), dont les bénéfices sont moins incertains[263].

Dans le cas de l'émission universelle, les connaissances sont considérées comme des biens publics accessibles à tous, bien que pas toujours gratuitement puisque nous avons vu que les firmes doivent bâtir une capacité d'absorption pour les comprendre et en profiter. Il existe plusieurs vecteurs d'émission universelle de connaissances[264] :

- *les publications scientifiques* : de nombreuses firmes autorisent leurs chercheurs à publier dans des revues scientifiques afin d'entretenir un effet de réputation ;
- *les brevets* : nous avons vu dans le *Chapitre 2* que, d'une part, le brevet conférait un droit de propriété et que, d'autre part, il permettait de diffuser largement les connaissances brevetées. Cependant, le brevet n'est pas considéré par les firmes comme le moyen de protection le plus efficace, bien que le nombre de demandes de brevet soit en constante augmentation (MAZZOLENI et NELSON [1998]). Les explications de ce paradoxe résident dans le fait que les firmes voient de plus en plus dans le brevet surtout un moyen de disséminer leurs travaux de recherche, ce qui leur permet par exemple de se placer en position favorable pour rechercher et établir des accords de coopérations en R&D ;

[263] Dans le cas de la diffusion à l'intérieur d'un réseau de firmes, la connaissance (tacite et/ou codifiée) est un bien collectif, un bien réseau, c'est-à-dire un bien dont la diffusion se limite aux membres d'un réseau de production de connaissances comme une *research joint venture*. Dans les accords de R&D il n'y a pas émission simple, mais plutôt un échange entre les partenaires basé sur la réciprocité. Les vecteurs de diffusion sont variés : les pratiques communes, la formation des employés de firmes partenaires, les échanges de personnel, les réunions, les échanges de matériel… Les échanges sont souvent informels, par exemple comme ceux qui se réalisent pendant les colloques professionnels.

[264] Il est bien sûr toujours possible pour le récepteur d'acquérir des connaissances tacites à partir des expérimentations personnelles.

- *les licences publiques générales (LPG, «copyleft »)* : dans l'industrie du logiciel libre (du type Linux), les agents diffusent volontairement et gratuitement leurs connaissances, sachant qu'elles ne pourront pas être appropriées par d'autres. Un programme libre protégé par une LPG peut être utilisé par tout le monde, à condition que les améliorations ultérieures qui résultent des utilisateurs restent elles aussi sous le régime libre (LERNER et TIROLE [2001]).

2.4.2.2. Les incitations à diffuser universellement les connaissances

A première vue, les stratégies d'émission universelle de connaissances semblent dommageables pour les firmes émettrices. Pourtant, plusieurs facteurs peuvent inciter des firmes sur un marché concurrentiel à diffuser universellement leurs connaissances. En dehors des situations triviales où les firmes sont indifférentes à une diffusion[265], on peut citer les cas où les firmes innovatrices peuvent avoir intérêt à diffuser leurs connaissances pour en faire bénéficier soit leurs fournisseurs en amont, lesquels pourront améliorer leurs produits[266], soit leurs concurrents, afin d'établir un effet positif de taille du marché ou susciter la production de produits complémentaires à l'innovation, soit les utilisateurs en aval, afin de bénéficier de leurs commentaires pour améliorer en retour le produit (*« learning by interacting»*, LUNDVALL [1988]). Mais la diffusion universelle est surtout un moyen de créer des effets de réputation, de signaler ses compétences dans le but de rechercher des coopérations en R&D et d'intégrer des réseaux de production de connaissances nouvelles (PENIN [2003]). Ces réseaux doivent être pris à la fois dans leur dimension technologique et dans une dimension géographique. En effet, le choix de la localisation géographique influence le stock de connaissances externes qu'une firme peut absorber car il conditionne l'entrée du réseau dans lequel circulent ces connaissances.

[265] Comme par exemple lorsqu'une firme possède une avance technologique importante et que les imitateurs ne pourront convertir les connaissances imitées qu'après une période de temps relativement longue.

[266] L'innovateur bénéficie alors des améliorations apportées pas son fournisseur sous la forme d'externalités pécuniaires.

Le développement de la capacité d'absorption a mis en évidence le rôle crucial de l'intégration de la R&D externe. Il est donc désormais établi que la production de connaissances s'opère au niveau de la firme suivant un schéma interactif (KLINE et ROSENBERG [1986]), et à un niveau supérieur de manière collective avec les autres firmes et les différentes institutions de la recherche publique. L'appartenance à un réseau d'innovation devient alors capitale, et dans ce cas les connaissances technologiques (tacites et/ou codifiées), biens publics « impurs », deviennent des biens collectifs, des biens «réseau » semi-publics, c'est-à-dire des biens dont la diffusion se limite aux membres du réseau[267] (JOHNSON et LUNDVALL [2001])[268].

Cependant, l'entrée dans un réseau est rendue difficile par les problèmes informationnels (de sélection adverse) liés à l'identification de l'ensemble des acteurs et à l'évaluation des compétences des partenaires potentiels. Ces problèmes peuvent empêcher l'aboutissement de collaborations et entraver le processus collectif de production de connaissances. Les stratégies de «signalement » des compétences sont alors un moyen de résoudre les difficultés de localisation de la connaissance et de sélection adverse.

PENIN [2003] illustre ces enjeux en utilisant une formalisation analogue à celle de COHEN et LEVINTHAL [1989]. Ces derniers postulent qu'il existe un stock mondial de connaissances alimenté par les fuites de connaissances des firmes, dans lequel ces mêmes firmes peuvent puiser en fonction de leur capacité d'absorption. PENIN [2003] endogénéise le processus d'émission de connaissances en supposant que les firmes peuvent décider de la quantité de connaissances qu'elles vont rendre publiques. Cette hypothèse implique que la connaissance soit un bien parfaitement codifié, divisible et que sa diffusion, toujours volontaire de la part des firmes, soit gratuite[269].

---

[267] Dans les réseaux de firmes comme celles impliquées dans des accords de R&D il n'y a pas émission simple, mais plutôt un échange entre les partenaires basé sur la réciprocité. Les vecteurs de diffusion sont variés : les pratiques communes, la formation des employés de firmes partenaires, les échanges de personnel, les réunions, les échanges de matériel… Les échanges sont souvent informels, par exemple comme ceux qui ont lieu pendant les colloques professionnels.

[268] JOHNSON et LUNDVALL [2001, p.12] expliquent que *« reality is complex and most knowledge is neither completely public or completely private. The knowledge base is fragmented and constituted by semi-pubic 'pools' to which access is shared regionally, professionally and through networking »*.

[269] Par exemple l'auteur néglige les frais comme ceux liés au dépôt d'une demande de brevet.

Si l'émission universelle de connaissances représente un signal envoyé aux autres firmes pour susciter une coopération, cette émission permet à la firme d'accroître son stock absorbable en augmentant le nombre de ses partenaires. Ainsi, à chaque période les connaissances externes que la firme est capable d'absorber est fonction de ses propres émissions de connaissances :

$$Z_i = RD_i + g_i\left(\left(\sum_{i \neq j} d_j\right) + S(d_i)\right)$$

où d_i représente la quantité de connaissances universellement diffusée par la firme i et $S(d_i)$ une mesure du stock de connaissances internes au réseau dans lequel s'insère la firme qui diffuse une quantité d_i de connaissances. S est une fonction croissante de d_i , plus la firme i révèle ses connaissances, plus son réseau de partenaire s'agrandit.

Le stock de connaissances externes qu'une firme peut absorber est constitué de deux parties : une partie est composée par le « stock mondial » des connaissances universellement diffusées par les autres firmes, et une autre partie comprend les connaissances semi-publiques accessibles uniquement aux membres du réseau d'innovation de la firme. En outre, le stock de connaissances externes d'une firme est une fonction croissante des émissions universelles de toutes les autres firmes, mais aussi de ses propres émissions. Ainsi, la firme en diffusant une plus ou moins grande partie de ses connaissances détermine l'importance, en quantité et en qualité, du réseau dans lequel elle peut s'insérer.

Les firmes vont choisir ou non de révéler leurs connaissances en observant le résultat de deux effets opposés sur leur profit (PENIN [2003]). D'un côté, les émissions de connaissances, à travers un agrandissement du réseau de leurs partenaires, augmentent leur stock de connaissances et donc leur profit. D'un autre côté, elles augmentent le stock de connaissances des autres firmes ce qui, par un effet de rivalité, diminue le profit de la firme émettrice[270]. Quand le premier effet domine le second, les firmes seront incitées à révéler universellement certaines de leurs connaissances.

[270] Cette diminution sera d'autant plus importante que la concurrence sera vive.

2.5. Les régularités du changement technique

Nous avons montré que les économistes évolutionnistes considèrent que les processus de génération de nouvelles connaissances techniques étaient par nature cumulatifs et irréversibles. Ces processus ont un effet de structuration de la dynamique des industries et vont permettre de repérer et d'analyser des régularités technico-économiques au niveau micro-économique de la firme, au niveau méso-économique d'une filière industrielle et à un niveau plus macro-économique d'un pays ou d'une zone géographique plus large, dans le cadre d'un système national d'innovation (SNI) ou d'un système technologique[271].

Dans un premier temps nous verrons comment les innovations peuvent être appréhendées à travers les paradigmes technologiques, eux-mêmes composés de trajectoires technologiques. Nous aborderons ensuite à travers les notions de régimes technologiques et de cycle de vie industriel d'autres types de régularités technico-économiques discernés par les évolutionnistes.

2.5.1. L'innovation inscrite dans des paradigmes et des trajectoires technologiques

DOSI [1982, 1984, 1988a, 1988b] s'intéresse particulièrement dans plusieurs de ses écrits aux facteurs qui constituent les régularités de la dynamique technico-économique des économies contemporaines. Il distingue deux mécanismes centraux qui encadrent la R&D et l'adoption de nouveaux procédés et de nouveaux produits :

- des « mécanismes internes » aux organisations productives, parmi lesquels sont privilégiés les apprentissages, l'ensemble des capacités et des incitations générés à l'intérieur de chaque firme ou de chaque industrie ;
- des « mécanismes externes » qui interviennent au niveau des connaissances communes disponibles (état de la science et de l'ensemble des savoirs, cadres et facteurs institutionnels et économiques…).

L'originalité de l'approche de DOSI est de traiter ces mécanismes dans un cadre dynamique dans lequel les processus d'apprentissage et de sélection jouent un rôle

[271] C'est le « niveau » d'analyse que nous choisirons dans le Chapitre 4 pour analyser la constitution et l'évolution des industries éolienne et solaire photovoltaïque.

crucial dans l'évolution des capacités et des connaissances. C'est ce qu'explicitent les notions de « paradigmes » et de « trajectoires » technologiques.

2.5.1.1. Les paradigmes technologiques

La notion de « paradigme technologique » est une extension de la notion schumpétérienne de «révolution technologique » (SCHUMPETER [1939]). DOSI [1982] établit une analogie entre l'activité scientifique et le développement de la connaissance technique pour transposer au domaine de la technologie un concept issu de la philosophie des sciences. KUHN [1979] a avancé l'idée de «paradigme scientifique » pour indiquer le cadre de réflexion dans lequel certains problèmes scientifiques seraient abordés et résolus, c'est-à-dire une façon de concevoir le monde à partir de laquelle on traite des problèmes scientifiques que l'on cherche à résoudre à un moment donné[272]. Nous avons vu que dans la pensée évolutionniste, quelle que soit la base de connaissances, l'innovation, *i.e.* l'activité de résolution de problème, implique le développement et la mise au point de modèles et de procédures spécifiques. Ces dernières forment donc un paradigme technologique que DOSI [1988a, p. 1127] définit comme *« (…) a 'pattern' of solution of selected technoeconomic problems based on highly selected principles derived from the natural sciences, jointly with specific rules aimed to acquire new knowledge and safeguard it, whenever possible, against rapid diffusion to the competitors. »*

- Le paradigme technologique est assimilable à un potentiel de développement technologique à partir duquel plusieurs possibilités de recherches et de développements

[272] Un paradigme scientifique est un mode d'interrogation. Il comporte un certain nombre d'hypothèses sur la façon dont la science doit aborder la recherche et indique les directions à explorer et les méthodes à employer. L'activité scientifique n'est alors pas la remise en question des hypothèses qui ont fondé le paradigme, mais elle essaie au contraire de les confirmer et de les approfondir. L'activité scientifique dans le cadre d'un paradigme constitue la « science normale », dans le sens qu'elle n'a pas pour objet de rechercher la nouveauté mais de poursuivre les travaux déjà entrepris dans le paradigme dominant. Un paradigme scientifique suit un cycle de vie : dans son développement, son pouvoir explicatif a tendance à diminuer car les travaux dans un même paradigme conduisent à poser des problèmes qui ne peuvent plus être résolus dans la direction suivie au départ. Intervient alors une période de « crise paradigmatique » qui va inciter les scientifiques à changer radicalement leur réflexion, c'est-à-dire à changer de paradigme. La recherche scientifique évolue donc par changements successifs de paradigmes scientifiques (KUHN [1979], CHALMERS [1997]).

existent mais dont les limites sont fixées au départ. Il est donc à la fois une « collection » d'objets techniques (des *artefacts*), dont les caractéristiques technico-économiques sont bien définies mais peuvent s'améliorer[273], et une « heuristique », c'est-à-dire un schéma de questionnement qui définit le champ à explorer (DOSI [1988a])[274]. Le paradigme technologique modèle l'activité innovatrice en définissant des « foyers d'attention », des directions à privilégier et d'autres à abandonner[275]. C'est au sein de ces incitations et de ces contraintes que se manifeste l'irréversibilité du processus d'innovation.

En fait, comme le souligne GAFFARD [1990a, 1990b] le paradigme technologique, version plus « sophistiquée » de la notion d'innovation radicale s'opposant à celle d'innovation mineure, permet en matière de changement technique de tracer une ligne de partage entre ce qui appartient et ce qui est extérieur à l'Economie. En effet selon DOSI [1988a] les paradigmes technologiques sont différenciés selon les secteurs industriels, ce qui montre bien que la définition du paradigme est essentiellement « non économique ». Par exemple selon cette idée, il existe des procédures de recherche spécifiques à la chimie ou à la micro-électronique qui tiennent à la nature de la base de connaissances et qui se reflètent dans les compétences de recherche des firmes. Ces dernières semblent donc exister en dehors de toute référence à des questions techniques. Elles représentent d'une part, les capacités à comprendre les interactions d'ordre technique et, d'autre part, les capacités à comprendre et anticiper les préférences des consommateurs. On peut associer à l'idée de paradigme la notion de trajectoire technologique qui représente les améliorations incrémentales réalisées à l'intérieur d'un paradigme.

---

[273] Cela suppose que les firmes mettent en œuvre des compétences.

[274] DOSI [1988a, p. 1127] avance que *« A technological paradigm is both an exemplar – an artifact that is to be developped and improved (such as a car, an integrated circuit, a lathe, each with a particular technoeconomic characteristics) – and a set of heuristics (e.g. Where do we go from here ? Where should we search ? What sort of knowledge should we draw on ?).*

[275] En ce sens la notion de paradigme technologique est proche des notions de *« focusing devices»* proposée par ROSENBERG [1976] et de *« technological guide-posts »* avancée par SAHAL [1985]. A un niveau plus macro-économique FREEMAN et PEREZ [1986] ont employé la notion de « paradigme techno-économique » pour se référer à une « grappe » de « micro-paradigmes » qui présentent de nombreuses caractéristiques communes, des complémentarités et des interrelations, comme par exemple les semi-conducteurs, la micro-informatique, la robotique industrielle…

2.5.1.2. Les trajectoires technologiques

L'ensemble des incitations et des contraintes posées par un paradigme technologique confère au processus d'innovation son caractère irréversible. Comme nous l'avons déjà évoqué, la conséquence essentielle est que les activités innovatrices sont fortement sélectives, spécifiques et cumulatives (DOSI [1988a]):

- sélectives puisque le paradigme technologique privilégie certaines directions en n'explorant qu'une partie des options possibles ;
- spécifiques car les firmes mettent en place des capacités composées en partie de connaissances tacites[276], difficilement transférables et imitables dans le cadre des relations de marché ;
- cumulatives car les savoirs s'accumulent dans des directions privilégiées, l'apprentissage restant un processus local.

Ces trois éléments s'articulent dans la trajectoire technologique qui est le produit de l'interaction entre des variables techniques et des variables économiques, dans les limites fixées par le paradigme. Cela signifie que les caractéristiques technologiques observables à un moment donné et l'ordre des trajectoires technologiques dans le temps sont en nombre limité. En outre, une trajectoire technologique, quelle qu'elle soit conduit, dans une certaine direction et de manière irréversible, aux limites du paradigme en épuisant ses potentialités. En conséquence, seul un changement de paradigme, peut entraîner un changement dans les trajectoires en ouvrant de nouvelles opportunités technologiques qui vont agir sur la variété des innovations potentielles et sur le degré de faciliter à les réaliser.

2.5.1.3. Le rôle de l'incertitude dans le potentiel technologique

La dissociation fondamentale que font les évolutionnistes entre la technologie et l'information modifie le rapport que la première entretient avec l'incertitude. DOSI [1988a] souligne que le développement technologique n'est plus un processus purement aléatoire. La technologie est cumulative et spécifique à la firme, et le processus d'innovation est limité par les «zones» technologiques et économiques des activités

[276] A travers les routines et les compétences.

existantes. Cela ne signifie pas pour autant que l'incertitude est réduite. Au contraire dans cette analyse l'incertitude des activités innovatrices est plus forte que dans les modèles économiques standards. En effet, l'incertitude ici concerne le manque de connaissances sur les résultats et les coûts des différentes options technologiques possibles, mais aussi le manque de connaissances de l'ensemble des alternatives existantes. Mais selon DOSI (*ibid.*) l'incertitude la plus forte concerne les phases de changement technologique qu'il qualifie de « préparadigmatiques », alors qu'une incertitude plus faible concerne les phases d'exploitation du potentiel technologique, c'est-à-dire lorsqu'un paradigme technologique est établi[277]. Ainsi, le long d'une trajectoire technologique l'ensemble des contraintes réduisent progressivement le champ des alternatives technologiques possibles. Ces contraintes expliquent l'instauration de routines d'innovation et n'excluent pas des ruptures dans les trajectoires et les paradigmes. Ainsi une incertitude forte (non probabilisable) pèse toujours à chaque changement de paradigme.

2.5.2. La typologie des trajectoires technologiques de PAVITT [1984]

NELSON et WINTER [1982] ont avancé la notion très générale de « trajectoire [technologique] naturelle » regroupant l'ensemble des principes de développement technologique communs à une majorité de trajectoires particulières. Ils avancent à travers cette notion qu'une large gamme d'activités ont en commun différents aspects du développement technologique. Parmi ces aspects, on trouve l'exploitation progressive des économies d'échelle et la mécanisation croissante des opérations de production qui permettent de «cristalliser » l'activité d'invention et les apprentissages, ce qui définit ainsi une trajectoire naturelle. La trajectoire naturelle montre que le développement technologique n'est ni arbitraire, ni imprévisible et qu'il est possible de définir un modèle ouvrant la voie à des analyses aussi bien positives que normatives. Cet aspect est important pour la définition de politiques technologiques. Cependant, on ne peut pas réduire la spécificité des trajectoires technologiques à cette logique générale de la recherche des économies d'échelle et de la mécanisation.

[277] Si l'on poursuit ce raisonnement l'incertitude va donc en diminuant à mesure que les directions de recherche sont délimitées et que les anticipations technologiques ou commerciales sont assurées.

Le développement de technologies et de méthodes particulières de résolution de problèmes augmentent les capacités d'une firme (et d'une industrie) à choisir une « direction technologique » originale et l'incite ensuite à la poursuivre dans le futur. Les processus de changement technologique sont donc « enfermés » dans des trajectoires technologiques particulières et, compte tenu de la nature cumulative et différenciée de la technologie, les firmes ont toutes des trajectoires différentes, voire uniques. Malgré tout, entre la généralité de la trajectoire naturelle et la grande variété des trajectoires spécifiques, il est possible de repérer des grandes régularités sectorielles à la fois dans les sources et les directions du progrès technique, en fonction du secteur principal d'activité des firmes innovatrices. PAVITT [1984] a le premier[278] mis en évidence un ensemble de déterminants et de caractéristiques des trajectoires pour établir une taxonomie des trajectoires technologiques, en appuyant son analyse sur une base de données concernant 4 000 innovations au Royaume-Uni de 1945 à 1979. Parmi les déterminants, il inclue les sources de la technologie, les exigences de la demande et les modes d'appropriation des résultats de l'innovation[279]. Parmi les caractéristiques, il retient, d'une part, la taille relative des firmes innovatives, l'intensité et la direction de la diversification technologique et, d'autre part, le poids relatif des innovations de processus et de produit. La combinaison des différents déterminants retenus permet à PAVITT [*ibid.*] d'identifier quatre groupes principaux de firmes associées à des secteurs principaux d'activité qui suivent chacun une trajectoire respectant une certaine combinaison des caractéristiques choisies :

- *le groupe des firmes dominées par les offreurs* dont les principales innovations de processus (biens d'équipement) sont initiées par des firmes extérieures au secteur considéré. Le mode d'appropriation est surtout non-technique ; les capacités

[278] Pour des tests empiriques et des prolongements de la taxonomie de PAVITT [1984] voir notamment les travaux plus récents ARCHIBUGI *et al.* [1991], DE MARCHI *et al.* [1997] et MARSILI et VERSPAGEN [2002].

[279] Les sources de la technologie sont « internes » quand la technologie est conçue dans la firme (service de R&D). Elles sont externes quand la technologie provient soit des offreurs des biens d'équipements, soit des utilisateurs des produits fabriqués, soit des laboratoires publics de recherche. Les exigences de la demande se classent en deux catégories : les clients sont soit sensibles au prix, soit sensibles à la qualité et à la performance du produit. Les modes d'appropriation peuvent être techniques lorsqu'ils concernent des secrets de fabrication et des savoir-faire en matière de R&D. Dans ces cas, ils reposent sur des brevets, sur des économies dynamiques d'apprentissage ou sur des délais technologiques. Les modes d'appropriation non techniques reposent sur la notoriété de la marque commerciale, le marketing, la publicité ou la conception esthétique du produit (PAVITT [1984]).

d'apprentissage sont assez restreintes ; les utilisateurs sont plutôt sensibles au prix ; la diversification technologique est faible ; les firmes n'ont pas une très grande taille. La trajectoire technologique est une trajectoire de baisse des coûts.

- *Le groupe des offreurs spécialisés* dont les innovations de produits entrent dans les autres secteurs en tant qu'*inputs* de capital fixe. Les nombreuses opportunités d'innovation sont exploitées par des activités informelles d'amélioration des produits et les compétences cumulatives assurent une forte appropriation de l'innovation. La diversification technologique est faible ; les firmes sont relativement petites et sont proches des utilisateurs, lesquels sont sensibles à la qualité. La trajectoire technologique est une trajectoire de conception/reconception du produit.

- *Le groupe des firmes de production de masse* dans lequel les innovations, initiées par de la recherche interne et par des offreurs spécialisés, concernent aussi bien des produits que des processus. Les modes d'appropriation sont essentiellement techniques ; les firmes sont de grande taille et les économies d'échelle sont importantes ; les utilisateurs sont sensibles au prix. La trajectoire technologique est à la fois une trajectoire de baisse des coûts et une trajectoire de conception/reconception du produit.

- *Le groupe des firmes dont les activités sont basées sur la science* dont les innovations sont directement liées aux nouvelles connaissances scientifiques fondant un nouveau paradigme technologique. Les opportunités d'innovation sont nombreuses, les investissements en recherche sont très élevés et les activités d'innovation sont mises en œuvre par des grands laboratoires de R&D. La plupart des innovations sont des innovations de produits se diffusant dans les autres secteurs comme biens d'équipement. Le mode d'appropriation des résultats de l'innovation est technique ; les utilisateurs sont sensibles au prix et à la qualité du produit ; la diversification technologique est forte et les firmes sont de grande taille. La trajectoire technologique suivie est mixte, dirigée vers la baisse des coûts et vers les activités de conception/reconception du produit.

Cette taxonomie des trajectoires technologiques est nécessairement réductrice puisqu'elle ne permet pas de couvrir tous les cas de figure selon les activités[280].

[280] Ainsi DOSI [1988a, p. 1149] commentant la taxonomie de PAVITT [1984] souligne par exemple que l'activité aérospatiale partage avec les firmes dont les activités sont basées sur la science l'importance des

Cependant, elle permet de caractériser les propriétés globales de la trajectoire technologique à laquelle appartient une firme donnée ou dans laquelle s'insère une nouvelle technologie particulière. Comme le souligne DOSI [1988a] ce type d'exercice est nécessaire pour parvenir à des conclusions normatives en matière de politiques industrielle et technologique, car il permet de se focaliser sur leurs enjeux principaux, notamment la pertinence de l'adaptation de l'intervention en fonction des différents groupes de firmes.

2.5.3. La typologie des industries à partir des « régimes technologiques »

2.5.3.1. Les industries et les régimes technologiques

A partir d'une analyse empirique la typologie des trajectoires technologiques de PAVITT [1984] cherche à repérer et à analyser les facteurs de régularités technico-économiques au niveau des firmes. Au niveau supérieur de la configuration des industries, l'approche de MALERBA et ORSENIGO [1993, 1995, 1996a, 1996b] en termes de « régimes technologiques » décrit une combinaison de facteurs qui sont constitutifs et explicatifs de la dynamique interne d'une industrie. Cette approche nous apparaît originale dans la mesure où elle essaie de combiner (i) les opportunités technologiques, (ii) les mécanismes d'appropriation, (iii) le degré de cumulativité de la connaissance technique et (iv) les caractéristiques de la base de connaissances.

(i) Les conditions d'opportunités technologiques concernent le potentiel de rupture d'une industrie et délimitent en quelque sorte son «champ exploratoire ». Les sources d'opportunités technologiques sont très variées, et elles sont à la fois exogènes et endogènes aux activités de production. Si les connaissances scientifiques (exogènes) sont essentielles dans la détermination des opportunités, le plus important reste la perception des opportunités technologiques par les agents. En effet, celle-ci va déterminer leur engagement dans une activité de recherche. Plusieurs facteurs (en partie) endogènes (comme par exemple les activités « d'essai-erreur » internalisées dans les firmes, la prise en compte des demandes des utilisateurs ou encore les « institutions relais » - les universités ou les laboratoires publics de recherche - entre la science

---

innovations liées à l'apparition des nouvelles connaissances scientifiques, et avec le groupe des firmes de production de masse l'importance des économies d'échelle.

fondamentale et l'industrie) contribuent à déterminer les opportunités dans une industrie. (ii) Les mécanismes d'appropriation se réfèrent aux incitations en précisant les modalités de protection des résultats de l'innovation contre les imitations. Nous avons précédemment abordé les mécanismes d'appropriation[281] des résultats de l'innovation définis par LEVIN *et al.* [1987] et repris par COHEN *et al.* [2000]. Ces mécanismes représentent des barrières à l'entrée à la fois « naturelles », institutionnelles et stratégiques. Mais également, il est important de relever que les conditions d'appropriabilité vont changer en fonction des industries considérées selon que les connaissances sont plus ou moins tacites et selon leur protection institutionnelle (les brevets)[282]. Ces deux premières conditions d'opportunité et d'appropriabilité fondent l'engagement des firmes dans les activités de recherche et contribuent à une structuration différentes des industries.

(iii) Le degré de cumulativité de la connaissance technique traduit le fait que l'expérience et les activités innovatrices passées déterminent en partie le champ des activités innovatrices en cours et futures. Le degré de cumulativité fait référence au positionnement sur une trajectoire technologique particulière et détermine le potentiel d'exploitation dans l'industrie. (iv) Enfin, les caractéristiques de la base de connaissances fondées sur la distinction entre les connaissances tacites et les connaissances codifiées permettent de caractériser l'environnement technologique dans lequel les firmes se trouvent pour proposer ainsi le type de stratégie qui s'impose selon le régime.

---

[281] Les brevets, le secret, l'avantage temporel, le coût et le temps nécessaire pour l'imitation, les effets d'apprentissage et les effets commerciaux, voir Chapitre 2, p.26.

[282] COHENDET *et al.* [1992] soulignent que les brevets ne constituent pas les formes de protection les plus efficaces privilégiées par les firmes. En outre, selon DOSI [1988a, p. 1140] *« it must noticed that the partly nature of innovative knowledge and its characteristics of partial private appropriability makes imitation, as well as innovation, a creative process, which involves search, which is not wholly distinct from the search for 'new' development, and which is economically expensive – sometimes even more expensive than the original innovation. (…) This applies to both patented and non patented innovations. »*

2.5.3.2. Les cadres stratégiques

MALERBA et ORSENIGO [1996b] déduisent des conditions précédentes trois principales stratégies :

- une stratégie de recherche radicale de nouvelles technologies qui correspond à une configuration où, *ceteris paribus*, les opportunités technologiques sont fortes ;
- une stratégie de recherche incrémentale (ou d'exploitation des connaissances et des capacités technologiques existantes) qui correspond, *ceteris paribus*, à une configuration de cumulativité forte ;
- une stratégie d'imitation qui correspond, *ceteris paribus*, à une configuration d'appropriabilité faible et de connaissances codifiées.

Plusieurs remarques peuvent être adressées à cette analyse évolutionniste débouchant sur un cadre stratégique minimaliste. En premier lieu, ces trois stratégies (recherche radicale, recherche incrémentale, imitation) semblent relativement déterministes car elles sont imposées par la configuration du régime technologique qui prévaut. Par exemple, dans la stratégie de recherche incrémentale la firme ne semble pas avoir le choix dans la mesure où elle est contrainte par son expérience passée et par la configuration de l'industrie. Ce type de stratégie peut impliquer des risques qui ne sont pas de prime abord soulignés, notamment une trop forte spécialisation des activités innovatrices sur une trajectoire pouvant conduire à un *lock-in* dans une direction technologique inefficiente. Par ailleurs, dans leur stratégie de gestion des apprentissages les firmes doivent arbitrer entre ce que MARENGO [1994] dénomme « l'exploration » et « l'exploitation ». Au niveau de la firme, l'exploration se caractérise par le maintien d'une diversité des savoirs et par l'activation de procédures de recherche (les activités de *« search »*) venant modifier les routines existantes. Ces activités entraînent des coûts élevés pour développer des innovations radicales (porteuses d'avantages concurrentiels futurs) et « neutralisent » les gains tirés des effets d'expérience le long d'une trajectoire. En conséquence, des organisations décentralisées sont mieux adaptées aux activités d'exploration à la fois au niveau interne de la firme (diversité des savoirs, apprentissages décentralisés), qu'au niveau externe (liens avec les institutions scientifiques et les firmes concurrentes). *A contrario*, l'exploitation se caractérise par l'exploitation de savoirs communs et spécialisés, avec une utilisation des ressources

internes vers l'exploitation et l'amélioration de cette base commune de savoirs. Ici le verrouillage le long d'une trajectoire cumulative et le sacrifice d'opportunités technologiques constituent des risques pour la firme. L'exploitation implique donc une organisation plus centralisée[283]. Une des solutions à cet arbitrage peut résider dans un apprentissage de la standardisation de manière à dégager des ressources, *via* les effets d'expérience, pour les allouer à un apprentissage de la diversité (FORAY [1994]).

2.5.3.3. Les régimes technologiques : le régime « entrepreneurial » versus *le régime « routinier »*

A partir du cadre analytique défini et en s'appuyant sur les travaux de SCHUMPETER[284], de NELSON et WINTER [1982] et de WINTER [1984], MALERBA et ORSENIGO [1995, 1996a, 1996b] analysent deux configurations technico-économiques « limites » que l'on pourrait situer schématiquement aux deux extrémités d'un *continuum* :

- *le régime technologique entrepreneurial* (*« SCHUMPETER Mark I »*) est caractérisé par une combinaison de fortes opportunités technologiques, poussant l'engagement continuel de nouveaux innovateurs dans l'industrie, et de faibles conditions de cumulativité et d'appropriabilité empêchant la mise en place de barrières à l'entrée et le maintien d'avantages monopolistiques. En conséquence, les structures de marché sont « fluides » avec des turbulences importantes (entrées et sorties permanentes de firmes, variabilité des parts de marché). Ce régime met en exergue les stratégies d'exploration de nouvelles technologies (apprentissage de la diversité). Les tests

[283] En fait MARENGO [1994] propose en parallèle une typologie des conceptions organisationnelles en fonction de la distribution des savoirs et des types d'environnement. Un environnement stable avec des savoirs communs va de pair avec des procédures de coordination centralisées tandis qu'un environnement instable et un maintien de la diversité des savoirs implique des procédures de coordination plus décentralisées.

[284] MALERBA et ORSENIGO [1995, 1996a, 1996b] proposent une lecture moderne de SCHUMPETER en dénommant leur modèle entrepreneurial *« SCHUMPETER Mark I»* et le modèle routinier *« SCHUMPETER Mark II »* (voir *infra*).

économétriques[285] menés par les auteurs (MALERBA et ORSENIGO [1996a]) montrent que la configuration entrepreneuriale concerne principalement les industries traditionnelles, comme la mécanique ;

- *le régime technologique routinier* désigne les industries où les conditions d'appropriabilité, d'opportunités technologiques et de cumulativité sont élevées. Les firmes en place, de taille importante, ont rôle essentiel dans l'activité innovatrice en alliant « exploration » et « exploitation » et en s'appropriant les résultats des innovations. La structure de marché est rigide. Selon les tests des auteurs, ce régime routinier est représentatif de la plupart des industries chimiques, électriques et électroniques.

Ces deux régimes technologiques correspondent à deux situations théoriques extrêmes, la réalité industrielle étant le plus souvent faite de situations intermédiaires. L'approche de MALERBA et ORSENIGO (*ibid.*) en terme de régimes technologiques donne une vision du pouvoir de structuration des processus d'innovation sur la dynamique des industries. Pour résumer, leur dichotomie oppose une configuration technico-économique «réversible » au niveau des avantages concurrentiels (le régime entrepreneurial) à une configuration « irréversible » dans laquelle les firmes établies dominent (le régime routinier).

2.5.4. Le cycle de vie d'une industrie et l'émergence d'un *dominant design*

Inspirés par la notion de «combinaisons radicalement nouvelles » avancées par SCHUMPETER, plusieurs auteurs se sont employés à donner une vision de l'émergence d'une industrie à partir du « cycle de vie technologique des industries » (ABERNATHY et UTTERBACK [1978], GORT et KLEPPER [1982], KLEPPER [1996]). Ils identifient trois phases constitutives du cycle de vie des industries : (i) la phase d'émergence caractérisée par une innovation radicale, (ii) la phase d'apparition d'une conception dominante (*dominant design*) des caractéristiques d'une technologie et (iii) la phase de maturité-déclin.

[285] MALERBA et ORSENIGO [1996a] s'appuient sur une base de données de brevets large couvrant 50 industries dans les principaux industrialisés (Etats-Unis, Japon, Allemagne, France, Royaume-Uni et Italie) pour une période de 1978 à 1991.

(i) La phase d'émergence est marquée par une innovation radicale tirée directement d'une rupture scientifique ou technologique majeure, qui provoque un flux d'innovations de produits. Cette première phase connaît des turbulences au niveau des structures de marché (entrées, sorties, parts de marché) : des incertitudes importantes pèsent sur les caractéristiques fonctionnelles des technologies ; de nombreuses petites firmes entrent sur le marché mais leur croissance est restreinte par l'incertitude initiale liée aux activités d'exploration, même si celle-ci diminue compte tenu des effets d'apprentissage ; les parts de marché évoluent rapidement en raison de l'élimination des firmes les moins efficaces par les innovateurs successifs. (ii) Les différents types d'apprentissages et les rendements croissants favorisent ensuite l'émergence d'un *dominant design* qui va cristalliser les apprentissages et « normaliser » la concurrence, laquelle va se déplacer vers les prix et la différenciation (ABERNATHY et UTTERBACK [1978]). La transition s'opère d'un régime d'accumulation des connaissances fondé sur l'apprentissage de la diversité technologique (phase d'émergence) vers un régime fondé sur l'apprentissage de la standardisation. (iii) Au cours de la phase de maturité intervient un mouvement de consolidation industrielle qui repose sur une sélection interne des firmes et la constitution de barrières à l'entrée. Les firmes qui disposent de compétences pour les innovations de production et pour l'intégration de procédés nouveaux seront sélectionnées, indépendamment de leur taille. Les barrières à l'entrée proviennent de l'augmentation des coûts de l'équipement de production qui confère un avantage aux firmes qui disposent de grandes parts de marché. Les barrières à l'entrée peuvent provenir de facteurs indépendants de la technologie comme le réseau de distribution, des relations d'exclusivité avec certains fournisseurs… A l'issue de cette étape le modèle technologique dominant est alors épuisé par les améliorations incrémentales et les effets d'expérience qui ont pu avoir lieu.

Dans cette approche, qui s'appuie sur des analyses empiriques, la phase d'émergence est primordiale pour comprendre l'évolution future d'une industrie. Elle démarre de la rupture initiale jusqu'au « point de basculement » qui peut figer l'industrie sur un *dominant design*, c'est-à-dire jusqu'au moment où l'industrie sera « verrouillée » par une technologie (*lock-in* technologique)[286]. Cependant, tous les cycles de vie industriel ne répondent pas obligatoirement à cette description et la généralisation peut être problématique (KLEPPER [1996], MALERBA et ORSENIGO

[286] Voir *supra*.

[1996]). Le rôle central joué par la notion de *dominant design* est susceptible d'affaiblir la portée de l'analyse car le concept peut selon les secteurs industriels s'avérer imprécis et ne pas s'appliquer à tous les produits[287]. Dans les industries de pointe souvent constituées de « produits systèmes » nécessitant un assemblage de connaissances scientifiques et technologiques diverses, un *dominant design* peut ne jamais apparaître ou ne jamais se stabiliser. En outre, ce type d'approche peut minimiser l'influence de la demande sur les incitations à innover et se limiter à une vision de type *« technology push »*.

* * *

Cette section nous a permis de préciser la conception évolutionniste de l'innovation. Se fondant sur une analyse qui se veut proche de la réalité industrielle, les évolutionnistes se réfèrent à un modèle dans lequel les différentes phases et acteurs du processus d'innovation sont en interaction. L'innovation est définie comme une activité, locale et cumulative, de résolution de problème. Cette nouvelle approche nous a permis de redéfinir l'approche traditionnelle des externalités de connaissances. Une conséquence fondamentale de cette analyse, en rupture avec la théorie standard, est que l'on passe d'une économie de l'information à une économie de la connaissance, dans laquelle les firmes deviennent «actives » vis-à-vis des externalités de connaissances : elles développent une capacité d'absorption des connaissances nouvelles externes et une capacité d'émission de leurs propres connaissances. La reconnaissance de ces capacités augmente l'appropriabilité des innovations et donc leur incitation « naturelle » à innover, ainsi que leur faculté de signalement afin d'intégrer notamment des réseaux privés et/ou publics de création de connaissances.

Aux niveaux méso et macro-économiques les évolutionnistes repèrent des régularités issues des actions décentralisées et non coordonnées des agents économiques. Ainsi, sont mis en évidence des paradigmes et des trajectoires technologiques qui délimitent, pour un secteur économique, les problèmes que l'innovation doit résoudre et la nature des solutions techniques les plus probables. Les

[287] Le modèle du *dominant design* semble pertinent lorsque les produits sont étroitement définis au niveau de la demande et des caractéristiques technologiques. Le cycle de vie est alors bien identifié et le modèle dominant s'impose rapidement, ce qui est le cas dans les industries de biens de consommation durables.

régimes technologiques permettent de souligner d'autres types de régularités en y associant des stratégies « types ». Enfin, la notion de cycle de vie d'une industrie permet distinguer plusieurs phases conduisant à l'émergence d'un *dominant design*.

La conception évolutionniste de l'innovation constitue ainsi un cadre théorique qui nous apparaît plus approprié pour situer notre problématique. En effet, sachant que la constitution et le développement des technologies de l'énergie relèvent d'une dimension dynamique de longue période, ce cadre permet de mieux appréhender les incitations des firmes à s'engager dans l'apprentissage de nouvelles technologies comme celles des énergies renouvelables. La section suivante va nous permettre de reformuler et de situer l'action des politiques publiques technologiques et environnementales.

Section 3. Une reformulation des politiques technologiques et environnementales dans le cadre évolutionniste

Cette section a pour but, dans le cadre évolutionniste, d'aboutir à une formulation de principes généraux de politiques technologiques et environnementales pour encourager le développement de technologies « vertes ».

Dans un premier point, nous présenterons les hypothèses que pose l'analyse évolutionniste sur le rôle de l'Etat dans le système économique. La situation dans un cadre dynamique va rendre alors nécessaire l'édiction de nouvelles règles normatives pour justifier et diriger les interventions publiques. Ces règles combinées aux hypothèses de la théorie évolutionniste sur les externalités de connaissances nous permettrons de reconsidérer les principes d'intervention de la politique industrielle ainsi que les difficultés qu'elle doit surmonter. Ensuite nous associerons la problématique environnementale à l'analyse évolutionniste de l'innovation et de la technologie. Cela nous conduira, dans un dernier point, à aborder plus précisément la question de l'émergence d'une technologie « verte » à travers les situations de compétition technologique traitées par les modèles à rendements croissants d'adoption. Nous présenterons le modèle de compétition technologique d'ARTHUR [1989] pour sa portée heuristique, puis le modèle de LAFFOND *et al.* [2000] abordant la question de l'intervention publique destinée à soutenir le développement d'une nouvelle technologie « verte » en concurrence avec des technologies déjà établies. Nous essairons alors d'en tirer des enseignements pour guider l'action publique dans les domaines technologiques et environnementaux.

3.1. L'intervention de l'Etat dans l'analyse évolutionniste

Dans les travaux fondateurs de l'évolutionnisme contemporain, l'action de l'Etat n'est pas un objet de réflexion théorique en tant que telle et n'occupe le plus souvent qu'un rôle subsidiaire (NELSON et WINTER [1982]). Même les théoriciens, comme NELSON, qui ont depuis longtemps montré beaucoup d'intérêt pour les politiques scientifiques et technologiques, n'ont souvent abordé l'Etat que comme un acteur extérieur à un système économique en évolution et auquel ne s'appliquent pas explicitement les principes évolutionnistes. Les fonctions de l'Etat et des institutions

publiques à travers les politiques technologiques n'ont commencé à être intégrées et reliées aux concepts évolutionnistes que depuis les travaux sur les systèmes nationaux d'innovation[288] à la fin des années 1980 (FREEMAN [1988], LUNDVALL [1988], NELSON [1988]). Dans une période plus récente, plusieurs travaux ont été consacrés aux politiques industrielles et technologiques dans une perspective résolument évolutionniste (CARLSSON [1992], METCALFE [1994], DE BANDT [1995], NIOSI et BELLON [1995], SAVIOTTI [1995], LESOURNE *et al.* [2002], MOREAU [2004]). Il en résulte une mise en correspondance des principaux concepts théoriques évolutionnistes et de l'action de l'Etat.

3.1.1. Le rôle de l'Etat dans l'analyse évolutionniste : quelles hypothèses et quels principes généraux ?

Dans l'analyse évolutionniste, l'Etat, composé d'un ensemble d'organisations, doit faire face dans ses décisions à une incertitude radicale. Cela a pour conséquence d'entraîner une redéfinition des règles normatives dirigeant son action.

3.1.1.1. L'Etat : un ensemble d'organisations en concurrence

Comme les grandes entreprises qui ont perdu leur unité dans la globalisation croissante, l'Etat se caractérise par une fragmentation de ses structures. Celui-ci est moins une organisation monolithique qu'un ensemble d'organisations (ministères, agences et entreprises publiques, laboratoires, universités…) possédant des fonctions diverses (économiques, juridiques, administratives, militaires…). A chaque organisation publique correspondent plusieurs fonctions ; inversement plusieurs fonctions peuvent être assumées par plusieurs organisations. NELSON et WINTER [1982] ont souligné la multiplicité des acteurs intervenant dans la création et la mise en œuvre des politiques industrielles.

Pour BELLON et NIOSI [1995, p. 218] *« dans le contexte actuel de globalisation et de régionalisation, l'Etat est moins que jamais une organisation qu'un ensemble*

[288] Le système national d'innovation est un outil théorique qui a pour objectif d'étudier les relations entre les institutions publiques et les organisations privées, en mettant l'accent sur les liens entre les différents agents innovateurs et sur l'influence des politiques publiques. Voir le Chapitre 4.

d'organisations, appliquant des fonctions différentes sur des territoires différents, exerçant des pouvoirs et bénéficiant de niveaux de légitimité différents. La concurrence entre les organisations étatiques au sein d'un territoire national, induisant des effets d'adaptation, d'innovation et de sélection, existe bel et bien mais elle suit des règles différentes de celles du marché privé. Enfin, les frontières entre l'Etat et le marché ne sont pas des frontières de droit mais de fait, elles sont instables et incertaines, mais changent en fonction des situations historiques, et des rapports entre divers groupes de la société. » Cette fragmentation des pouvoirs publics en plusieurs paliers induit un partage des compétences enchevêtré, un accroissement du volume de l'information et des efforts pour la produire, la trier et l'utiliser. Cette complexité organisationnelle allonge les processus de décision, depuis la conception des problèmes à résoudre jusqu'à l'évaluation des résultats, et induit des coûts en temps, en organisation et donc en argent.

La fragmentation institutionnelle de l'Etat soulève des problèmes de concurrence et de coopération entre ses différentes composantes. En effet, la multiplication des lieux de légitimité multiplie les sources d'initiative et les conflits de compétences. Au niveau des pratiques cela se traduit par un remplacement partiel des comportements *top-down*, caractéristiques des organisations hiérarchiques, par des règles *bottom-up* laissant davantage d'initiative aux institutions de base (BELLON et NIOSI [1995]). D'une manière générale, le principe de subsidiarité, consistant à traiter les questions au niveau « le plus local » possible pour apporter une solution, renverse le sens de la légitimité publique qui part davantage de la base et ne s'arrête plus à la Nation. La complexité croissante des acteurs et de leurs pratiques conduit à une complexité croissante de leurs relations. Ces dernières s'effectuent de plus en plus de manière horizontale et non plus seulement de manière verticale. En outre, cela implique le développement de relations transverses à l'intérieur même des institutions et une ouverture vers des partenaires appartenant à d'autres institutions. Il en résulte une redéfinition des « proximités » structurant les systèmes industriels et les mécanismes de sélection. En plus de la proximité géographique, d'autres proximités deviennent essentielles, comme les proximités stratégiques concernant des firmes aux comportements et aux compétences complémentaires. Ces proximités suivent des processus fortement évolutifs qui dépendent à la fois des moyens de production, de la circulation des biens, des services et des connaissances, des formes d'apprentissage et de la diffusion des savoirs. Cette complexité des interrelations entraîne un élargissement des possibilités d'interventions

publiques dans les domaines de la production, de l'organisation et de la diffusion des connaissances scientifiques et techniques.

3.1.1.2. L'incertitude liée aux interventions publiques

Nous avons plusieurs fois évoqué la dimension importante qu'accordent les évolutionnistes à l'incertitude[289]. Ces derniers rendent compte de l'évolution des systèmes économiques et technologiques par des séquences de courtes périodes de changements qualitatifs suivies par des périodes plus longues de changements incrémentaux. L'incertitude est alors au maximum quand les systèmes se situent au voisinage des transitions, des changements qualitatifs ou des changements de paradigmes. Comme les autres agents économiques, l'Etat doit faire face à une incertitude radicale, dans le sens où il ne peut pas envisager la plupart des états futurs du monde. Tout agent économique doit donc en permanence s'adapter aux changements de son environnement, sachant qu'il ne peut qu'imparfaitement les anticiper. Ainsi, même si l'Etat possède une capacité à orienter le système économique sans comparaison avec celle des agents privés, il demeure fondamentalement soumis aux mêmes contraintes informationnelles et comportementales (METCALFE [1994]). En effet, les marges de manœuvre du *policy maker* dépendent des limites administratives et politiques que lui fixent les autorités qui encadrent son action. Par rapport aux agents privés, l'Etat ne dispose pas d'une meilleure capacité de compréhension des marchés ou des opportunités technologiques. En conséquence, la question est de savoir comment il définit ses règles d'action, comment il apprend et s'adapte à partir de ses expériences passées.

3.1.1.3. Quelles règles normatives pour diriger l'action de l'Etat ?

Dans un environnement économique fluctuant et incertain et compte tenu de leur rationalité limitée, les agents privés ne peuvent mettre en œuvre que des procédures adaptatives. Concernant ce point, l'Etat, bien que doté de possibilités plus importantes

[289]On peut rappeler que les évolutionnistes ne considèrent pas systématiquement un monde risqué ou incertain dans lequel les agents privés connaissent les états du monde possibles et leur associent des probabilités objectives ou subjectives.

de recueil et de traitement de l'information, n'est pas dans une situation différente. Le chapitre précédent nous a permis d'aborder les situations définies par la théorie néoclassique pour justifier une intervention de l'Etat dans les domaines des politiques technologiques et de l'environnement. La définition de situations de défaillances du marché, dans lesquelles l'allocation des ressources n'est pas PARETO optimale, présente l'avantage de définir un cadre précis d'intervention pour la puissance publique afin de restaurer l'efficacité statique. Par contre, la détermination des instruments à utiliser pour corriger de manière optimale les échecs du marché est beaucoup moins claire et les risques de *policy failure* sont importants. En effet, cette approche impose au décideur public de collecter un maximum d'informations afin de limiter son exposition aux biais créés par les situations de sélection adverse et/ou d'aléa moral.

Lorsque l'on se déplace dans un cadre dynamique comme celui proposé par la théorie évolutionniste, les défaillances de marché deviennent plus difficiles à repérer et ne peuvent plus servir de seule justification pour une intervention des politiques publiques. Comment alors appréhender le rôle de l'Etat dans l'approche évolutionniste ?

Lorsque l'Etat cesse de se référer à un optimum de PARETO, la difficulté est de définir d'autres critères pour établir et évaluer ses politiques. Dans la théorie évolutionniste le marché est défaillant lorsqu'il ne permet pas de suivre la trajectoire socialement souhaitée (LYPSEY *et al.* [1998], MOREAU [2004]). La notion de *market failure* conserve donc toute sa pertinence dans un cadre dynamique. Pour NELSON et WINTER [1982] l'abandon de la référence à l'équilibre et à l'optimum conduit à réfléchir en termes de gestion et d'adaptation aux changements économiques. L'Etat doit alors se contenter d'objectifs plus modestes comme l'identification des problèmes et la recherche des améliorations possibles. Pour GERYBADZE [1992] il est nécessaire de définir un mode de résolution de problèmes multiples permettant d'évaluer, dès le départ et aux moments clés, si certaines conditions minimales pour un succès de l'intervention publique sont remplies, si les acteurs concernés (firmes) sont susceptibles de se comporter de la manière attendue et s'il est possible d'éviter un risque d'échec de cette intervention. L'approche évolutionniste peut donc contribuer à développer des recommandations identifiant les domaines dans lesquels la probabilité d'une intervention utile est importante (LYPSEY *et al*. [1998]).

Toutefois, si le décideur public évolutionniste ne suit pas un comportement optimisateur peut-il encore être considéré comme bienveillant, c'est-à-dire soucieux du bien-être collectif intertemporel et du respect des préférences individuelles ? La théorie

néoclassique peut parfois mettre en doute cette hypothèse, puisque l'objectif des pouvoirs publics peut éventuellement diverger de la maximisation du surplus collectif intertemporel (phénomènes de bureaucratie, de lobbying, de capture du régulateur…). Même si les écrits sont peu nombreux sur le sujet, les auteurs évolutionnistes conservent l'hypothèse forte de la bienveillance des pouvoirs publics (LYPSEY *et al*. [1998], LESOURNE *et al.* [2002], MOREAU [2004]). Nous supposerons donc que, l'Etat, composé d'institutions en concurrence, intervient toujours avec une « philosophie parétienne » en ayant comme objectif l'augmentation du bien-être collectif intertemporel[290].

L'interprétation de cet argument en matière de politique technologique est que si les évolutionnistes considèrent qu'il n'existe pas de taux optimal unique de R&D, d'innovation ou de changement technique, ils considèrent qu'il est toujours socialement souhaitable d'accélérer le taux de changement technique. Par rapport à une situation de non intervention (« laissez-faire »), le rendement potentiel d'une réaffectation des ressources en vue d'accroître la R&D dépasse toute perte potentielle qui pourrait découler d'une mauvaise affectation de ces ressources dans un cadre statique (LYPSEY *et al*. [1998]).

3.1.2. Les politiques technologiques et industrielles dans le cadre évolutionniste

Dans l'approche évolutionniste, le modèle interactif de l'innovation et les nouvelles hypothèses faites sur les externalités de connaissances vont entraîner une reconsidération des principes d'intervention des politiques technologiques et industrielles.

3.1.2.1. Le modèle interactif de l'innovation et la politique technologique

Le modèle linéaire de l'innovation supposait non seulement une progression partant de la science fondamentale à la science appliquée, au développement et à la commercialisation, mais également une différenciation dans l'utilisation des instruments

[290] Pour MOREAU [2004, p. 18-19] *« (…) the State is governed by public interest, this public interest cannot be associated to neoclassical welfare unless we refer to PARETO-superiority rather than to PARETO-optimality. In an evolutionary perspective, public interest is a social agreement (possibly temporary) on values and contradictory interests among economic agents. »*

de soutien à l'innovation : les mesures *ex ante* comme les subventions impliquent un soutien financier direct et important de l'Etat aux premières étapes de l'innovation, alors que les mesures *ex post* comme le brevet demandent de définir une réglementation cherchant l'équilibre entre des effets incitatifs contradictoires (protection/diffusion).

Le modèle interactif adopté dans le cadre évolutionniste met l'accent sur la nature cumulative et systémique du processus d'innovation. Selon ce modèle, la recherche fondamentale possède un potentiel commercial, et selon les caractéristiques des connaissances, il y a pour les firmes une certaine incitation naturelle à s'engager dans des activités de R&D. Les firmes sont plus incitées à mener elles-mêmes des travaux de recherche fondamentale et à s'engager dans des alliances avec d'autres firmes ou différentes institutions à but non lucratif comme les universités ou les laboratoires de recherche publics afin de partager et de créer de nouvelles connaissances. Ainsi le modèle interactif postule implicitement que le soutien à la recherche fondamentale peut provenir de plusieurs autres secteurs que le secteur public. Le fait que l'ensemble de la recherche fondamentale relève de la seule responsabilité de l'Etat n'est plus une règle absolue, même si elle reste celle de principe. Une des tâches du décideur public évolutionniste est donc de concevoir des modalités institutionnelles qui permettent un soutien commercial et l'application des travaux de recherche fondamentale sans compromettre la sélection des projets ou l'évaluation des travaux de recherche par les pairs (METCALFE [1994]).

En outre, le modèle interactif suppose que la recherche appliquée et le développement peuvent engendrer, parmi les retombées positives, des possibilités dans des secteurs de l'économie techniquement éloignés les uns des autres, tout en offrant aux acteurs engagés dans la R&D de nouvelles capacités. Les technologies génériques peuvent découler autant des travaux de recherche fondamentale que des travaux de recherche appliquée. Ainsi, dans ce modèle les externalités de R&D ont potentiellement une portée plus vaste que dans le modèle linéaire. L'argument en faveur d'un soutien public direct à la R&D apparaît alors d'une manière générale plus convaincant.

3.1.2.2. Une reconsidération des principes d'intervention des politiques technologiques et industrielles

3.1.2.2.1. Les nouvelles hypothèses sur les externalités de connaissance

La nouvelle optique sur les externalités de connaissances adoptée par le courant évolutionniste remet en question deux hypothèses centrales de l'approche standard : la première concerne la définition du savoir comme de l'information ; la seconde concerne le fait que les seules interactions entre les agents prennent place sur des marchés concurrentiels et où les seules informations qui circulent et déterminent les transactions sont les prix. La reformulation de la première hypothèse (la considération de connaissances tacites et codifiées et non plus de simples informations) implique que le rendement social n'est pas aussi élevé qu'il le serait si les coûts de diffusion des résultats de la recherche et de l'innovation étaient négligeables. La reformulation de la seconde hypothèse (la considération de formes contractuelles variées et non plus uniquement des relations marchandes concurrentielles) implique que le rendement privé pourra dépasser celui prévu par la théorie standard de l'équilibre concurrentiel. Dans cette nouvelle approche, la place pour l'intervention publique peut apparaître réduite puisque l'allocation décentralisée des ressources n'est plus aussi éloignée de l'efficience sociale. L'approche évolutionniste de l'innovation technologique, se voulant plus riche et plus réaliste, ne simplifie donc pas la formulation de mesures de politique technologique. Cette dernière doit en effet se donner deux objectifs qui peuvent être conflictuels : l'élévation à la fois du rendement privé et du rendement social de la recherche et de l'innovation. Le but de l'intervention publique n'est plus seulement de gérer des externalités qui seraient données, mais il est également de les promouvoir[291]. COHENDET *et al.* [1999, p. 373] soulignent alors que *« dans un contexte essentiellement dynamique, le rôle qui semble naturellement dévolu à la puissance publique est de créer les conditions de rendement croissant et de renforcement mutuel des projets et activités d'innovation, en se focalisant sur l'organisation du système de distribution de connaissances et en développant autant que faire ce peut son 'pouvoir distributif'. »*

A la différence de l'approche uniquement informationnelle de la technologie qui renvoie à un univers purement concurrentiel dans lequel les firmes luttent contre les

[291] Les externalités deviennent ainsi endogènes.

fuites d'informations (*spillovers*), l'organisation d'un système «riche » en externalités positives se réfère à un univers où la confiance entre les acteurs est accrue et où le degrés d'ouverture et de révélation des connaissances est important (PENIN [2003]). Les firmes sont donc non seulement reliées par des relations concurrentielles, mais également par des relations de *« coopétition »*[292] (NALEBUFF et BRANDENBURGER [1996]). Pour que cette vision apparaisse réaliste et pertinente les interventions publiques doivent aider à satisfaire certaines conditions institutionnelles.

3.1.2.2.2. Les conséquences sur les types de difficultés à aborder par les politiques publiques

Les hypothèses précédentes impliquent que la personne publique doit faire face d'abord à deux types de problèmes généraux de coordination, (i) *ex-post* et (ii) *ex-ante*, dans la gestion des externalités de connaissances (COHENDET *et al.* [1992, 1999], MASSARD [1997]). Mais les interventions publiques doivent également gérer (iii) les problèmes liés aux externalités dynamiques et les questions d'équité qu'elles posent (NELSON et WINTER [1982]).

(i) *Ex ante*, l'exploitation des externalités dans la production des connaissances dans le cadre d'un projet d'innovation sera d'autant plus profitable d'un point de vue social que le projet est incertain. L'intervention publique doit prendre une nature catalytique afin de stimuler les partenariats et les réseaux technologiques inter-firmes pour générer des échanges croisés entre les disciplines, les technologies et les programmes de R&D. Elle doit s'efforcer d'instaurer des compromis institutionnels pour favoriser l'émergence de dynamiques d'interactions collectives, sources d'externalités positives. L'intervention publique doit éviter les écueils dans la gestion des externalités de recherche négatives et positives. Les externalités négatives sont liées à la substituabilité des innovations entre elles, alors que les externalités positives concernent la complémentarité des connaissances qu'elles incorporent. Dans le premier cas, les efforts de R&D des firmes en concurrence conduisent à des produits substituables tels que le marché n'en sélectionnera qu'un. Il y a duplication et la connaissance incorporée dans les produits non sélectionnés n'a pas de valeur

[292] La *coopétition*, néologisme formé par les notions de coopération et de compétition désignent des firmes concurrentes qui mettent en place des dispositifs de coopération temporaires.

économique. Dans le second cas, les innovations ne se concurrencent pas sur le marché et les connaissances qu'elles incorporent se renforcent mutuellement. Dans ce cas, une connaissance s'élabore à partir d'une autre, sans la remplacer, et augmente en même temps sa valeur sociale. L'enchevêtrement des deux types d'externalités et des effets sur la concurrence doit conduire le *policy maker* à élaborer des compromis institutionnels pour favoriser à la fois la production et l'exploitation des externalités positives à travers la coordination des apprentissages et pour atténuer les effets des externalités négatives. Dans une perspective dynamique, l'objectif de la politique industrielle n'est pas seulement d'affecter des ressources génériques ; c'est aussi d'aider au développement des compétences et des savoirs, c'est-à-dire des ressources spécifiques. Les investissements des firmes doivent donc déboucher sur la constitution d'actifs spécifiques (DE BANDT (1995]). Les programmes publics de R&D restent des instruments privilégiés pour inciter les initiatives privées (*via* le choix des contractants, le suivi de la formation des externalités positives et des processus d'apprentissages collectifs). A côté des activités de R&D proprement dites, les politiques publiques doivent également mener des actions d'appui aux entreprises en prenant en charge, en raison des externalités positives, des activités que les firmes n'ont pas suffisamment intérêt à développer elles-mêmes. Ces interventions, très sélectives, visent à apporter des services spécifiques.

(ii) *Ex post*, une fois l'innovation réalisée dans une entité particulière, il est nécessaire d'organiser l'accès à l'information et à la distribution des nouvelles connaissances. Le problème est de transformer un bien privé en un bien (semi-)public, sans diminuer les incitations des initiatives privées, c'est-à-dire tout en accordant des garanties de protection. Les externalités positives dans l'utilisation des connaissances nouvelles seront d'autant plus élevées que la probabilité de trouver des complémentarités entre ces connaissances et celles déjà employées est élevée. Ces deux problèmes de coordination dans la production et la diffusion des connaissances demandent de définir des politiques publiques relativement différentes. Il s'agit d'une part d'améliorer à nouveau la division du travail et la constitution de réseaux d'activités de R&D et, d'autre part, d'augmenter la probabilité de trouver des complémentarités dynamiques entre les projets innovants déjà réalisés. Ainsi, le système de droits de propriété intellectuelle, en particulier les brevets, doit être suffisamment souple et modulable pour faciliter aux firmes l'arbitrage entre l'assurance des droits de propriété

des connaissances nouvelles qu'elles produisent et l'obtention de droits d'accès aux connaissances complémentaires des autres firmes.

(iii) NELSON et WINTER [1982] soulèvent la question des externalités dynamiques, c'est-à-dire des externalités de « long terme », dans un cadre évolutionniste[293]. Cette question repose le problème de l'écart entre le rendement privé et social, non plus seulement à propos des investissements en R&D mais plus généralement en matière d'investissements immatériels liés à l'innovation. Cet écart augmente quand l'horizon temporel s'éloigne et soulève des problèmes d'équité et de relations entre les générations. Il y a externalité car les générations futures bénéficieront en grande partie et gratuitement des inventions actuelles, comme les générations actuelles bénéficient aujourd'hui de celles des générations passées. Il y a un problème d'équité car les générations futures peuvent exiger de la génération actuelle des connaissances qu'elles pourront mettre en œuvre et développer, comme les générations actuelles peuvent le faire à partir des connaissances héritées des générations passées. Ici se pose alors la question des recherches scientifiques ayant un horizon d'aboutissement et d'application lointain et incertain. Le marché n'est pas une institution destinée à résoudre naturellement ce type de question[294]. C'est à la puissance publique de poursuivre ce type d'objectif et d'assurer une redistribution intergénérationnelle des ressources en matière de recherche (GUESNERIE et HAUTCOEUR [2003], GODARD [2004]).

Selon COHENDET *et al.* [1999] l'adoption d'une démarche de type « développement durable » comme en matière d'environnement peut permettre de traiter les problèmes d'allocation de ressources auxquels la puissance publique est

---

[293] Selon NELSON et WINTER ([1982, p. 368]) *« dynamic externalities are no longer susceptible to definitive once and for all categorization and are more intimately related to a particular historical and institutional contexts. To a large extent, the problems involved are aspects of economic change. The processes of change are continually tossing up new 'externalities' that must be dealt with in some manner or other. In a regime in which technical advance is occurring and organizational structure is evolving in response to changing patterns of demand and supply, new non-market interactions that are not contained adequately by prevailing laws and policies are almost certain to appear, and old ones may disappear. Long-lasting chemical insecticides were not a problem eighty years ago. (…) The canonical 'externality' problem of evolutionary theory is the generation by new technologies of benefits and costs that old institutional structures ignore."*

[294] Les agents privés, incités par le bénéfice qu'ils peuvent tirer, contribuent à la production d'externalités de long terme, mais leur contribution n'est qu'accessoire.

confrontée. Elle peut contribuer à éviter des tentations d'opportunisme dans les décisions, puisque les générations anciennes ne peuvent pas revenir sur leurs legs et que les générations futures ne peuvent pas protester contre notre refus éventuel de contribuer à l'amélioration de leur bien-être. Une démarche de développement durable peut surtout éviter de trop s'appuyer sur des calculs de coûts d'opportunité, lesquels même s'ils sont utiles, montrent souvent que d'autres types d'investissements publics (éducation, habitat…) pourraient avoir une rentabilité sociale plus forte[295]. Ces éléments apportent ainsi un fondement supplémentaire pour développer une politique technologique dynamique volontaire dans le cadre d'une économie fondée sur les connaissances.

3.2. L'intervention publique pour sélectionner une technologie environnementale

Dans un premier point nous aborderons les conditions générales de développement d'une technologie environnementale dans l'analyse évolutionniste. Dans un deuxième point nous aborderons cette question à travers les modèles de compétition technologique dans le but de tirer des enseignements quant à l'intervention de l'Etat.

3.2.1. Les conditions de développement d'une technologie environnementale dans l'optique évolutionniste

Nous rappellerons dans un premier temps les difficultés de l'analyse économique standard pour analyser l'émergence des innovations technologiques environnementales radicales. Nous essaierons alors de formuler cette question dans le cadre évolutionniste.

[295] Le principe des analyses coûts-avantages est de donner des valeurs présentes à des bénéfices lointains. Ces valeurs dépendent directement du taux d'actualisation et seront toujours faibles même pour un taux d'actualisation peu élevé. Mais concernant les recherches scientifiques, pour lesquelles les coûts immédiats peuvent être considérables et les bénéfices directs et indirects de long terme peuvent être très importants.

3.2.1.1. Un rappel des difficultés rencontrées par l'analyse standard pour analyser l'émergence d'innovations environnementales radicales

La description de l'évolution des régimes énergétiques dans la longue période que nous avons effectuée dans le Chapitre 1 nous a permis de caractériser le verrouillage qu'exercent les sources d'énergie fossiles sur les systèmes énergétiques des pays industrialisés (*« carbon lock-in »*) et à un niveau plus large, celui du complexe *« techno-institutionnel*[296] *»* (UNRUH [2000]). Les niveaux de pollution associés aux formes de production et de consommation actuelles et les menaces qu'ils représentent sur l'environnement ont contribué à l'avènement d'une « conscience environnementale » mondiale, à travers le concept de développement durable. L'innovation technologique peut être considérée comme une des solutions pour limiter les menaces environnementales à travers trois modalités. En premier lieu, l'augmentation de l'efficience des processus de production contribue à économiser des matières premières et à limiter les rejets de polluants. L'innovation peut aussi autoriser des substitutions soit pour préserver le stock de ressources, soit pour éviter l'utilisation de substances polluantes. Enfin, le changement technologique peut permettre le développement de nouvelles formes de production et de consommation.

Dans le domaine de la prospective énergétique les approches statiques de la technologie ont souvent conduit à travailler à partir de projections sans intégrer la possibilité des changements institutionnels et technologiques fondamentaux (FREEMAN [1996]). Dans ce cadre de réflexion statique, les principaux pays industrialisés n'ont essentiellement mené que des politiques d'adaptation en aval, se traduisant par des réglementations induisant la création ou imposant l'adoption d'innovations incrémentales en bout de chaîne[297]. Ces mesures, reposant sur une internalisation, le plus souvent incomplète, des coûts externes de la pollution ont pu montrer une certaine efficacité pour des atteintes environnementales classiques. Cependant, perçues par les firmes comme une contrainte additionnelle qui sont alors poussées à adopter des stratégies défensives, ces mesures ne conduisent qu'à des adaptations *ex post* de la part

[296] Le *« complexe techno-institutionnel »* correspond au cadre général constitué par les interrelations entre les technologies, les organisations (les firmes) et les institutions publiques et privées (UNRUH [2000]).

[297] Cf. Chapitre 2.

des firmes et n'engendrent pas de transformation radicale (en amont) et durable du système technologique (FAUCHEUX et NICOLAÏ [1998a, 1998b]).

3.2.1.2. La problématique environnementale dans l'analyse évolutionniste

3.2.1.2.1. L'enjeu : le développement d'un paradigme et de trajectoires technologiques « verts »

L'analyse évolutionniste du changement technique aborde depuis une période relativement récente la problématique de l'environnement et du développement durable en y appliquant ses concepts fondamentaux. A l'image de l'ensemble du courant évolutionniste, les travaux s'intéressant aux problématiques de l'environnement et du développement durable ne s'inscrivent pas dans une seule et même approche. Certains d'entre eux relèvent de l'application directe des concepts évolutionnistes fondamentaux du changement technique aux problématiques environnementales (KEMP et SOETE [1992], BENHAIM et SCHEMRI [1995], MOREAU [2000, 2004], ARENTSEN *et al.* [2001]), d'autres se situent dans une perspective « co-évolutioniste » utilisant une certaine complémentarité entre les concepts évolutionnistes et ceux de la sociologie du changement technique (KEMP *et al.* [1997, 1998], KEMP [2000]), enfin certains travaux théoriques, menant une réflexion plus générale, établissent des liens entre le courant évolutionniste et l'économie écologique (RING [1997], RAMMEL et VAN DEN BERGH [2003]). Notre analyse se situe dans le premier groupe de travaux.

La traduction dans le cadre de l'analyse évolutionniste de la problématique générale concernant la relation entre la technologie et l'environnement est représentée par le développement d'un paradigme et de trajectoires technologiques « verts » (BENHAIM et SCHEMRI [1995]). Ces notions inscrivent le développement technologique dans un contexte historique, économique, social et institutionnel. Pour notre sujet, cela nous conduit à nous interroger sur les conditions théoriques de l'émergence d'un nouveau paradigme et de nouvelles trajectoires environnementales comme celles des technologies des énergies renouvelables pour la production d'électricité, ouvrant ainsi une voie de sortie du *« carbon lock-in »*.

3.2.1.2.2. L'analyse évolutionniste et l'hypothèse de PORTER

L'objectif des politiques publiques est à la fois d'organiser un environnement institutionnel et de poser des contraintes incitatives[298] pour conduire les firmes à innover radicalement. L'analyse évolutionniste caractérise les firmes par leurs routines organisationnelles et leurs compétences technologiques issues des apprentissages passés. Les firmes exploitent des rendements croissants en suivant des trajectoires et les technologies qu'elles pourront maîtriser demain vont dépendre en partie de la trajectoire suivie dans le passé. L'activité d'innovation implique une part d'irréversibilité et des mesures de politiques publiques contraignantes incitant à s'orienter vers un nouveau paradigme technologique vont nécessairement entraîner des coûts pour les firmes, compte tenu de la barrière de connaissances à franchir. C'est ce qui explique que les technologies environnementales ne progressent surtout que de manière incrémentale, puisqu'une réglementation environnementale, en ajoutant des contraintes supplémentaires aux firmes, augmente leurs coûts de production et peut affecter en conséquence leur position concurrentielle.

Ce lien *a priori* négatif entre la réglementation environnementale et la productivité des firmes a été remis en question par PORTER et VAN DER LINDE [1995], ouvrant en même temps un débat. Selon « l'hypothèse de PORTER » une réglementation environnementale stricte, mais correctement mise en œuvre, peut engendrer à la fois des bénéfices sociaux (une réduction des dommages environnementaux) et des bénéfices privés pour les firmes privées réglementées qui vont être incitées à innover ; c'est-à-dire que le résultat correspond à une situation doublement gagnante (*« win win »*). Selon cette hypothèse, les bénéfices privés dépassent les coûts de conformité supportés par les pollueurs. Pour les auteurs qui s'appuient de nombreux exemples empiriques, si l'on se place dans une perspective dynamique, les coûts supplémentaires vont pousser les firmes à une révision de leur processus de production et donc à innover. Ces efforts d'innovation peuvent aboutir à une réduction des coûts de pollution mais aussi à une augmentation de la productivité de la firme[299]. La réglementation environnementale les

[298] Les instruments réglementaires (les normes, les standards) utilisés classiquement par les politiques environnementales peuvent servir ici à envoyer un premier signal contraignant l'activité des firmes par rapport à un objectif environnemental.

[299] L'accroissement de la productivité provient soit d'une amélioration du produit (ce qui augmente la valeur du produit), soit d'une meilleure utilisation des *inputs* (ce qui réduit les coûts de production).

pousse à corriger des inefficacités et certaines inerties organisationnelles ce qui leur permet d'être plus à même d'innover. Ainsi PORTER et VAN DER LINDE concluent qu'une réglementation stricte peut augmenter le profit des pollueurs et que ce lien positif est plutôt la norme que l'exception. Cela signifie que les firmes n'exploitent pas systématiquement toutes les opportunités de profits qui s'offrent à elles. En effet, les auteurs supposent explicitement que les firmes ne font pas toujours des choix optimaux[300].

Même si PORTER et VAN DER LINDE n'y font aucune référence, cette hypothèse peut être mise en rapport avec l'analyse évolutionniste. En particulier, on peut considérer que NELSON et WINTER [1982] avaient en quelque sorte anticipé une connexion de leur analyse avec celle de PORTER et VAN DER LINDE [1995] lorsqu'ils affirmaient au sujet des externalités dynamiques que *« In a regime in which technical advance is occurring and organizational structure is evolving in response to changing patterns of demand and supply, new non-market interactions that are not contained adequately by prevailing laws and policies are almost certain to appear, and old ones may disappear. (…) The canonical 'externality' problem of evolutionary theory is the generation by new technologies of benefits and costs that old institutional structures ignore. »* [*ibid.*, p. 368]. Dans l'optique évolutionniste, les firmes, en suivant des routines héritées du passé, voient, pour la plupart d'entre elles, l'ensemble de leurs activités verrouillées sur des trajectoires « polluantes » et n'ont une perception des problèmes environnementaux qu'à travers les coûts que pourrait engendrer le respect d'une éventuelle réglementation. Dans ce contexte, seules les firmes qui ont acquis certaines compétences pour améliorer la qualité environnementale de leur activité pourront répondre à une contrainte réglementaire en innovant.

---

[300] *« It is sometimes argued that companies must, by the very notion of profit seeking, be pursuing all profitable innovation. (…) In this view, if complying with environmental regulation can be profitable, in the sense that a company can more than offset the cost of compliance, then why is such regulation necessary?. The possibility that regulation may act as a spur to innovation arises because the world does not fit the Panglossian belief that firms always make optimal choices.(…) The actual process of dynamic competition is characterized changing technological opportunities coupled with highly incomplete information, organizational inertia and control problems reflecting the difficulty of aligning individual, group and corporate incentives. Companies have numerous avenues for technological improvement, and limited attention.* (PORTER et VAN DER LINDE [1995, pp. 998-99]).

Le fait que l'hypothèse de PORTER puisse difficilement se concevoir sans s'écarter de l'hypothèse néoclassique de maximisation des profits a suscité un vif débat parmi les économistes (PALMER *et al.* [1995]). Sans entrer dans les développements de celui-ci, on peut souligner que dans un premier temps, du côté de la littérature standard, de nombreuses études empiriques se sont attachées à invalider l'hypothèse *« win win »*, puis plus récemment des travaux théoriques ont cherché à la justifier sans pour autant renoncer à l'hypothèse de rationalité des agents[301]. Etonnamment, les travaux évolutionnistes reprenant à leur compte l'hypothèse de PORTER demeurent rares et n'ont pas encore fait l'objet de développements théoriques et/ou empiriques significatifs (GOLDSTEIN [2002]).

3.2.1.2.3. Le rôle de l'environnement de sélection

Dans l'analyse évolutionniste, la réussite d'une transformation technologique dépend de son degré d'acceptabilité au sein de l'environnement de sélection qui permet de lier les réalités technologiques aux préoccupations économiques et sociales. L'environnement va sélectionner les firmes capables de s'adapter et d'apprendre. L'environnement de sélection est composé de l'environnement construit, dépendant des décisions passées, de l'environnement institutionnel, comprenant le marché (critères de demande potentielle, de coûts, de profitabilité) et des éléments tels que la structure politique ou les habitudes sociales de production et de consommation, et désormais de l'environnement naturel (DOSI [1988b], BENHAIM et SCHEMRI [1995]). Les ressources naturelles n'exercent pas une influence réellement sélective sur les choix technologiques. L'exploitation d'une nouvelle ressource représente davantage l'aboutissement d'un processus d'incitation à l'innovation généré par la raréfaction croissante de l'ancienne ressource à laquelle elle vient se substituer. La fonction de sélection de l'environnement intervient à l'autre extrémité du processus productif. Si l'on prend en compte ces aspects, alors les choix technologiques deviennent limités. Le risque de dégradation de l'environnement interdit le développement de certaines technologies ou l'exploitation de certaines ressources naturelles. Cependant, compte tenu du manque de recul, il n'existe pas encore d'exemple permettant d'illustrer

[301] Voir AMBEC et BARLA [2001] pour une revue de littérature sur ces développements théoriques récents dans l'analyse standard.

réellement le rôle sélectif de l'environnement, dans la mesure où celui-ci n'a commencé à être considéré comme un élément de contraintes dans les décisions que récemment[302]. Evidemment, l'action seule de l'environnement de sélection pour faire émerger des nouvelles technologies ne peut suffire. L'environnement de sélection n'étant pas neutre vis-à-vis des politiques publiques, plusieurs questions se posent : quel rôle peut jouer l'intervention publique dans la naissance, la sélection et le rythme de diffusion de paradigmes et de trajectoires technologiques environnementales comme celles des énergies renouvelables ? Peut-on maintenir une technologie susceptible de permettre de nouvelles avancées ? Une standardisation par la sélection d'un *dominant design* est-elle souhaitable ? L'approche évolutionniste traite ces questions dans les termes de la problématique de la compétition technologique.

3.2.2. Compétition technologique et rôle de l'intervention publique en faveur d'une technologie environnementale

De façon stylisée, le rôle de l'intervention publique dans l'introduction et le déploiement d'une technologie environnementale peuvent s'appréhender, à partir d'une situation actuelle de verrouillage technologique (« *carbon lock-in* »), comme des situations de compétitions technologiques, à la fois entre la technologie « polluante » en place et entre une nouvelle technologie environnementale, mais aussi entre les différentes options des technologies environnementales susceptibles de se développer. Nous proposons dans un premier temps d'étudier le modèle de compétition technologique d'ARTHUR [1989] pour expliquer les situations de *lock-in* sur un standard éventuellement sous-optimal. Nous aborderons ensuite le modèle de LAFFOND *et al.* [2001] afin d'analyser les interactions entre la compétition technologique, l'apprentissage et les interventions publiques pour soutenir une technologie environnementale.

[302] On pourrait seulement évoquer pour l'heure, selon les pays, le non développement ou l'arrêt de la filière nucléaire en raison des risques majeurs liés à cette technologie.

3.2.2.1. Compétition technologique et lock-in *sur un standard sous-optimal*

Dans la théorie néoclassique des rendements factoriels décroissants et des rendements d'échelle constants sont spécifiés afin d'assurer l'unité, la stabilité et la prédictabilité de l'équilibre économique obtenu comme solution à un problème d'optimisation. De cette manière il est difficile d'expliquer les phénomènes de *lock-in* technologiques. Du côté de la théorie évolutionniste l'intégration de la dynamique du changement technologique apporte un nouvel éclairage sur les processus de diffusion technologique. Les modèles stochastiques à rétroactions positives permettent d'étudier des processus dynamiques endogènes de *création-diffusion-adoption* des innovations technologiques. Dans ce type de modèle, les rendements croissants d'adoption (RCA, rendements d'échelle et d'adoption) micro-économiques peuvent conduire au niveau macro-économique à l'enfermement d'un standard technologique sur une option éventuellement sous-optimale du fait des irréversibilités créées pendant le processus de sélection. Les RCA peuvent être interprétés comme le résultat des effets d'apprentissage qui endogénéisent le changement technique et conduisent à des phénomènes d'irréversibilité et de dépendance du sentier

3.2.2.1.1. Le modèle de compétition technologique d'ARTHUR [1988, 1989]

Nous nous appuyons ici sur les deux contributions séminales d'ARTHUR [1988, 1989] concernant les modèles de compétition technologique. ARTHUR a fondé sa conception de la compétition technologique en partant d'une intuition que l'on peut formuler simplement : *« on ne choisit pas une technologie parce qu'elle est plus efficace, mais c'est parce qu'on la choisit qu'elle devient plus efficace*[303] *»*. A partir de là, dans un secteur technologique donné, la distribution première des choix individuels (l'état initial du marché) est à l'origine de rétroactions positives qui déterminent, non pas le prochain choix, mais la probabilité qu'une technique choisie au cours de la période t_0 le soit à nouveau à la période t_1. L'action d'adopter représente à la fois le moteur de la diffusion et de la sélection technologiques : à un certain moment une

[303] *« 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], p. 590).

technologie développe une «force d'attraction» telle, que les agents devant effectuer leur choix vont se rallier à la tendance majoritaire sur le marché, parfois même en allant à contre courant de leurs préférences individuelles.

Les sources des rendements croissants d'adoption

L'analyse des sources des RCA dans un secteur à forte intensité technologique comme celui de l'énergie, fournit des concepts méthodologiques pour expliquer comment ceux-ci peuvent éventuellement conduire à une situation de verrouillage technologique, situation sous-optimale, non pas du point de vue de l'efficacité allocative[304], mais du point de vue de l'efficacité technique dans ce sens que la technologie dominante n'est pas obligatoirement la plus efficiente. ARTHUR [1989] propose une classification de cinq sources de RCA qui viennent agir tant du côté de la demande que du côté de l'offre :

1. *L'apprentissage par l'usage* : la productivité est une fonction de l'expérience cumulée dans la production, les effets d'apprentissage dans le développement d'une trajectoire technologique engendrant des économies d'échelle (*« learning by doing »*, ARROW [1962b]). Plus une technologie sera adoptée, plus les effets d'expérience joueront en faveur de sa diffusion et de son amélioration (*« learning by using »*, ROSENBERG [1982]).

2. *Les économies d'échelle dans la production* : compte tenu des coûts fixes liés à l'entrée dans une branche ou aux indivisibilités dans la production, la productivité est fonction de la taille de la production.

3. *Les externalités de réseaux* : en tant que sources de RCA, les externalités de réseau peuvent résulter de la dimension géographique ou physique d'un réseau, du réseau de distribution d'un produit ou d'un service ou d'un effet de réseau découlant de la compatibilité de différents matériels entre eux (FARELL et SALONER [1986]). L'augmentation du nombre d'utilisateurs d'une technologie engendre des effets de réseaux directs, liés aux effets de club, qui apparaissent comme des externalités de demande, c'est-à-dire que chaque utilisateur voit sa satisfaction augmenter avec le nombre d'utilisateurs du même bien ou d'un bien qui lui est compatible (KATZ et

[304] En effet, une fois un standard technologique établi et très largement diffusé, il serait encore plus coûteux socialement d'imposer l'adoption d'une autre norme.

SHAPIRO [1985]). Les effets de réseaux peuvent également être indirects, sans effet de club (CHOU et SHY [1990]). Le nombre d'utilisateurs vient augmenter et améliorer le nombre de services liés au réseau. Chaque consommateur va bénéficier d'externalités d'offre. Ces dernières sont conditionnées par la présence et la taille d'une « base installée » (FARELL et SALONER [1986]). Celle-ci correspond au nombre d'utilisateurs déjà reliés, directement ou indirectement, au réseau. Ainsi un effet «boule de neige », alimenté par les RCA, peut s'enclencher : plus les utilisateurs initiaux seront nombreux, plus la demande augmentera dans la période suivante et plus l'offre pourra être diversifiée.

4. *Les rendements croissants informationnels* : une technologie nouvelle sera d'autant plus connue qu'elle sera utilisée. Lorsque sur un marché plusieurs technologies fournissant des biens substituables sont en compétition, l'aversion au risque des producteurs et des consommateurs va avoir pour effet de renforcer la technologie déjà dominante (*« learning about payoffs »*, COWAN [1990]). L'incertitude liée à la coexistence de technologies différentes conduit le plus souvent les décideurs privés[305] et publics à engager des dépenses de R&D sur la technologie la plus expérimentée afin de réaliser des innovations incrémentales pour la faire encore progresser, au détriment des filières plus jeunes nécessitant des soutiens financiers plus importants.

5. *Les interrelations technologiques* : une nouvelle technologie correspond à l'exploration d'une trajectoire particulière venant s'insérer plus largement dans un paradigme technologique qui en délimite les potentialités (DOSI [1988a]). A ce titre, elle bénéficie des apprentissages qui ont été amorcés sur des trajectoires voisines, plus avancées, issues du même paradigme. Dans sa diffusion, une technologie engendre la mise au point de technologies affluentes et de produits complémentaires, ce qui contribue à structurer une filière industrielle et un environnement technique. Le caractère systémique de la technologie principale vient renforcer d'autant plus son attractivité.

Le modèle d'ARTHUR [1989]

Dans une compétition entre deux technologies connaissant un développement parallèle, le jeu auto-renforçant des RCA va conduire à une altération des conditions de

[305] Les industriels, mais également les porteurs de capitaux.

la concurrence. L'issue de la compétition débouchera sur une situation proche du monopole technologique dans laquelle la technologie qui occupe la première une grande part de marché évince définitivement les autres technologies. Il s'agit de montrer à travers la portée explicative du modèle d'ARTHUR [1989] de quelle manière les RCA peuvent introduire un biais dans l'équilibre du processus de compétition technologique.

ARTHUR a élaboré un cadre analytique applicable aux situations de compétition technologique qui repose sur deux principales propriétés : (i) les choix des agents entre deux technologies sont influencés par la distribution des choix antérieurs ; (ii) des « petits événements externes[306] » peuvent influencer le processus de manière aléatoire. ARTHUR appelle alors un système dynamique qui intègre ces propriétés un «processus d'allocation[307] ».

L'intérêt du modèle d'ARTHUR [1989] est de permettre d'abord la formulation des conditions à partir desquelles une situation de *lock-in* peut apparaître à l'issue d'une compétition entre deux technologies à partir des choix réalisés par deux types d'agents économiques. Plus précisément, comme le souligne FORAY [1989], ce type de modèle, en s'appuyant sur la notion de RCA, aborde la compétition technologique comme un problème de localisation du progrès technique et de comportement d'adoption des utilisateurs potentiels.

Les hypothèses de base du modèle concernent l'utilité que chaque type d'agent va retirer de chaque technologie :

- le choix d'une technologie est toujours possible ;
- les agents ont des comportements hétérogènes, en ce sens qu'ils ont une préférence naturelle pour une des deux technologies ;
- chaque type d'agent considère que l'utilité de chaque technologie est proportionnelle au nombre d'adoptions déjà réalisé de cette technologie.

Soit la fonction de rendement (d'adoption) : $R_I^J = I_J + if(n_J)$

[306] *« Small unknown events »* ou *« chance »* chez ARTHUR [1989], *« historical accidents »* chez DAVID [1985].

[307] Un processus d'allocation correspond à chaque moment de choix, à l'allocation d'une unité effectuée à une des K catégories, avec les probabilités respectives $p1(x), p2(x)...pk(x)$, où le vecteur des probabilités p est une fonction de x, lequel donne la proportion présente des unités dans les K catégories.

avec R_I^J le rendement de la technologie J, pour le prochain agent de type I, compte tenu de sa préférence naturelle I_J et des comportements d'adoption passés $f(n_J)$ corrigés des rendements d'adoption croissants i ($i > 0$).

Soit deux types d'agents *R* et *S* distingués par leurs préférences naturelles respectives pour les technologies *A* et *B*, ces dernières étant mises simultanément sur le marché. Chaque agent nouvel arrivant devant choisir une des deux technologies va, selon l'hypothèse des rendements croissants, voir son choix influencé par les parts de marché acquises par les deux technologies.

Les fonctions de rendement associées à l'utilisation de *A* et de *B*, compte tenu des préférences naturelles des agents *R* et *S* et des niveaux antérieurs d'adoption, peuvent être écrites (ARTHUR [1989]) :

- pour les agents *R* : $P_R^A = R_A + af(n_a)$ et $P_R^B = R_B + af(nB)$
- pour les agents *S* : $P_S^A = S_A + bf(n_A)$ et $P_S^B = S_B + bf(n_B)$

avec $R_A > R_B$, préférence naturelle des agents *R* pour *A*, et $S_B > S_A$, préférence naturelle des agents *S* pour *B*, $a > 0$ et $b > 0$ les rendements d'adoption croissants.

Mathématiquement, il est alors possible de montrer à l'aide d'un modèle de type « urne de POLYA[308] » que lorsque les rendements d'adoption sont croissants, le

---

[308] Mathématiquement le processus est ici celui d'une « urne de POLYA » et d'une « loi 0-1 ». Le principe est le suivant : on place une balle noire et une balle blanche dans une urne de capacité infinie en se fixant comme objectif de la remplir de balles de l'une ou l'autre couleur. A chaque tour on tire une balle au hasard et on rajoute dans l'urne une balle de la même couleur. Ce processus sera dépendant à l'égard du sentier, c'est à dire qu'il présente un caractère stochastique doté d'une certaine forme de mémoire. On peut le représenter à partir d'une séquence de choix binomiaux entre deux événements (*A*, *B*) dont les probabilités d'apparition au $n^{ième}$ tirage sont respectivement P_n et $(1 - P_n)$. Si E_i représente l'événement se produisant au $i^{ème}$ coup sa probabilité d'apparition s'écrit (LIEBOWITZ et MARGOLIS [1995]) :

$$P_{n+1} = F(P_n; E_n, E_{n-1}, E_{n-2}, \ldots, E_1)$$

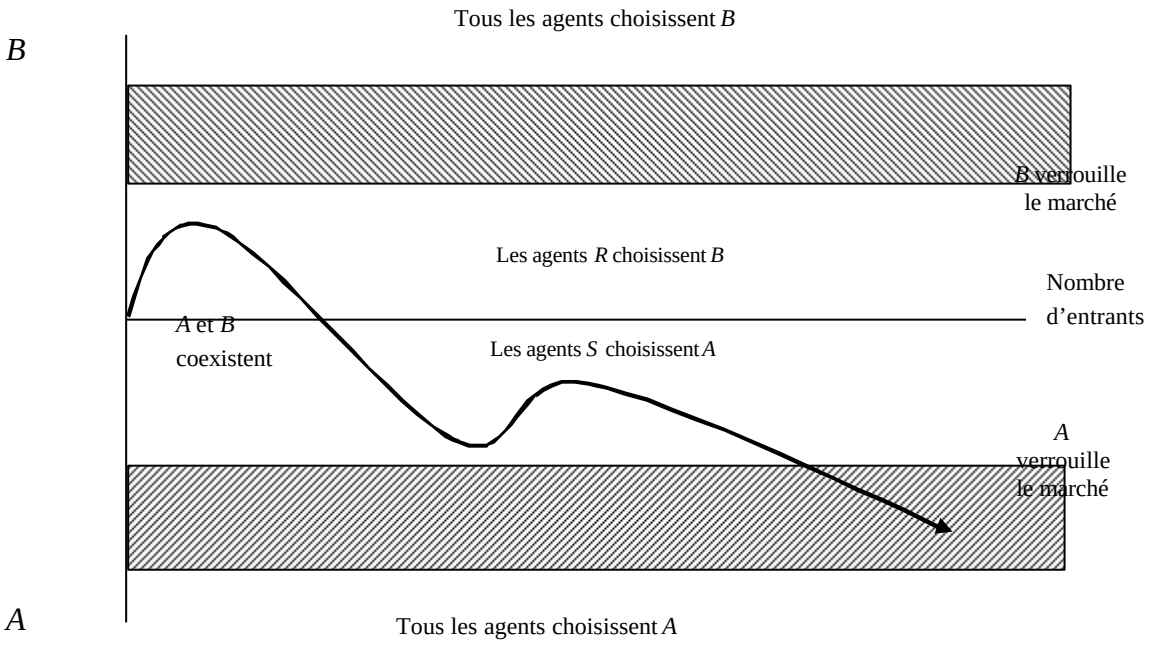
La propriété dite dépendante à l'égard du sentier sera constituée par les *d* derniers tirages quand la fonction *F* de probabilité prendra la forme suivante :

$P_{n+1} = F(P_n; E_n, E_{n-1}, E_{n-2}, ..., E_{n-d})$, si $d = 0$ le processus est purement aléatoire.

processus conduit avec une probabilité de 1 à l'adoption complète d'une des deux technologies. En effet, il est possible de calculer des « barrières » dépendant des caractéristiques des agents, qui, lorsqu'elles sont atteintes conduisent à une situation de *lock-in* (ARTHUR [1989], DOSI *et al.* [1994]). Ce sera le cas par exemple, si suffisamment d'agents ont choisi la technologie *B* pour que les agents de type *R*, malgré leur propension naturelle à opter pour *A*, optent également pour *B*. Le graphique ci-dessous permet de schématiser cette « marche aléatoire ».

Figure 2. Représentation d'une situation de verrouillage technologique

Source : à partir d'Arthur [1989, p.120]



Sur la Figure 2 l'oscillation observée en début de période (sur la gauche du graphique) correspond à une situation (temporaire) pendant laquelle les deux

A chaque période la probabilité que la prochaine balle ajoutée soit noire est égale à la proportion de balles noires déjà dans l'urne. Le problème qui se pose est ensuite de savoir si ces proportions varient indéfiniment entre 0 et 1 ou si elles tendent vers une limite, ce qui déterminerait ainsi l'émergence d'un *lock-in*. DOSI *et al.* [1994] reprennent la démonstration de POLYA vérifiant que la proportion de balles noires tend vers une limite X avec une probabilité 1, X étant une variable aléatoire uniformément distribuée entre 0 et 1. Ils considèrent ensuite le cas général dans lequel la probabilité est une fonction arbitraire des proportions de tous les types de balles et montrent également que le processus converge vers un des points fixes de la correspondance entre les proportions et la probabilité d'adoption.

technologies concurrentes se partagent le marché. Une seule technologie (*A*) emporte ensuite la plus grande part et verrouille le marché, ce qui vient compromettre une diversité technologique. La tendance asymptotique de la courbe est liée à l'ordre d'entrée aléatoire des utilisateurs potentiels d'une technologie caractérisés par leurs préférences naturelles. Selon ARTHUR l'ordre d'arrivée des utilisateurs est régi par des « événements inconnus » ou des « accidents historiques[309] » comme les dénomme DAVID [1985]. Ces événements ont pour conséquence de produire un effet de localisation du progrès technique sur une technologie dès le début de la compétition. Ils peuvent être représentés par des décisions étatiques (une commande publique), par l'expérience technologique, les stratégies des firmes ou par l'apparition simultanée d'un grand nombre d'utilisateurs ayant les mêmes préférences naturelles. Par exemple, COWAN [1990] a étudié le *lock-in* sur le réacteur nucléaire à eau légère au travers des RCA et des effets d'apprentissage dans la compétition durant les années 1950 et 1960 entre les diverses technologies de réacteur nucléaire[310]. COWAN et HULTEN [1996] ont analysé les conditions de verrouillage sur le moteur à essence dans l'émergence de l'industrie automobile aux Etats-Unis au début du XXème en utilisant la notion de « *path-interdependence* ». Ils expliquent que la *path-dependence* d'une technologie est interdépendante des facteurs socio-économiques, techniques et politiques. Selon les auteurs, cette interdépendance s'est illustrée au cous de la phase d'émergence par les facteurs qui ont contribué à la sélection de la solution du moteur à essence (*lock-in*) et ensuite tout au long de l'histoire de l'industrie automobile américaine par les facteurs qui ont contribué ensuite à la remise en cause de ce verrouillage (externalités négatives

[309] « Historiques » dans le sens d'un processus dynamique, non dans le sens de l'histoire.

[310] Durant les années 1950 et 1960 quatre options technologiques se présentaient pour les réacteurs nucléaires : les réacteurs à eau légère, les réacteurs à eau lourde, les réacteurs refroidis au gaz et ceux au sodium liquide. L'industrie nucléaire américaine a très vite adopté uniquement le réacteur à eau légère. Le rôle de la marine américaine dans les premiers contrats de construction de réacteurs, la volonté du *National Security Council*, qui souhaitait acquérir un réacteur à tout prix, le programme européen Euratom et des considérations politiques sont autant de facteurs qui ont joué en faveur du réacteur à eau légère. L'expérience de la construction de tels réacteurs a entraîné des effets d'apprentissage qui, à leur tour ont donné un avantage à cette technologie, et qui ont finalement amorcé le phénomène de *lock-in*. La trajectoire choisie s'est révélée imprévisible et les RCA conjugués à l'inertie structurelle de ce type de production ont renforcé la position dominante de la technologie à eau légère. On ne sait pas si à long terme, il aurait été plus efficient de choisir une autre trajectoire technologique (COWAN [1990]).

de la pollution liée au moteur à essence, accidents… qui contribuent à favoriser la solution du moteur électrique).

Le processus de compétition technologique basée sur les RCA possède quatre grandes propriétés que l'on peut résumer :

- *Le processus est path-dependent* : c'est-à-dire que l'issue finale de la compétition est conditionnée par des *« petits événements »* et par des *« circonstances de hasard »* intervenus dans la *« préhistoire »* de la formation du marché (FORAY [1989]). Les choix des agents sont influencés par le sentier déjà parcouru par la technologie, mais aussi par la représentation future qu'ils se font du sentier, compte tenu de l'importance des externalités positives de demande ;
- *Le résultat de la compétition est non-prédictible* : le système possédant *a priori* plusieurs équilibres stables, il est impossible de prévoir au début du processus, à partir des seules connaissances acquises sur les technologies, celui qui sera atteint ;
- *La possible inefficience de la technologie dominante* : au commencement de la compétition, après une période d'incertitude, les *« petits événements »* ou des *« accidents historiques »* régissant l'ordre d'arrivée des utilisateurs potentiels, cristallisent rapidement le progrès technique sur une technologie avant que ses véritables capacités de développement ne soient réellement connues. Dans un exemple célèbre, DAVID [1985] a montré que le clavier de type QWERTY, pourtant moins efficient que les autres, avait été sélectionné comme standard parce qu'il permettait, en ralentissant la frappe, d'empêcher l'enchevêtrement des marteaux des machines à écrire.
- *Le processus est inflexible* : à partir d'une certaine période, le *lock-in* sur l'une des deux technologies apparaît irréversible, notamment si les améliorations au cours de l'adoption ont touché la matérialité de l'adoption, ses conditions de production et d'utilisation.

3.2.2.1.2. Commentaires et critiques

Plusieurs critiques ont été apportées au modèle de base d'ARTHUR [1989], notamment sur le réalisme économique de certaines hypothèses. Nous présentons les limites apportées et les pistes ouvertes par certains auteurs (FORAY [1989], DAVID [1992], DAVID et FORAY [1994], DOSI *et al.* [1994], DALLE [1995, 1997], BASSANINI et DOSI [1999]).

Le modèle postule que les agents sont hétérogènes au niveau de leurs préférences individuelles et non au niveau de leurs comportements, ce qui confère un caractère stochastique à la phase initiale du processus. Pourtant, les hypothèses (fortes) faites sur les effets de nombre et les RCA conduisent ensuite au niveau macroscopique à la disparition de l'hétérogénéité initiale des agents. Les processus décrits, incertains au début, deviennent alors strictement déterministes et *« (…) neutralisent l'aspect actif du comportement individuel. (…) L'agent perd ses attributs de rationalité active et devient une sorte d'automate réagissant à (et renforçant) la dynamique collective d'un système local, selon un comportement de maximisation. »* (DAVID et FORAY [1994, p.29]). Comme le soulignent les auteurs, cette « neutralisation » du comportement actif est en fait une conséquence du principe d'analyse retenu[311]. Il apparaît nécessaire de prendre en compte des variables comportementales autre que le simple phénomène d'imitation pour expliquer les décisions d'adoption.

DALLE [1995, 1997] a cherché a maintenir une certaine hétérogénéité comportementale des agents en utilisant la formalisation des champs de GIBBS[312] dans laquelle est faite l'hypothèse d'existence de comportements « déviants » entraînant une révision des choix et remettant en cause la stabilité de la structure établie[313]. Les interactions des agents sont localisées dans des réseaux sociaux, des structures dans lesquelles un individu peut dominer son environnement proche. La compétition technologique s'exprime par la confrontation des réseaux dans lesquels les agents ont

[311] C'est-à-dire l'étude des propriétés du système de création-diffusion d'une technologie en « sacrifiant » l'approche de l'agent individuel.

[312] Les champs de GIBBS sont des processus stochastiques sur des réseaux ou encore des champs aléatoires [DALLE [1995]).

[313] On peut en effet douter du fait que les agents connaissent, au moment d'effectuer leur choix, les proportions de la population qui ont déjà sélectionné une des deux technologies. Les asymétries d'informations peuvent être importantes. Soit les produits concernés sont encore peu répandus et les informations les concernant sont rares, soit ils sont mieux connus et les informations disponibles sont contradictoires du fait des comportements opportunistes, chaque utilisateur faisant croire aux autres que sa technologie est la plus répandue. Une hypothèse plus réaliste peut être d'envisager un nombre fini d'agents potentiellement adopteurs d'une technologie, constitués sur la base d'un réseau (physique ou virtuel) et bénéficiant, pour prendre leur décision, de canaux d'information de proximité. L'information des agents devient dans ce cas essentiellement locale. C'est-à-dire que soit chaque agent fonde son choix à partir de l'observation de son propre état et des autres agents situés à l'intérieur dans son entourage, soit l'information technologique, qui peut avoir un caractère plus global, parvient de manière locale aux agents du fait de leur appartenance à un réseau.

temporairement le moyen d'exprimer des choix différents, ce qui laisse apparaître des « niches » dans lesquelles peuvent survivre certaines options.

Cependant, plus généralement c'est l'hypothèse de technologies « non sponsorisées » (*« unsponsored »*), excluant toute manipulation stratégique de la part des firmes qui apparaît la plus contestable. En effet, la compétition technologique à la ARTHUR se développe entre des technologies détachées de toute fonction d'offre, et il est nécessaire de lui adjoindre une analyse du rôle des politiques publiques et des stratégies privées des firmes.

Par ailleurs, on peut souligner que les innovations technologiques ne surviennent jamais simultanément sur un marché vierge, mais plus certainement entrent en compétition avec des technologies matures déjà diffusées. Comme le remarque DALLE ([1995, p. 1087]) un des principaux intérêts de l'approche d'ARTHUR est de *« rendre à l'activité économique une dimension historique »* or celui-ci *« ne se rend pas compte qu'il se réclame toujours, pour le rythme d'arrivée des innovations ou des standards, d'un temps illusoire et originel où tous les processus auraient leur source »*.

Une autre critique importante apportée au modèle d'ARTHUR [1989] vise l'irréversibilité de la situation de *lock-in* établie, représentée théoriquement par un équilibre infiniment stable dans le futur. Cet état apparaît en effet beaucoup plus rigide que les formes d'irréversibilités[314] observables dans la réalité industrielle à travers, par exemple, les durées de vie technologique et économique des équipements. Les circonstances d'un déverrouillage technologique dépendent directement de la nature des RCA qui ont entraîné le processus de sélection. ARTHUR [1988] avance ainsi que si au cours de l'adoption les perfectionnements sont ressortis des apprentissages par l'usage, des économies d'échelle et des interrelations techniques, le *lock-in* est « quasiment » irréversible. Par contre si les économies de réseau ont prévalu, l'utilisation de la technologie dominante est réversible. Le problème qui se pose concerne alors les conditions et les modalités de transition vers un nouveau standard technologique (*« lock-out »*) et/ou le maintien d'une certaine diversité technologique (COWAN et HULTEN [1996], ISLAS [1997]). COWAN et HULTEN [1996] identifient six facteurs qui, à partir d'une situation de verrouillage, peuvent soutenir l'émergence

[314] WILLINGER et ZUSCOVITCH ([1993], p. 8-9) présentent et discutent les différentes formes d'irréversibilités intervenant au cours des trois phases (*« pré-paradigmatique »*, *« d'auto-organisation »*, *« paradigmatique »)* de constitutions de nouvelles technologies génériques.

d'une nouvelle technologie et aboutir à un *lock-out* : (i) une crise dans la technologie dominante ; (ii) de nouvelles mesures de réglementation ; (iii) des progrès permettant une baisse significative des coûts de la technologie innovante ; (iv) une évolution dans les goûts des consommateurs ; (v) la définition d'un marché niche permettant de développer la technologie émergente ; (vi) des résultats scientifiques pointant les limites de la technologie existante et/ou les avantages d'une technologie innovante. Dans le cas d'une compétition entre une technologie polluante en place et une technologie environnementale innovante plusieurs facteurs peuvent jouer en faveur de cette dernière, en particulier les (ii), (iii) et (v).

La situation de verrouillage décrite par ARTHUR montre ainsi que des mécanismes de marché peuvent conduire éventuellement à l'adoption d'une technologie sous-optimale, et ouvre de la sorte la voie pour une intervention de la puissance publique à plusieurs niveaux. En termes de conséquences environnementales, l'adoption d'une technologie sous-optimale peut avoir des implications plus graves qu'une moindre efficience économique. Même si pour FREEMAN [1996], l'environnement finira bien par sélectionner la technologie la plus efficace pour lutter contre l'effet de serre, le temps nécessaire au marché pour corriger des erreurs d'anticipation et/ou le temps nécessaire à un changement de paradigme technologique en cas de *lock-in* peut être si long que des dommages irréversibles auront déjà été occasionnés. Ainsi, dans le cas des technologies environnementales, il est nécessaire d'évaluer les avantages d'une standardisation, comme une meilleure efficacité économique, au regard de ses coûts, comme la création « d'orphelins » (les firmes qui avaient choisies la technologie finalement abandonnée) ou la perte de variété technologique (COWAN [1991]).

3.2.2.2. Les difficultés de la politique technologique en présence de RCA

Dans la représentation théorique évolutionniste, les caractéristiques du changement technique et du processus de compétition technologique que nous venons de mettre en évidence vont contraindre l'action du planificateur public. Toute intervention publique va être confrontée à plusieurs difficultés (DAVID [1987]) :

- *Le paradoxe de la « fenêtre étroite »* (*« narrow policy windows paradox »*) : la période durant laquelle l'intervention peut se faire sans dommage est très brève. Le

planificateur doit guetter l'apparition de fenêtres temporelles qui correspondent aux périodes durant lesquelles l'intervention publique sera à la fois efficace et peu coûteuse. L'élaboration des politiques technologiques doit donc avoir une très bonne appréhension du contexte temporel du processus ;

- *Le dilemme du « géant aveugle »* (*« blind giant's quandary »*) : une des principales difficultés est que dans un contexte de technologies à fortes externalités de réseau et d'apprentissage, les périodes d'intervention efficaces et peu coûteuses coïncident en principe avec le commencement du processus d'apprentissage et auront une durée incertaine mais brève. En effet, il devient vite coûteux de corriger l'orientation d'une trajectoire de diffusion si un grand nombre d'agents partagent les mêmes anticipations sur les caractéristiques futures de la technologie et si certains agents ont effectué des investissements durables, irréversibles à court terme. Un bon *timing* de l'intervention publique est donc essentiel pour assurer son efficacité. Mais la zone temporelle optimale qui se situe dans la période précédent le « point de basculement », correspond aussi à la zone d'incertitude maximale quant aux mérites respectifs des technologies (DAVID et FORAY [1994]) ;
- *Le paradoxe des « orphelins enragés »* (*« angry orphans »*) : les adopteurs précoces de la technologie qui sera finalement éliminée consécutivement aux choix de politique technologique seront pénalisés et devront supporter des coûts (*« switching costs »*) afin d'adopter le standard technologique retenu.

La rationalité de l'intervention publique va donc dépendre du degré d'incertitude sur les mérites et les risques respectifs des technologies et de la période d'intervention, c'est-à-dire avant ou après le point de basculement en faveur d'une technologie. L'augmentation des RCA va rétrécir la fenêtre temporelle et augmenter les coûts de la maintenir ouverte, mais en contrepartie elle va réduire le nombre «d'orphelins », c'est pourquoi les industriels auront intérêt à ce que le standard sélectionné soit le leur ou que la décision soit prise rapidement. L'augmentation de l'incertitude produira des effets inverses, le *policy maker* sera « encore plus aveugle » et devra maintenir son exploration. La puissance publique doit ainsi déterminer le meilleur moment pour passer d'une phase d'exploration de la variété, où l'apprentissage se fait sur la recherche de l'efficience de plusieurs options technologiques, à une phase de sélection et d'exploitation, où l'apprentissage développé sur la meilleure technique permet une amélioration des performances économiques.

3.2.2.3. Le modèle de LAFFOND **et al.** *[2000]*

En matière environnementale, le processus de compétition technologique doit être analysé conjointement avec le processus d'apprentissage du décideur public sur les mérites et les risques des différentes technologies. L'analyse de LAFFOND *et al.* [2000] va apporter un éclairage intéressant en traitant de l'interaction entre ces deux processus et de ses conséquences sur la capacité du décideur public à promouvoir la technologie la plus propre. Dans la première partie du modèle les auteurs font l'hypothèse d'un Etat parfaitement informé cherchant à maximiser le bien-être collectif. Cela signifie que le *policy maker* connaît les caractéristiques des technologies susceptibles de verrouiller le système, et que parmi elles, il est capable d'identifier celle qui produira les plus grands effets collectifs. Dans la deuxième, partie cette hypothèse est levée pour intégrer l'apprentissage du décideur public.

3.2.2.3.1. L'intervention de l'Etat dans la compétition technologique en situation d'information parfaite

Les auteurs considèrent deux biens imparfaitement substituables produits avec deux technologies différentes par deux firmes indicées $k(k=1,2)$. La firme 1 utilise une technologie propre ; la firme 2 fabrique un produit issu d'un processus de production polluant. La technologie 1 n'est pas encore arrivée à maturité et son coût de fabrication unitaire est plus élevé que celui de la technologie 2. Au début de la compétition technologique qui se déroule sur T périodes, le coût du produit issu de la technologie 1 est plus élevé. Cependant, si dans le futur le produit 1 augmente significativement ses parts de marché son coût unitaire pourra diminuer sous l'effet des économies d'échelle et d'apprentissage, alors que le produit issu de la technologie 2 ne pourra diminuer son coût que faiblement et à un rythme constant si sa part de marché s'accroît.

A chaque période *t*, $c_1(t)$ représente le coût unitaire du produit 1 relativement à celui du produit 2 et $P_1(t)$ représente la part de marché de la firme 1 sur la même période. A chaque date *t*, il existe une part de marché « de basculement » $R_1(t)$ pour la technologie 1, telle que :

- si $P_1(t) \geq R_1(t)$ alors $c_1(t+1) \leq c_1(t)$
- si $P_1(t) < R_1(t)$ alors $c_1(t+1) > c_1(t)$

Quand suffisamment de consommateurs choisissent le produit 1, son coût unitaire peut baisser plus rapidement que celui du produit 2. Toutefois, compte tenu des limites technologiques, le coût unitaire du produit 1 ne peut pas descendre en dessous d'un seuil minimal c_1^* (supposé inférieur à 1). Dans le cas contraire, le coût relatif du produit 1 augmente vis-à-vis du produit 2, ce qui limite sa capacité à augmenter sa part de marché dans la période suivante.

Au cours de la période *t*, les consommateurs arrivent sur le marché et acquièrent une unité d'un des deux produits. Un acheteur *i* a vis-à-vis du produit *k* une utilité de la forme : $U_k^i = w_k^i f_k(c_k)$

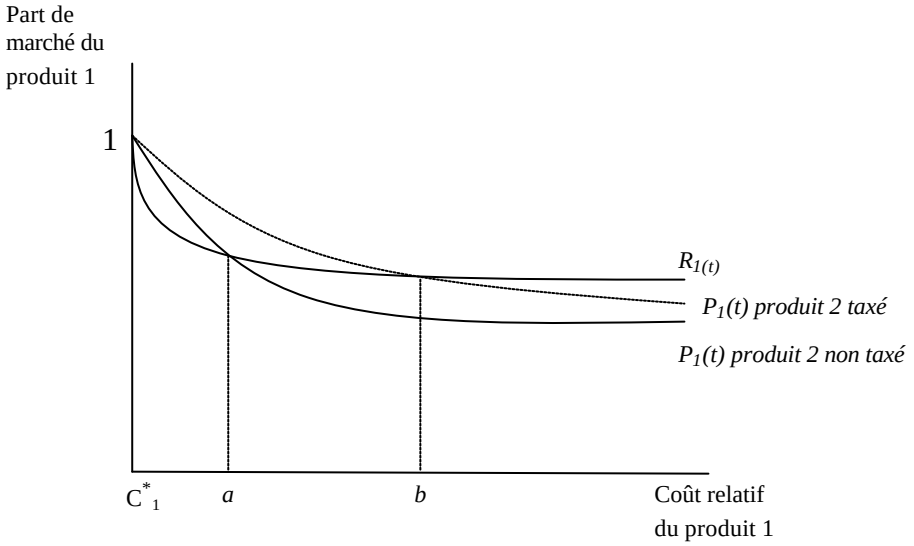
où w_k^i est un paramètre de préférence indépendant (« *personal preference parameter* », LAFFOND *et al.* [2000, p. 6]) pour chaque consommateur, distribué selon une loi uniforme, [0, 1], et $f_k(c_k)$ est une fonction décroissante du coût c_k de la technologie *k* qui détermine directement le prix d'achat de la technologie par les acheteurs. $f_k(c_k)$ représente l'ensemble des coûts associés à la technologie *k* ainsi qu'une appréciation de ses caractéristiques. Pour la suite, il est considéré que $U_k^i = w_k^i \frac{1}{c_k}$, seuls les coûts sont pris en compte. L'utilité du consommateur *i* du produit *k* est proportionnelle à un facteur de préférence qui lui est propre, et inversement proportionnelle à son coût de production (et donc au prix)[315]. A chaque période un nombre *N* d'acheteurs est tiré aléatoirement, chaque acheteur possédant la même probabilité d'être tiré et choisissant de consommer le bien qui lui apporte la plus grande utilité. Ainsi, la part de marché du produit 1 à la date *t* est une variable aléatoire dépendant de la plus ou moins grande sensibilité écologique des consommateurs qui se présentent sur le marché.

[315] Dans le but de simplifier, les auteurs supposent que l'utilité des consommateurs est fonction du coût unitaire des produits et non de leur prix de vente. Ils considèrent que les firmes fixent leur prix de vente en augmentant leur coût de revient unitaire d'une marge proportionnelle constante et identique entre les différents concurrents.

Comme dans l'analyse d'ARTHUR [1989] la dynamique du processus de compétition entre les deux technologies dépend des conditions initiales (des coûts unitaires relatifs des technologies, de l'ampleur des économies d'échelle et d'apprentissage) et de l'histoire du processus lui-même (aléa sur la demande). La Figure 3 ci-dessous schématise le processus de concurrence.

Figure 3. Compétition technologique avec intervention publique

Source : à partir de LAFFOND et al. *[2000]*



A chaque période le nombre d'acheteurs est suffisamment grand pour que le caractère aléatoire de la demande puisse être négligé. A toute date *t*, si $c_1(t) > a$, ce coût relatif augmentera de période en période (zone où $P_1(t) < R_1(t)$) et la firme 1 verra ses parts de marché tendre vers 0. Par contre quand $c_1(t) < a$, $P_1(t) > R_1(t)$ et le coût relatif du bien 1 tend à décroître vers c_1^* et sa part de marché vers 1.

Le processus de compétition comporte deux attracteurs ponctuels qui correspondent chacun à un monopole sur l'un des deux biens. On suppose qu'un monopole sur le bien 1 soit socialement préférable à un monopole sur le bien 2. Si au début du processus concurrentiel $c_1(0) < a$, le fonctionnement de ce marché, caractérisé par des externalités pécuniaires positives[316] et par des préférences hétérogènes, conduira vers l'attracteur socialement souhaitable. Dans le cas contraire, l'intervention de l'Etat

[316] Le fait qu'un individu achète un bien à la période *t* permet aux autres consommateurs de l'acheter moins cher à la période *t+1*.

devient nécessaire afin d'éviter que le système ne soit piégé dans une technologie inférieure. L'intervention publique peut viser à modifier le coût relatif des deux biens. Par exemple, l'instauration d'une taxe sur le bien 2 peut aider la firme 1 à accroître la diffusion de son produit, sachant que les conditions initiales ne lui étaient pas favorables. On peut souligner que si $c_1(0)>>a$ le taux de la taxe sera si élevé que l'intervention publique s'apparentera à une interdiction du produit 2. Sur la Figure 3, les conséquences d'une telle taxe conduisent à augmenter le seuil de basculement de a à b. A toute date t, l'instauration d'une taxe à un taux t sur le bien 2, permet si $a < c_1(t) < b$ d'assurer la convergence du système vers la technologie socialement souhaitable.

Commentaires

Dans la théorie standard les situations d'externalités négatives liées à la pollution sont souvent limitées à la question de la sous-optimalité de l'équilibre du marché et de la surproduction du bien polluant et l'intervention de l'Etat vise à modifier les mécanismes de marché pour réduire la pollution à un niveau optimal. Dans ce premier volet du modèle, LAFFOND *et al.* [2000] posent l'hypothèse réaliste que les mêmes biens peuvent être fournis aux consommateurs par des procédés plus ou moins polluants, ce qui vient enrichir l'intervention publique. Lorsque cette dernière est nécessaire pour orienter le système vers la technologie souhaitée deux de ses caractéristiques peuvent être soulignées : comme nous l'avons déjà mentionné (i) la période pour intervenir efficacement peut être brève et (ii) une politique publique « temporaire » peut suffire à guider le système.

(i) Le «dilemme de la fenêtre étroite » restreint la période pendant laquelle le *policy maker* peut intervenir avec succès (DAVID [1987]). Dans un système dynamique un mauvais *timing* dans la mise en place de la taxe peut conduire à son inefficacité. Sur la Figure 3, si à la date t le décideur public reçoit comme information $c_1(t) < b$, il peut décider d'appliquer une taxe à un taux t sur le prix du bien 2. Mais, si on suppose que la taxe ne sera effective qu'à la date t' et que $c_1(t') > b$, l'instauration de la taxe ne suffira pas à stopper la diminution de la part de marché du bien 1, et sa disparition à terme. La taxe pourrait être augmentée, mais le même phénomène peut se reproduire à nouveau. Plus l'intervention publique sera tardive, plus son coût sera important. Elle

doit donc agir particulièrement lorsque le système aborde des périodes de transition. Pendant ces périodes, la dynamique du système peut être orientée (assurer un maintien durable du produit vert) par une modification des mécanismes de marché et non pas par la simple interdiction des biens concurrents (taxation élevée du produit polluant).

(ii) Même si l'Etat est contraint d'un point de vue budgétaire, il peut momentanément mettre en place des incitations pour faire adopter une technologie, avant que les phénomènes cumulatifs endogènes (économies d'échelle et d'apprentissage) ne prennent ensuite le relais. Sur la Figure 3, on peut voir que la taxe reste nécessaire à toute date *t* telle que $a < c_1(t) < b$, mais ce n'est plus le cas à une date *t'* (*t'*>*t*) où $c_1(t') < a$. A partir de *t'* le coût relatif de production des deux produits sans intervention publique procure à la firme 1 une part de marché suffisamment importante pour engendrer des rendements croissants dynamiques, la taxe peut donc être supprimée.

3.2.2.3.2. L'intervention de l'Etat en situation d'information imparfaite

LAFFOND *et al.* [2000] considèrent dans un deuxième volet que l'Etat est désormais doté d'une rationalité limitée et d'une information imparfaite sur les possibilités respectives des technologies. Il ne peut donc pas *a priori* identifier correctement les caractéristiques des produits présentant le plus de risques pour l'environnement. L'Etat doit les découvrir en menant lui-même un processus d'apprentissage ou en réunissant les résultats de la recherche privée. Ce processus d'apprentissage se déroule parallèlement à la compétition technologique entre les firmes.

LAFFOND *et al.* [2000] supposent qu'un produit k peut induire un danger Y^k repérable sur une échelle unidimensionnelle $\left[0, \overline{Y^k}\right]$. Compte tenu de l'imperfection de l'information, Y^k n'est pas connu du décideur public. Pour le découvrir, à chaque date *t* des recherches[317] sont menées et leur résultat est une suite de messages aléatoires

[317] Cette hypothèse correspond au fait que la découverte des risques environnementaux peut être accidentelle, comme cela a été le cas pour la découverte du trou dans la couche d'ozone (FORAY et GRUBLER [1996]).

indépendants X_t^k de moyenne Y^k et d'écart-type s_k. Bien que de nouvelles recherches soient menées à chaque période, l'évaluation du risque retenue par les décideurs publics présente une certaine inertie. Ainsi, l'évaluation du niveau de risque X_t^k induit par un bien *k* pour une période *t* s'écrit :

$$Y_t^k = (1-b)\,Y_{t-1}^k + b\,X_t^k$$

b représente le paramètre d'intensité d'inertie du décideur public dans la correction des évaluations du risque. Quand b tend vers 0, le poids des premières découvertes va prévaloir puisque tous les résultats futurs des recherches ne pourront que corriger à la marge le niveau de risque estimé. Au contraire si b tend vers 1, l'estimation des risques vient s'ajuster quasi instantanément aux résultats de la recherche.

Conformément aux hypothèses que nous avons évoquées, le décideur public ne peut pas traiter les risques environnementaux de manière optimale et doit choisir entre l'exploration et l'exploitation[318] (MARENGO [1994]). Seule, une politique de *satisficing* peut être mise en œuvre (NELSON et WINTER [1982]). Les auteurs définissent deux niveaux de risque, Y_{inf} et Y_{sup} :

- si à toute date *t*, $Y_{\inf} \leq Y_t^k < Y_{\sup}$, alors le bien *k* est taxé au taux t ;
- si $Y_t^k \geq Y_{\sup}$, alors le bien *k* est interdit ;
- si $Y_t^k < Y_{\inf}$, alors le bien *k* est autorisé et non taxé.

LAFFOND *et al.* [2000] formulent deux autres hypothèses. D'une part, les décisions publiques sont considérées comme irréversibles, quelle que soit l'évolution des estimations des risques issus de la recherche. D'autre part, une nouvelle catégorie de produits est introduite, trois produits sont donc en concurrence : le produit 3 issu d'un processus polluant ; le produit 2 issu d'un processus initialement polluant mais auquel on ajoute un procédé de dépollution en bout de chaîne (*end-of-pipe*) ; le produit 1 issu d'une technologie innovante qui est une technologie environnementale intégrée.

[318] La nature des risques environnementaux empêche de prolonger indéfiniment l'exploration car des dommages irréversibles pourront être causés.

Au début du processus (t = 0) les technologies 2 et 3 sont présentes, alors que la technologie 1 tente de pénétrer le marché. Trois facteurs peuvent aider la technologie 1 à entrer sur le marché et à s'y maintenir, même si ses coûts sont les plus élevés en début de période :

- sachant que le décideur public se fonde sur le critère environnemental, les technologies 2 et 3 sont les plus risquées de ce point de vue[319] ;
- le coût de la technologie 1 va décroître si elle est choisie par suffisamment de consommateurs ;
- la demande est aléatoire, sachant que la décision des consommateurs ne se fonde pas uniquement sur les coûts.

Compte tenu de sa complexité, deux processus aléatoires sont traités en même temps (la compétition technologique et la recherche sur les risques environnementaux), le modèle est exploité par simulation. Les tableaux ci-dessous indiquent les valeurs des paramètres retenues dans les simulations (pour Y_{sup}=10).

Tableau 1. Valeurs des paramètres choisis pour la simulation[320]

Source : à partir de LAFFOND et al. *[2000]*

Nombre de périodes	$T = 100$
Nombre de nouveaux consommateurs sur le marché à chaque période	$N = 500$
Niveau initial de l'évaluation du risque	$Y_0^1 = Y_0^2 = Y_0^3 = 0$
Coût unitaire initial du produit 1	$C_1(0) = 1{,}5$
Coût unitaire minimal du produit 1	$c_1^* = 1{,}1$
Coût unitaire initial du produit 2	$c_2 = 1{,}3$
Coût unitaire minimal du produit 2	$c_3 = 1$

[319] Au début de la période (t = 0) les risques environnementaux associés aux trois technologies sont supposés égaux à 0, c'est-à-dire que le décideur public n'a *a priori* aucune croyance sur les risques des technologies. Son jugement sera formé de manière endogène par le processus de recherche.

[320] De manière à simplifier, il est considéré que le coût unitaire des produits 2 et 3 est constant. $c_1(t)$ fait référence ici à un coût absolu et non à un coût relatif.

Tableau 2. Distributions des probabilités de tirage de chacun des niveaux de risques pour les trois catégories de biens lors de la recherche publique

Source : LAFFOND et al. *[2000, p.4]*

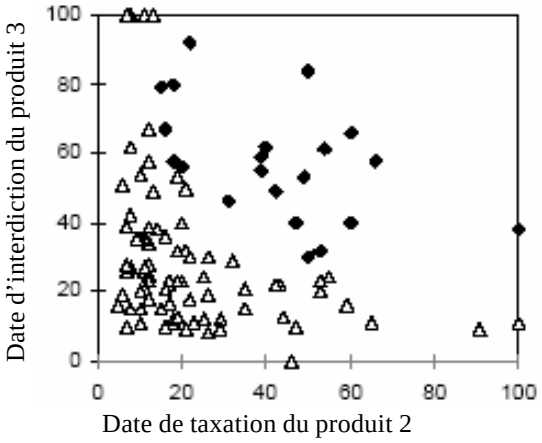
X_t^k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y^k
$k = 1$	0,05	0,20	0,50	0,10	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	2,56
$k = 2$	0,01	0,02	0,05	0,12	0,50	0,15	0,10	0,02	0,01	0,01	0,01	4,24
$k = 3$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,13	0,23	0,40	0,08	0,04	7,10

Résultats

Les simulations effectuées à partir du modèle permettent de tirer des enseignements sur l'action de l'Etat dans un cadre évolutionniste, c'est-à-dire où celui-ci est doté d'une rationalité limitée et doit collecter de l'information sur le système à réguler. Le but de l'intervention publique est d'assurer la survie du produit « vert » (produit 1). Cet objectif semble *a priori* réalisable, puisque le processus d'apprentissage devrait conduire l'Etat à taxer ou interdire les produits 2 et 3, ce qui permettrait d'assurer la survie du produit 1.

Figure 4. Impact de la date de l'intervention publique sur la survie du produit « vert »

Source : LAFFOND et al. *[2000]*



$q = 0{,}1$; $t = 1{,}4$; $b = 0{,}3$

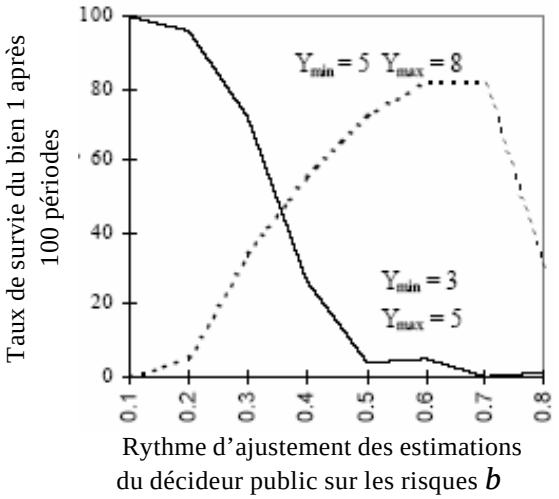
◆ = le produit 1 disparaît ; △ = le produit 1 survit

En situation d'information imparfaite, l'Etat est confronté au dilemme entre l'exploration et l'exploitation. Pour que son intervention soit efficiente, il doit collecter assez d'informations pour identifier le produit qui est le plus favorable à l'environnement. Mais en même temps, tout retard dans la mise en œuvre de mesures de soutien à ce produit peut entraîner une double perte de bien-être par la prolongation de la consommation massive du produit polluant et par la disparition du produit « vert ». L'intervention publique doit déterminer le meilleur moment pour passer de la phase d'identification des caractéristiques réelles des différents produits (exploration) à celle où elle va modifier le processus de marché pour favoriser un produit dans la compétition (exploitation). Les simulations[321] représentées par la Figure 4 illustrent les difficultés à assurer le maintien du produit 1 en cas d'intervention publique tardive. Chaque simulation est repérée par deux coordonnées : en abscisse, la date à laquelle le produit 2 a été taxé ; en ordonnée, la date à laquelle le produit 3 a été interdit. Deux résultats sont distingués : les triangles blancs représentent la survie du produit 1 à l'issue du processus concurrentiel, les losanges noirs, la disparition du produit 1au cours du processus. On constate que si le produit 3 n'est pas interdit avant la date $t = 30$ ou que le produit 2 n'est pas taxé avant la date $t = 20$, la part de marché du produit 1 sera insuffisante pour entraîner une baisse de son coût unitaire assurant son maintien. Ce retard peut provenir d'une défaillance du *policy maker*, mais il peut aussi résulter de la nature aléatoire des résultats de la recherche.

[321] La *Figure 9* représente les résultats de 100 simulations. Les différences dans les résultats proviennent uniquement du caractère aléatoire des recherches sur les risques dont sont porteurs les différents produits.

Figure 5. Le rôle de l'interaction entre les seuils d'intervention publique et le taux d'ajustement des évaluations du risque sur la survie du produit « vert »

Source : LAFFOND et al. *[2000]*



La Figure 5 illustre le dilemme du « géant aveugle » (DAVID [1987]). Elle représente, en ordonnée, la fréquence de survie du produit 1 après 100 périodes en fonction, en abscisse, du rythme b d'ajustement des estimations des risques. La courbe en trait plein correspond à des seuils d'intervention faibles, Y_{inf} et Y_{sup}, et donc à une intervention en moyenne précoce. La courbe en pointillés est associée à des seuils plus élevés et donc à une intervention en moyenne plus tardive. On voit que si l'Etat cherche à intervenir très tôt (courbe en trait plein, b élevé) les chances de survie du bien 1 sont faibles. En fait, deux stratégies d'intervention publique ressortent de ces simulations : (i) les décideurs publics peuvent fixer des faibles seuils d'intervention, mais corriger progressivement les estimations de risques (courbe en trait plein, b faible) ; (ii) ils peuvent fixer des seuils d'intervention plus élevés, mais accorder plus d'importance aux recherches récentes (courbe en pointillés, b élevé). Seule cette deuxième stratégie apparaît réaliste, puisqu'il est difficilement concevable que les pouvoirs publics ignorent délibérément les recherches les plus récentes.

3.2.2.3. Commentaires sur les décisions publiques en matière de choix technologiques

3.2.2.3.1. Les contraintes pesant sur le choix technologique du décideur public

Le décideur public souhaitant soutenir une nouvelle technologie environnementale est confronté au problème de faire émerger, ou de ne pas faire disparaître, lors d'un processus de compétition technologique une technologie « verte » qui souvent affiche des performances de court terme moindres que ses concurrentes. Si un agent privé choisit le plus souvent la technologie au plus fort rendement immédiat, le décideur public va chercher à favoriser l'adoption de la technologie aux plus grands effets collectifs, c'est-à-dire la technologie « intrinsèquement optimale » en fonction de l'information dont il dispose[322]. La mise en œuvre de la bonne stratégie par les pouvoirs publics ne va pas sans poser de problèmes compte tenu des contraintes tant externes qu'internes qui se présentent.

Parmi les contraintes externes, on peut évoquer de manière classique le *lobbying* des industriels qui vont chercher à retarder l'intervention publique en faisant pression pour obtenir la fixation de seuils d'intervention les plus élevés possibles et un rythme d'ajustement des estimations des risques le plus lent possible. En se rapportant à la Figure 5, on peut voir que ce type de configuration entraîne l'échec de l'intervention publique et la disparition du produit environnemental. Mais la lenteur à corriger les estimations des risques peut aussi provenir de la difficulté du *policy maker* à recueillir l'information. En effet, LAFFOND *et al.* [2000] supposent que les résultats de la recherche sur les risques environnementaux et les caractéristiques des technologies sont directement accessibles aux pouvoirs publics qui peuvent ainsi les intégrer aux résultats des recherches passées. Or, une partie de ces informations est détenue par les firmes qui peuvent pratiquer des stratégies de rétention de l'information vis-à-vis de l'Etat. On voit donc que les difficultés du décideur public pour gérer l'incertitude favorisent les comportements stratégiques des différents acteurs, notamment les industriels, qui vont tenter d'influencer les décisions publiques vers leurs intérêts. Les firmes arrivent ainsi à

[322] COWAN [1991] souligne que l'adoption d'une technologie par un agent a trois effets : un effet privé, représenté par le bénéfice immédiat, et deux effets collectifs, l'avancée sur la courbe d'apprentissage et un accroissement de l'information sur les mérites de cette technologie.

modeler elles-mêmes leur environnement de sélection pour favoriser leur standard (NELSON [1995]).

Du côté des contraintes internes, les auteurs considèrent que les interventions publiques (interdictions et/ou taxe) sont irréversibles, ce qui peut sembler conforme avec la réalité des pratiques[323], mais cette irréversibilité peut entraver la diffusion du bien environnemental. C'est le cas si les seuils d'intervention sont faibles et la vitesse de correction des évaluations du risque élevée. Le bien 1, dont toutes les caractéristiques ne sont pas entièrement connues, peut être touché par une taxe ou une mesure d'interdiction liées à des hésitations sur les résultats de la recherche. A une période suivante, de nouveaux résultats de recherche peuvent venir montrer le caractère précipité de l'intervention publique. Cependant, les décideurs publics ne remettent généralement pas en cause précipitamment leurs connaissances et les politiques qu'ils ont engagé dans le passé. De ce fait, l'information réunie pendant la phase d'exploration n'est pas, ou mal, exploitée, les problèmes mal identifiés et les mesures prises inappropriées. Les politiques publiques évoluent plus généralement en fonction des informations recueillies sur l'ensemble de l'environnement économique.

L'analyse de LAFFOND *et al.* [2000] montre que le décideur public doit concilier deux exigences apparemment contradictoires dans le lancement d'une nouvelle technologie : d'une part, il doit favoriser une première diffusion industrielle qui sera le vecteur des apprentissages technologiques et informationnels (RCA), et d'autre part, il doit protéger la nouvelle technologie pour qu'elle se renforce avant d'entrer pleinement en compétition avec la technologie verrouillant le marché. Ainsi le lancement de nouvelles technologies sur des marchés « niches » constitue un bon moyen de combiner ces deux exigences en les protégeant d'un environnement sélectif trop défavorable. KEMP *et al.* [1997, 1998] développent le concept de *« strategic niche management »* pour définir des « espaces – réglementaires et technologiques – protégés » afin d'expérimenter des technologies prometteuses, de développer les compétences et les apprentissages interactifs entre les producteurs et les utilisateurs des technologies et de favoriser leur insertion dans l'environnement institutionnel.

[323] En effet les taxes introduites dans un but spécifique, environnemental ou autre, sont rarement levées une fois l'objectif atteint, soit que la menace environnementale réapparaît aussitôt, soit que les contraintes de finances publiques conduisent les décideurs publics à ne pas se priver d'une recette budgétaire (BURGENMEIER *et al.* [1997]).

3.2.2.3.2. Le maintien et/ou la création de la diversité technologique en situation d'incertitude

Pour METCALFE [1994, p. 933] *« the fundamental issues* [of technology policy] *are dynamics, they are related to the nature of competition as a process of endogenous change, and the relation between variety and selection is two way ; variety drives selection while negative and positive feedback processes mean that the development of variety is shaped by the process of selection. The aim of technology policy is twoflod : to stimulate the generation of variety through innovation and to ensure that feedback from the selection process does not operate to the detriment of variety creating mechanisms. »*

Ainsi l'incertitude quant au bénéfice environnemental de plusieurs technologies en compétition doit pousser la puissance publique à opter pour un maintien de la diversité. Le *policy maker* peut chercher à sauvegarder des technologies aux rendements moyens plus faibles mais porteuses de potentiels (la variance des rendements) plus élevés. La diversité technologique peut diminuer les performances[324], mais elle améliore l'information globale du décideur public sur les technologies. Le maintien d'une diversité technologique, notamment des options les plus éloignées les unes des autres, peut être atteint par la mise en œuvre d'instruments classiques, comme l'édiction de normes, par la taxation et/ou la subvention ou par une planification des achats publics, l'ensemble venant modifier les anticipations des agents sur les bénéfices futurs des différentes technologies (DAVID et FORAY [1994]).

Mais s'intéresser à l'objectif de maintien de la diversité technologique ne consiste qu'à envisager l'intervention publique sous l'angle du contrôle du processus économique, en considérant seulement les politiques influençant la sélection des trajectoires technologiques dans le sens de l'efficience. En situation d'incertitude, il est également nécessaire de prendre en compte les politiques publiques visant à créer de la variété technologique, c'est-à-dire visant à créer de la variété dans les choix technologiques futurs concernant l'environnement (METCALFE [1994], WEGNER [1997], MOREAU [2004]). Au-delà du rôle correcteur traditionnel ou du rôle de «pilote » du

[324] Les économies d'échelle liées à un apprentissage intensif d'une seule technologie et les externalités de réseau seront limitées.

processus de marché, ici c'est le rôle créateur de l'Etat qui peut être mis en avant. De ce point de vue, l'Etat a un pouvoir de structurer le cadre de fonctionnement du marché et des autres institutions beaucoup plus important que les autres entités économiques. On peut alors envisager plusieurs modalités de l'intervention publique :

- l'Etat peut mener lui-même des activités de R&D : en intégrant cet objectif dans les missions des firmes à capitaux publics, ou éventuellement en créant des firmes publiques pour développer des technologies environnementales ;
- plus classiquement l'Etat peut chercher à inciter les agents privés à élargir l'ensemble des opportunités par des subventions, des taxes ou l'interdiction de certains choix technologiques. Si l'on se replace dans le cadre de l'analyse de LAFFOND *et al.* [2000] on peut esquisser trois scénarios à partir de l'exemple de la taxation de produits polluants. Admettons que le bien environnemental (bien 1) ne puisse apparaître qu'après la taxation de l'un des deux autres biens. L'instauration d'une taxe donne un signal signifiant l'ouverture d'une fenêtre pour développer un produit « vert ». Cependant, il n'est pas automatique qu'une ou plusieurs firmes soit prête à ce moment là à engager les investissements nécessaires. Dans un premier cas de figure, les firmes réagissent de manière défensive et n'innovent pas (FAUCHEUX et NICOLAÏ [1998a, 1998b]. Dans un second cas, les firmes peuvent innover en modifiant les caractéristiques de leurs produits (2 ou 3) pour simplement passer les contrôles de pollution menés par une institution publique. Enfin, dans un troisième cas les firmes innovent et choisissent des stratégies environnementales «pro-actives » en cherchant à tourner à leur avantage les opportunités commerciales offertes par les recherches induites par les problèmes environnementaux. Dans ce cas l'intervention publique est une réussite car elle contribue à favoriser la création d'une réelle nouveauté favorable à l'environnement.

Cette section avait pour objet d'aboutir à une reformulation des politiques technologiques et environnementales dans le cadre évolutionniste afin d'analyser les conditions de développement d'une technologie environnementale radicale, comme celle des énergies renouvelables. Dans un premier temps nous avons posé les hypothèses comportementales concernant l'Etat ainsi que les règles normatives dirigeant son action dans un cadre évolutionniste. Bien que la référence à un optimum de PARETO soit abandonnée, l'Etat intervient toujours quand le marché est défaillant, mais dans un cadre dynamique c'est pour assurer le suivi de la trajectoire socialement

souhaitée. En matière de politique technologique, l'analyse évolutionniste confère à l'Etat un rôle complexe de catalyseur des externalités positives destiné à élever à la fois les rendements privés et sociaux de la R&D. Nous avons ensuite abordé l'analyse évolutionniste du changement technique en y intégrant la problématique environnementale. Tout l'enjeu des politiques publiques visant le développement de trajectoires technologiques « vertes » consiste alors à organiser un environnement institutionnel et à concevoir des mesures pour inciter les firmes à innover radicalement. Nous avons choisi d'appréhender le développement d'une technologie environnementale à partir du modèle de compétition technologique d'ARTHUR [1989]. Ce modèle permet d'abord d'expliquer par les rendements croissants d'adoption les situations de verrouillage sur un standard technologique éventuellement sous-optimal. Ensuite, bien que non exempt de faiblesses, ce type de modèle met en évidence l'incertitude et les difficultés temporelles et informationnelles auxquelles doit faire face la politique technologique. Afin d'apporter un éclairage plus précis sur ces difficultés, nous avons présenté et commenté le modèle de LAFFOND *et al.* [2000]. Cette analyse permet de mieux appréhender dans le domaine environnemental le processus de compétition technologique et le processus d'apprentissage du décideur public. Le principal problème du décideur qui connaît mal les possibilités futures d'une technologie consiste à déterminer le meilleur moment pour passer de la phase d'exploration à celle d'exploitation. Il est alors nécessaire de suffisamment soutenir une diffusion de la technologie « verte » afin d'engendrer des apprentissages technologiques et informationnels tout en la protégeant des technologies dominantes. Concernant des technologies en cours d'amélioration, le maintien ou la création de variété technologique, afin de laisser ouvertes des options potentiellement plus efficientes, apparaît alors comme une règle générale de gestion de l'incertitude.

Conclusion du Chapitre 3

L'objet de ce chapitre était d'aborder la théorie évolutionniste de l'innovation et du changement technique afin de saisir d'une manière plus riche les conditions et les incitations à développer une nouvelle technologie environnementale, comme une technologie d'énergie renouvelable. Sachant que les systèmes énergétiques des pays industrialisés sont actuellement quasi-totalement dominés par les sources d'énergies fossiles, l'étude du développement des technologies des énergies renouvelables nécessite une approche théorique de l'innovation qui prenne en compte la dimension temporelle, les capacités d'apprentissage des différents acteurs, notamment des décideurs publics et des firmes, ainsi que l'influence du cadre institutionnel.

La *Section 1* nous a permis de poser les fondements de l'approche évolutionniste de l'innovation ainsi que ses principales hypothèses. Ainsi, ce courant s'est construit à partir de certaines critiques de l'approche standard, mais aussi en s'inspirant de la théorie schumpétérienne de l'innovation et des modèles biologiques «classiques ». Le courant évolutionniste contemporain développe une approche micro-économique originale considérant des firmes dotées d'une rationalité limitée, suivant des routines, et capables d'apprentissage. Nous avons ensuite présenté le modèle de NELSON ET WINTER [1982] afin de donner une illustration des modèles évolutionnistes dans lesquels la concurrence conduit les firmes à ajuster leurs actions par imitation, par apprentissage ou par innovation, sélectionne ensuite certains comportements et en élimine d'autres.

La *Section 2* a été l'occasion de préciser la conception évolutionniste de l'innovation. Celle-ci délaisse le modèle linéaire et opte pour une représentation interactive, plus réaliste, du processus d'innovation. Une nouvelle approche des externalités de connaissances conférant aux firmes une capacité d'absorption des connaissances externes et une capacité d'émission de leurs propres connaissances a été ensuite établie. Il en résulte une plus grande appropriabilité des innovations et donc une plus grande incitation à innover pour les firmes. A un niveau plus macro-économique nous avons ensuite présenté les grandes régularités que repèrent les évolutionnistes dans la dynamique économique. Ce cadre théorique insistant sur les aspects d'apprentissage et de développement dynamique des technologies nous est alors apparu adéquat pour étudier la constitution des technologies des énergies renouvelables.

Le but de la *Section 3* était de situer les politiques technologiques et environnementales dans le cadre évolutionniste et de formuler des principes pour guider

le soutien au développement d'une technologie « verte ». Après avoir redéfini les règles justifiant l'action de l'Etat dans un cadre dynamique, il est ressorti que les possibilités d'interventions étaient *a priori* larges, mais qu'elles nécessitaient d'être précisées au cas par cas. Suivant notre problématique, nous avons ensuite associé l'analyse évolutionniste de l'innovation et la problématique environnementale. Cela nous a conduit à analyser les difficultés et les possibilités de l'action publique pour soutenir une technologie «verte » dans la compétition avec les technologies dominantes, déjà établies. Le modèle d'ARTHUR [1989] basé sur les rendements croissants d'adoption nous a permis dans un premier temps d'expliquer les situations de *lock-in* technologique, comme c'est le cas actuellement pour les sources d'énergies fossiles. Nous avons ensuite à travers l'analyse de LAFFOND *et al.* [2000] montré quelles pouvaient être les possibilités d'intervention publique dans la compétition technologique. Dans un contexte d'incertitude sur les possibilités futures des technologies, il est ressorti que le décideur public doit œuvrer pour prolonger la phase d'exploration, en maintenant ou créant de la variété technologique, afin de susciter des apprentissages et des informations permettant de choisir les technologies les plus efficientes.

Ce troisième chapitre nous a donc permis de présenter et d'adopter l'analyse évolutionniste de l'innovation et ses principaux concepts. Ces concepts seront mis à profit dans le *Chapitre 4* dont le but est d'étudier la dynamique technologique et industrielle des ER à travers les exemples de l'énergie solaire photovoltaïque et du système technologique allemand, et du système technologique danois de l'éolien.

CHAPITRE 4

La Dynamique Technologique et Industrielle des Energies Renouvelables : les Exemples du Solaire Photovoltaïque et de l'Eolien

Introduction

Dans ce chapitre, il s'agit d'utiliser les apports conceptuels de la théorie évolutionniste de l'innovation et du changement technique afin d'illustrer le développement de technologies énergétiques environnementales. Ce cadre théorique dynamique permet d'abord de prendre en compte la dimension temporelle nécessaire à l'appréhension de la constitution d'une technologie radicale, telles qu'apparaissent les énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques actuels des pays industrialisés verrouillés par les énergies fossiles. Il permet ensuite de situer le changement technologique dans un contexte institutionnel spécifique à chaque pays en intégrant les capacités d'apprentissages des différents acteurs publics et privés. Nous choisissons d'étudier les exemples des énergies solaire photovoltaïque et éolienne. Celles-ci ont en commun d'être connues dans leurs principes de base depuis longtemps et atteignent depuis peu une certaine maturité technologique, malgré leur manque de compétitivité. Cependant, le secteur de l'énergie solaire PV connaît un verrouillage sur une trajectoire technologique, dont les possibilités de progression demeurent encore marquées d'incertitude, alors que la filière éolienne s'est rapidement focalisée sur un standard développé de façon incrémentale. Nous inscrivons l'étude de ces exemples respectivement en Allemagne et au Danemark, compte tenu de leur volonté d'accroître leur part dans leur bilan énergétique en vue de respecter les engagements internationaux (Protocole de Kyoto de 1997, Directive européenne sur la promotion des ER de 2001).

Dans la Section 1, nous analyserons l'évolution technologique de l'énergie solaire PV en présentant d'abord les tendances récentes du marché mondial. Nous aborderons ensuite la situation de verrouillage technologique que connaît ce secteur, afin d'évaluer les possibilités d'émergence d'une variété de trajectoires permettant de choisir le standard le plus efficient.

Dans la Section 2, après avoir présenté les fondements théoriques des approches des systèmes d'innovation et des systèmes technologiques, nous aborderons l'exemple du l'évolution du système technologique de l'énergie solaire PV en Allemagne à travers ses deux principales phases.

Dans la Section 3, nous exposerons la particularité de la trajectoire du système technologique de l'énergie éolienne au Danemark, constitué dans un premiers temps de deux sous-systèmes qui se sont ensuite réunis.

Section 1. L'évolution technologique de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire PV permet de produire de l'électricité directement à partir des rayonnements du soleil, sans émission polluante. Développée initialement sans considération de coûts pour des applications très restreintes, celle-ci va susciter un intérêt après les chocs pétroliers. Les activités de R&D publique et privée menées alors permettront une amélioration des rendements et une baisse des coûts, toutefois insuffisantes pour dépasser le stade des marchés niches des applications isolées. Plus récemment, sous la pression de la contrainte environnementale, certains pays industrialisés vont choisir de relancer le solaire PV pour les applications individuelles décentralisées connectées au réseau électrique. Ces caractéristiques font de l'énergie solaire une innovation radicale, et la placent comme un nouveau paradigme technologique, plus complémentaire que réellement concurrent au paradigme établi, *i.e.* l'électricité produite de façon centralisée à partir de sources fossiles et distribuée par le réseau. Cette section a pour objet d'analyser l'évolution technologique du solaire PV. Après avoir retracé la croissance récente de son marché, nous rendrons compte de la situation de verrouillage technologique que connaît cette filière. Nous nous interrogerons ensuite sur les possibilités technico-économiques de maintien ou de sortie de ce *lock-in* à travers les politiques publiques et les positionnements des firmes.

1.1. La croissance du marché mondial du solaire PV

L'énergie solaire[325] est une ressource relativement bien répartie géographiquement[326] et donc disponible en de multiples endroits (voir l'atlas solaire européen en ANNEXE 5). L'utilisation de systèmes PV présente le grand avantage de produire (et éventuellement stocker) de l'électricité sur le lieu de sa consommation ou à

[325] L'énergie reçue via le rayonnement solaire à la surface de la terre (au total 720.10^{15} kWh) varie de 1 100 à 2 300 kWh/m²/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année, en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m² et une puissance crête de plus de 1 kW/m² (voir ANNEXE 5).

[326] Même si elle est particulièrement disponible dans les pays situés entre l'équateur et les 45èmes parallèles.

une proximité immédiate des besoins. Le PV est préférable quand les «déséconomies d'échelle » dues à la petite taille des installations sont plus que compensées par les externalités qu'elles engendrent (PERCEBOIS [1991]). Classiquement, l'atout essentiel du solaire PV est d'éviter les coûts de distribution inhérents aux solutions conventionnelles, que ce soit l'utilisation de groupes électrogènes alimentés par des énergies fossiles (diesel, gaz) ou les coûts d'extension d'un réseau électrique principal jusqu'au lieu d'utilisation. Mais plus récemment, l'intérêt porté au solaire PV tient à une conception de celui-ci en tant que système décentralisé, connecté au réseau, produisant de la puissance à l'endroit de la demande et permettant de s'affranchir des problèmes liés au stockage.

1.1.1. Quelles applications pour le solaire PV ?

Depuis les premières utilisations spatiales, l'énergie solaire s'est positionnée sur diverses applications. Cette dernière décennie, les grands programmes encourageant l'installation de toits solaires ont permis de débuter une phase de diffusion de masse surtout au Japon, en Allemagne et aux Etats-Unis.

1.1.1.1. Les différents segments du marché du solaire PV

Les possibilités d'utilisation du solaire PV sont aujourd'hui très variées. On peut distinguer six domaines d'application (RICAUD [1997], OLIVER et JACKSON [1999], MENANTEAU [2000a, 2000b]):

- *les applications spatiales* : elles représentent le secteur le plus ancien, puisque les premières utilisations pour les satellites datent des années 1960. Depuis de nombreuses activités de R&D réalisées dans les domaines militaires et publics (NASA aux Etats-Unis et ESA en Europe) ont permis d'accroître les performances et de diminuer le poids des modules. Représentant moins de 5% de la demande totale de cellules, les utilisations PV spatiales demeurent marginales. En outre, elles ne représentent pas véritablement un marché « énergétique ». La diminution des coûts n'étant pas la priorité du secteur, cela peut contribuer à développer des trajectoires technologiques différentes des applications terrestres.

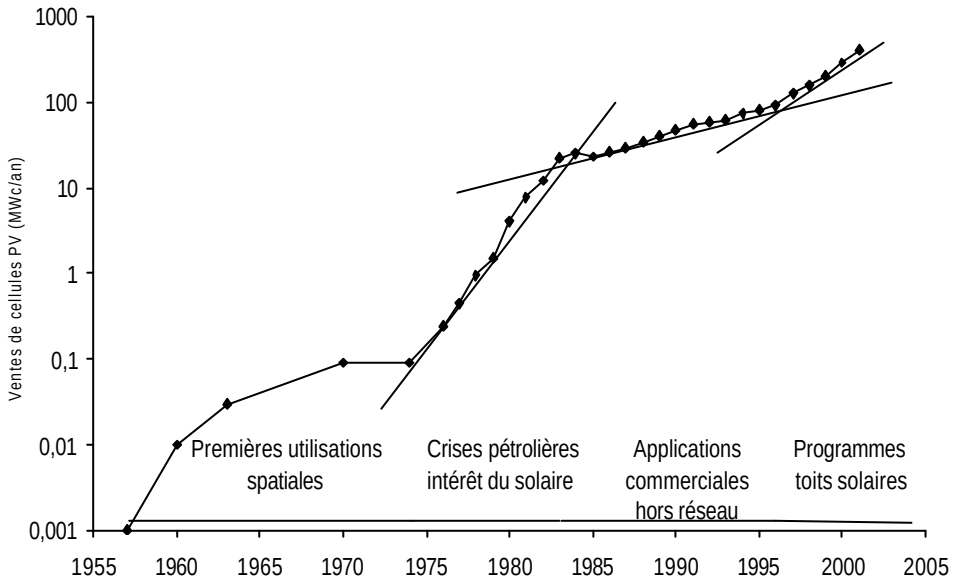
- *les applications professionnelles (de 10 Wc à 10 kWc)* : beaucoup d'applications professionnelles isolées ou difficilement accessibles exigent une source d'électricité fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Les générateurs PV sont ainsi utilisés dans les télécommunications (relais, émetteurs-récepteurs TV, radio, téléphonie), dans la protection cathodique des pipelines, les balises de navigation, les usages militaires…
- *les systèmes isolés à usage domestique ou collectif (de 50kWc à 100 kWc)* : dans les pays industrialisés ils sont utilisés pour l'alimentation de bâtiments non raccordés au réseau (refuges, habitations isolées) ; dans les pays en développement (PED) ils constituent un outil de développement économique et social fournissant des services de base à la population, tels que le pompage de l'eau, l'éclairage, les systèmes de communication…
- *les toits et façades PV raccordés au réseau (de 3 à >5 kWc)*: en zones urbaines ces systèmes permettent une production décentralisée d'électricité sur le lieu de la demande. Le fait que le revêtement en panneaux solaires (tuiles, vitres) reviennent quasiment au même coût que celui réalisé avec des matériaux classiques rend très attrayante cette solution. L'électricité produite peut être consommée immédiatement, par exemple dans le cas d'un immeuble commercial pour lequel la consommation est diurne. Dans ce cas l'installation PV contribue à écrêter les pointes de consommation et diminue la surcharge du réseau. Grâce à un compteur tournant dans les deux sens et à un onduleur, l'électricité non consommée est injectée dans le réseau et achetée par la compagnie électrique.
- *les centrales de « grande puissance » raccordées au réseau (plusieurs MWc)* : plusieurs projets expérimentaux de grandes installations PV centralisées raccordées au réseau ont été développés par des compagnies électriques avec des soutiens publics aux Etats-Unis dans les années 1980 (Rancho Seco 1 MWc ; Carissa plain 5,2 MWc) et en Europe dans les années 1990 (Tolède 1 MWc; Serre 3,3 MWc ; Crête 5 MWc). En juillet 2004 une nouvelle centrale de 4 MWc a été mise en service près de Leipzig en Allemagne. Mais l'installation la plus puissante jamais réalisée (10 MWc, 57 600 panneaux solaires) devrait entrer en production début 2005 en Allemagne. Ces centrales sont constituées de champs de capteurs plans ou de systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnements directs. Placées aux extrémités d'un réseau, où la

qualité de la puissance se détériore quand la demande en électricité augmente, elles permettent de redresser la tension et d'améliorer la puissance.

- *les biens de consommation (milliWc à 50 Wc)* : de nombreuses applications de loisirs (bateaux, lampes de jardin) ou d'intérieur (montres, calculettes) peuvent être alimentées par une petite surface de cellules PV en remplacement de piles nuisibles pour l'environnement. Ces mini-générateurs de faible puissance ne sont pas véritablement considérés comme des applications énergétiques, mais constituent des débouchés importants et réguliers pour l'industrie PV. Le Japon est le principal producteur et utilisateur de ces biens.

1.1.1.2. Les grandes phases de la diffusion du solaire PV

Figure 1. Evolution du marché mondial du solaire PV par types d'applications
Source : JACOBSSON et al. [2002]



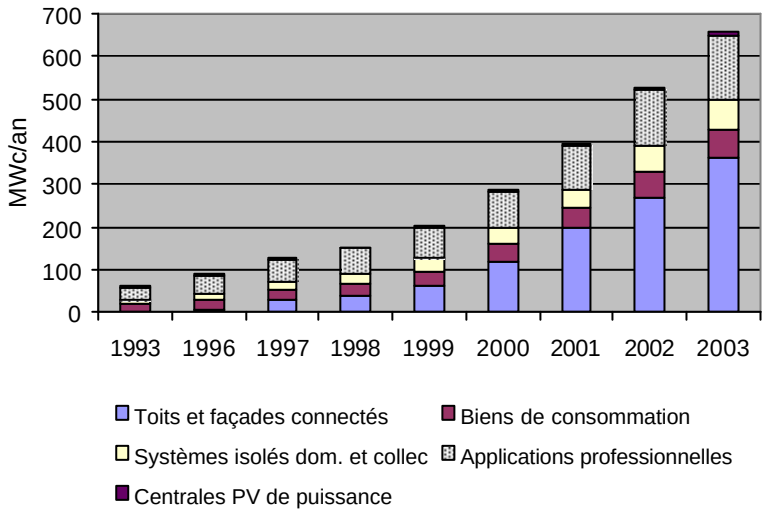
Historiquement, après les premières applications spatiales, le marché mondial du solaire PV, a réellement décollé à la suite des deux crises pétrolières de 1973 et 1979 lorsque la recherche de substituts aux énergies fossiles a été vue comme une priorité urgente. Ces deux premières phases, jusqu'aux années 1985, ont permis aux utilisations PV de sortir de la confidentialité (voir Figure 1). A partir de là, le marché niche, captif, des applications hors réseau, où le PV est compétitif, a joué un rôle important en permettant aux industriels de démontrer la maturité de cette technologie en consolidant

l'expérience dans la production et en dégageant des effets d'échelle (KEMP *et al.* [1998], JACOBSSON *et al.* [2002]). La poursuite de la croissance du marché du PV depuis 1995 résulte d'une autre logique. En effet, les programmes publics de soutien aux toits PV déjà évoqués ont permis de déclencher une nouvelle phase de croissance. Pour les applications en zones urbaines, la compétition avec l'électricité distribuée par le réseau est très défavorable au PV, puisqu'il vient se heurter au paradigme largement éprouvé de la production électrique centralisée. Cette phase a pour but d'aboutir à une large diffusion auprès du grand public. En soutenant le PV comme une technologie décentralisée, complémentaire du réseau électrique, elle pourrait servir de *« bridging market »* en permettant au marché du PV de se transformer en un marché de masse engendrant des rendements croissants d'adoption[327] de plus en plus nombreux (ARTHUR [1988, 1989], OLIVER et JACKSON [1999]).

1.1.1.3. Les tendances récentes du marché mondial du solaire PV installé

1.1.1.3.1. Le marché du solaire PV par types d'applications

Figure 2. Evolution du marché mondial du solaire PV par types d'applications
Source : à partir de MAYCOCK [2004]



[327] En particulier en accentuant les économies d'échelle dans la production, les externalités indirectes de réseau (biens et services complémentaires) et les rendements croissants informationnels.

Le segment des toits et façades PV connectés au réseau est devenu en moins d'une décennie le principal marché du solaire PV dans le monde. Compte tenu des bas prix de l'électricité distribuée par le réseau urbain, ce type d'application n'est pas compétitif et dépend exclusivement des programmes de soutien publics, à travers notamment les subventions et déductions fiscales à l'achat des installations et les tarifs de rachat de l'électricité. Plusieurs programmes très incitatifs ont été réalisés avec succès au début des années 1990 comme au Japon (en 1994 le *« Monitoring programme for residential PV systems »*, en 1997 le *« Programme for the development of the infrastructure for the introduction of residential PV systems »*), aux Etats-Unis (*« Million solar roof in 2010, »* en 1997), en Suisse (programme *« Energie 2000 »*) et en Allemagne (*« 1 000 roofs programme »* en 1990, puis *« 100 000 roofs programme »* de 1999 à 2003) (CE [2003]). Alors qu'elles étaient quasi inexistantes au début des années 1990, les nouvelles installations de toits solaires ont représenté 365 MWc en 2003. Ce secteur a connu une très forte progression moyenne annuelle de 109% entre 1993 et 2003 (MAYCOCK [2004]).

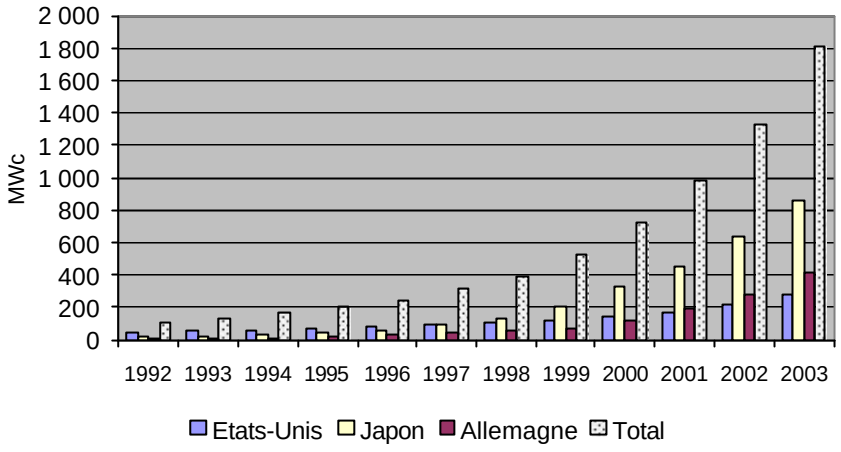
Avec 150 MWc, les applications PV professionnelles hors réseau représentent le deuxième marché. Ce segment connaît depuis longtemps maintenant une croissance relativement constante (+22% en moyenne annuelle entre 1993 et 2003). Il est largement solvable et captif, le plus souvent les alternatives au PV dans ces secteurs n'existent pas ou entraîneraient des coûts exorbitants.

Les systèmes isolés, domestiques et collectifs, affichent le deuxième plus fort taux de croissance annuel moyen (+32,5% entre 1993 et 2003). Ils représentent une option technologique fiable pour l'électrification rurale décentralisée dans les PED. Grâce à la qualité du service rendu, la diffusion des systèmes PV s'effectue sur une base commerciale privée dans les pays où les revenus des ménages ruraux le permettent. C'est le cas pour le Kenya ou l'Indonésie qui affichaient en 1999 une base installée de respectivement 3,2 et 28 MWc (IEA [2004a]). Toutefois, en moyenne compte tenu de la faible solvabilité des populations rurales, les financements de soutien des organisations internationales ou des compagnies d'électricité restent indispensables. Ce marché a un potentiel très élevé (15 à 20 GWc) et certains pays comme l'Inde, la Chine et la Thaïlande prévoient d'installer entre 250 et 450 MWc d'ici 2012 (UNDP [2004]).

1.1.1.3.2. La répartition actuelle et les prévisions de puissances PV installées

Figure 3. Puissance solaire PV installée cumulée (pays AIE)[328]

Source : à partir de IEA [2004a]

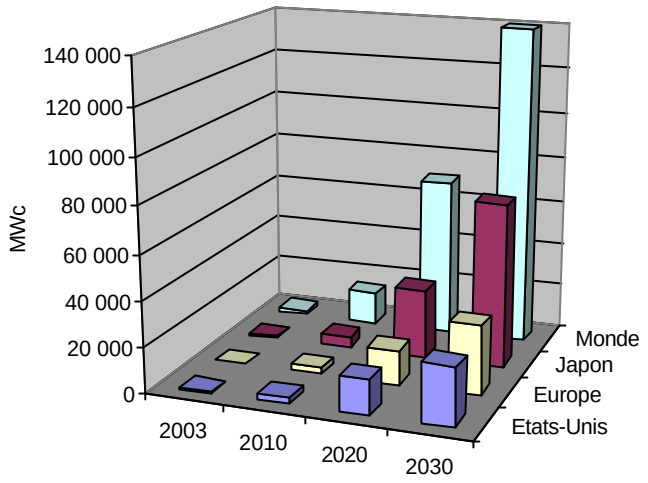


A la fin de l'année 2003, plus de 1,8 GWc de capacité solaire PV cumulée était installée dans les pays de l'AIE. Entre 1992 et 2003, celle-ci a connu une croissance moyenne annuelle de plus de 29%. Cependant, cette évolution au niveau global est à nuancer fortement puisqu'elle est surtout le fait de trois pays : le Japon, l'Allemagne et les Etats-Unis. Ces derniers représentaient à eux seuls plus de 85% de la puissance PV installée cumulée en 2003. La puissance des incitations (prêts et tarifs de rachat) expliquent le dynamisme de ces trois pays, essentiellement dans le segment des installations connectées au réseau[329].

[328] Australie, Autriche, Canada, Suisse, Danemark, Allemagne, Espagne, Finlande, France, Royaume-Uni, Israël, Italie, Japon, Corée, Mexique, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Suède, Etats-Unis.

[329] Voir *supra*.

Figure 4. Projections à moyen et long terme de la puissance solaire PV installée cumulée
Sources : à partir de CE [2003], IEA [2004a]



Les projections à moyen et long termes des puissances PV installées réalisées par l'Union européenne et l'Agence internationale de l'énergie à partir des objectifs nationaux actuels montrent des possibilités de croissance importantes (CE [2003], CE [2004], IEA [2004a]). Celles-ci tablent sur une poursuite des politiques publiques volontaristes et sur une poursuite de la baisse des coûts engendrée par la standardisation et les économies d'échelle. Au Japon, le programme « Advanced PV generation » engagé en 2001 par l'Organisation de développement des énergies nouvelles (NEDO-MITI) a fixé comme objectif 5 GWc installés en 2010. A plus long terme, le programme « New Sunshine Project » prévoit une base installée se situant entre 50 et 200 GWc en 2030. Pour l'Union européenne, même si les politiques sont hétérogènes au niveau des Etats-membres, la Directive 2001/77/CE sur la promotion des sources d'ER (CE [2001]) reprend les objectifs communs fixés par le Livre blanc de 1997 (CE [1997]) qui, concernant le solaire PV, s'élèvent à 3 GW en 2010[330]. A plus long terme, la Commission européenne prévoit des puissances cumulées de 15 et 30 GWc pour 2020 et 2030 (CE [2004]). Aux Etats-Unis, où existent également de fortes disparités dans les systèmes de soutien selon les Etats[331], le « National Photovoltaic Program » mis en œuvre par le Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) du département

[330] D'un côté ce chiffre est jugé plutôt ambitieux par le baromètre EurObserv'ER qui le ramène à 2 GWc (SYSTEMES SOLAIRES [2004a]), de l'autre il est vu comme réaliste et même augmenté à 4 GWc par l'Association de l'industrie photovoltaïque européenne (EPIA [2004]).

[331] Les Etats dans lesquels les systèmes de soutien sont les plus incitatifs sont la Californie, Hawaï, l'Illinois, New York et la Caroline du Nord (CE [2003]).

de l'énergie (DOE), et le Centre national pour le photovoltaïque (NCPV) prévoit une base installée de 3 GWc en 2010, 15 GWc en 2020 et 25 GWc en 2030 (NREL [2003]).

Il résulte de ces prévisions s'appuyant sur des scénarii «hauts », qu'au niveau mondial la puissance PV installée pourrait être multipliée quasiment par 8 entre 2003 et 2010 (14 Gwc) et par 10 entre 2010 et 2030 (140 GWc). On peut noter toutefois que ces hypothèses ne retiennent pas une forte diffusion du solaire PV dans les PED puisque, selon elles, en 2030 les puissances du Japon, de l'Europe et des Etats-Unis représenteraient plus de 90% de la puissance installée mondiale

1.2. La compétition technologique dans le secteur solaire PV

D'un point de vue scientifique le principe de l'effet PV est connu depuis longtemps. Théoriquement, celui-ci peut être obtenu à partir de différents matériaux semi-conducteurs. Toutefois à l'heure actuelle, un seul, le silicium cristallin, est employé pour la quasi-totalité des cellules fabriquées à l'échelle industrielle alors que, de l'avis des experts, la technologie concurrente, dite des cellules en « couches minces », est porteuse de potentialités technico-économiques supérieures. En nous appuyant sur les concepts de l'analyse évolutionniste des situations de compétition technologique nous analyserons la situation de verrouillage sur la technologie des cellules au silicium cristallin et les caractéristiques de la technologie concurrente.

1.2.1. Le principe de l'effet PV

Le principe de l'effet PV a été décrit en 1839 par BECQUEREL, EINSTEIN en a expliqué le mécanisme en 1912, mais la première cellule solaire n'a été mise au point aux Etats-Unis qu'en 1954 par les laboratoires de Bell Telephone. L'effet PV utilisé dans les cellules solaires pour transformer directement des rayons solaires en électricité implique la production et le transport de charges électriques et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (voir ANNEXE 6).

La performance d'une cellule PV traduit sa capacité à transformer l'énergie solaire en électricité. Son rendement est égal au rapport entre la puissance électrique qu'elle fournit et la puissance lumineuse qu'elle reçoit. La puissance d'une photopile est définie par convention en watts crête (Wc) (ou *watt peak, Wp)* : c'est la puissance

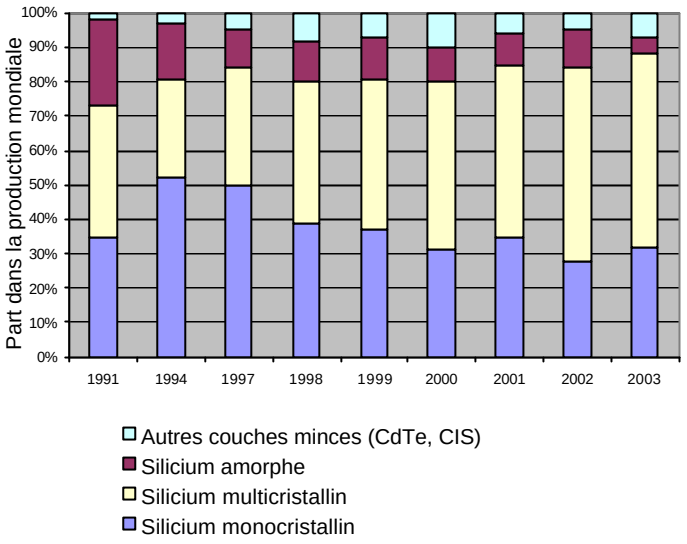
maximale qu'elle peut fournir sous un ensoleillement de 1 000 W/m^2 à une température constante de 25°C (RICAUD [1997]).

La cellule individuelle, unité de base d'un système PV, ne produit qu'une très faible puissance électrique, de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou un panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, alors que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés actuellement sont composés de 36 cellules connectées en série pour des applications de 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnel à la surface du module. L'interconnexion de deux modules, en série ou en parallèle, afin d'obtenir une puissance plus grande, constitue un champ PV. Un générateur PV se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble appelé *« balance of system »* (BOS) comprend tous les équipements entre le champs de modules et la charge finale, c'est-à-dire une structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules et le câblage. Si le système est connecté au réseau électrique, il comprend un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif. L'électricité produite peut également être stockée sur des batteries. Un régulateur charge les batteries quand l'ensoleillement le permet et alimente l'utilisation dès que nécessaire. Dans les applications isolées le stockage permet de pallier l'intermittence jour/nuit, les mauvaises conditions météorologiques et de répondre à des besoins de puissance supérieurs à ceux que pourraient fournir instantanément le générateur PV.

1.2.2. La répartition des technologies PV dans la production de cellules

Théoriquement plusieurs types de matériaux semi-conducteurs peuvent être employés pour fabriquer des cellules PV. Actuellement la compétition sur le marché du solaire PV concerne deux grands types de trajectoires technologiques (RICAUD [1997], JAGER-WALDAU [2004]) : d'une part le silicium cristallin (c-Si), qu'il soit monocristallin (mono c-Si) ou multicristallin (poly c-Si), d'autre part la technologie « en couches minces » pouvant être employée avec plusieurs types de matériaux dont le silicium amorphe (a-Si), le tellurure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), le silicium en ruban…

Figure 5. Evolution de la production mondiale de cellules PV par technologie (en %)
Sources : à partir de SYSTEMES SOLAIRES [2000a, 2001a, 2002a, 2003a, 2004a]



L'évolution de la part de chaque technologie dans la production mondiale de cellules est depuis longtemps marquée par une forte domination des technologies utilisant le silicium (mono et multi) cristallin comme matériau de base. Celui-ci, après une domination constante depuis le début des années 1990, a été utilisé en 2003 pour 88% des cellules PV fabriquées, ce qui s'apparente à une situation de quasi-monopole technologique (ARTHUR [1988, 1989]). La technologie alternative en couches minces qui comptait pourtant pour 27% de la production en 1991, n'a pas cessé de décroître depuis. La baisse de la part du silicium amorphe, de 25% en 1991 à 5% en 2003, n'a pas été compensée par une augmentation des autres filières en couches minces qui représentaient seulement 7% de la production totale en 2003.

1.2.3. Le *lock-in* technologique de la filière « silicium cristallin »

La fabrication des premières cellules PV au silicium cristallin est intervenue à la suite des commandes publiques effectuées par la NASA en 1958 pour équiper le satellite Vanguard I. Comme dans le cas des commandes militaires de réacteurs nucléaires aux Etats-Unis étudié par COWAN [1990], les commandes de la NASA correspondent aux premiers «évènements » qui ont mis en mouvement un processus déterministe focalisant la poursuite des recherches et des apprentissages sur la trajectoire technologique du silicium cristallin (ARTHUR [1989]). Egalement, comme ISLAS [1997] et WATSON [2004] ont montré le rôle déterminant de la proximité

technologique des turbines à gaz et des moteurs d'avions, la « première génération » de photopiles s'est directement constituée grâce à sa proximité technologique avec l'industrie électronique, ce qui a très tôt entraîné une forte dépendance du sentier et des rendements croissants d'adoption (MENANTEAU [2000a, 2000b]). En effet, le silicium cristallin est également le matériau de base de tous les composants micro-électroniques. L'industrie PV a pu ainsi immédiatement bénéficier au départ de la base de connaissances techniques de l'industrie électronique. En utilisant les rebus de silicium (têtes et queues de lingots) produits par le secteur électronique, la filière PV a profité en même temps d'une source d'approvisionnement en matière première relativement abondante et à un prix peu élevé[332]. La recherche de l'efficience maximale a d'abord orienté les activités de R&D vers la technologie au silicium monocristallin, avant que les contraintes de coût conduisent à développer celle au silicium multicristallin.

1.2.3.1. Les cellules au silicium monocristallin : un procédé long et coûteux

Les cellules PV sont fabriquées soit à partir du silicium de qualité « électronique » et de ses « déchets », mais de moins en moins aujourd'hui, soit à partir de silicium de qualité « solaire » produit exclusivement pour l'industrie solaire (entre 12 et 15 Kg de silicium/kW). Les cellules monocristallines sont réalisées à partir d'un lingot de silicium lui-même tiré à partir de silicium liquide (RICAUD [1997], GREEN [2000], MENANTEAU [2000a, 2000b], CEA [2001], CLAVERIE [2001], JESTER [2002]). Selon le procédé classique dit de CZOCHRALSKI[333] le tirage d'un lingot cylindrique de 10 cm d'épaisseur et de un mètre de longueur demande en moyenne une dizaine d'heures et consomme jusqu'à 100kWh d'électricité par kilogramme. Le lingot est ensuite découpé en plaquettes (*wafers*) d'une épaisseur de 200 à 300 µm, pour une surface de 15 cm^2. La découpe des plaquettes par une scie à lame est très longue et très coûteuse puisqu'elle entraîne la perte de la moitié du matériau. Les plaquettes reçoivent après différents traitements (décapage, dopage, anti-reflet), la pose des contacts électriques,

[332] Le silicium de qualité « électronique » permet, après un processus de purification ou non, de fabriquer des cellules PV. Le silicium de qualité « solaire », plus pur, permet de fabriquer des cellules aux rendements plus élevés.

[333] Un germe monocristallin trempé à la surface d'un bain de silice faiblement surchauffé contenu dans un creuset en silice, est tiré à vitesse continue. La solidification reproduit le motif du germe (CEA [2001]).

puis elles sont interconnectées et encapsulées dans un module. Les cellules monocristallines ont un coût de fabrication élevé, compte tenu du nombre important de manipulations qu'elles nécessitent, mais elles présentent à ce jour les meilleurs rendements de conversion (14-16 % en moyenne pour les cellules commercialisées – voir le Tableau 1).

1.2.3.2. Les cellules au silicium multicristallin : la recherche d'une diminution des coûts

Afin de rechercher une baisse des coûts de fabrication, tout en continuant à utiliser du silicium cristallin, le coulage d'un silicium multicristallin a été développé (RICAUD [1997], GREEN [2000]). Le procédé est basé sur la fusion de silicium dans des creusets en silice puis un coulage dans des moules carrés ou rectangulaires. Après solidification, les blocs de silicium sont découpés en lingots, puis en plaquettes. Ce procédé n'est pas beaucoup plus rapide que celui du silicium monocristallin, mais il est moins complexe à maîtriser et permet de diminuer les coûts de production des lingots de moitié (35$/kg pour le silicium multicristallin contre 66 $/kg pour le monocristallin selon MENANTEAU [2000a, 2000b]). Cependant, les cellules multicristallines affichent un rendement moyen (12-14%) plus faible que les monocristallines, ce qui vient en partie annihiler les économies permises par ce processus de fabrication.

Au cours des vingt dernières années, les baisses de coûts ont été recherchées et obtenues sur l'ensemble des étapes de fabrication communes aux cellules au silicium cristallin. Selon RICAUD [1997] l'utilisation de la scie à fil a constitué une innovation notable dans la production des cellules. Celle-ci a permis d'améliorer considérablement la productivité du sciage tout en économisant du matériau[334]. D'autres innovations incrémentales issues d'apprentissages par la pratique ont également eu lieu : la pose des contacts électriques par sérigraphie a remplacé la technique coûteuse d'évaporation sous vide ; l'épaisseur des tranches de silicium a été diminuée ; de plus en plus d'opérations sont désormais réalisées en série sur des chaînes de fabrication automatisées, diminuant les étapes et le nombre d'opérateurs nécessaires. En outre, afin d'accélérer la fabrication

[334] La scie à fil a permis la production de 24 plaquettes par centimètre de lingot (contre 16 avec une scie traditionnelle) (RICAUD [1997]).

des lingots, les industriels[335] ont récemment développé des méthodes de coulée en continue du silicium dans des creusets froids (CEA [2001]). Il est ainsi possible d'obtenir en continu des lingots de grande dimension (35 cm² de section pour 3 m de longueur) ayant une structure cristalline compatible avec les applications photovoltaïques. Ce type de procédé apporte plusieurs avantages : il maintien un degré élevé de pureté du silicium ; la productivité est dix fois supérieure au procédé classique ; l'homogénéité du lingot permet d'obtenir des cellules au rendement de conversion très ciblé ; la quantité d'énergie consommée pendant le processus est réduite de 10 à 20%.

1.2.3.3. La technologie concurrente : les cellules PV en couches minces

Seule concurrente au silicium cristallin, la technologie des cellules PV en couches minces est basée sur un procédé radicalement différent. Historiquement, elle est considérée comme la « deuxième génération » de cellules, bien que les premiers résultats des recherches concernant les procédés en couches minces ne soient intervenus que peu de temps après celles au silicium cristallin[336]. Ce type de cellule constitue une technologie dont la trajectoire reste encore largement à explorer, notamment de par la variété des matériaux qui peuvent être employés (JAGER-WALDAU [2004]). Les cellules en couches minces sont composées d'un support en verre, en acier ou en matière synthétique sur lequel est déposé une très fine couche de matériau. La très faible consommation de matière (1 à 2 µm contre 200 à 300 µm pour les cellules cristallines) et le coût peu élevé du support font que cette technologie est vue depuis longtemps comme celle qui pourrait permettre au solaire PV d'atteindre les seuils de compétitivité par rapport aux énergies conventionnelles (BULLETIN SCARABEE [2004]). Le silicium cristallin de par sa structure naturelle n'est pas adapté pour les couches minces, c'est pourquoi de nombreux efforts de recherche ont été entrepris sur un grand nombre de matériaux depuis une quarantaine d'années afin d'obtenir des cellules alliant un bon rendement de conversion et un faible coût. Le silicium amorphe (a-Si) et le tellurure de

[335] Notamment la société Emix en France.

[336] La première publication scientifique concernant les cellules PV en couches minces est intervenue en 1954.Ce type de cellules a également été initialement utilisé par l'industrie spatiale dans les années 1960, puis pour les applications terrestres dans le courant des années 1970 (KAZMERSKI [1997]).

cadmium (CdTe) sont les deux matériaux qui ont été les plus étudiés et qui ont fait l'objet d'une industrialisation (JAGER-WALDAU [2004]).

Le silicium non cristallisé sous sa forme amorphe présente plusieurs avantages (MULLER et DESSERRIERES [2001]) : il possède un fort coefficient d'absorption, ce qui permet des épaisseurs minimales de l'ordre du micron, une faible consommation énergétique durant le cycle de production (son temps de retour énergétique est inférieur à un an) et une aptitude à être déposé sur de grandes surfaces unitaires (de l'ordre du mètre carré). Les cellules PV au silicium amorphe ont trouvé leurs premiers débouchés dans les années 1980 pour des applications grand public de petites tailles (calculettes, lampes…), puis dans les années 1990 des applications ont été développées en coopération avec des professionnels du bâtiment, sa souplesse permettant d'en faire un tissu facilement intégrable (tuiles, toitures, éléments de façade). Malgré ces efforts de développement, la diffusion des cellules au silicium amorphe est en régression ces dernières années (voir Figure 5). Celui-ci souffre en effet de deux principales limitations majeures par rapport au silicium cristallin que les premières applications en lumière artificielle avaient permis de dissimuler : son rendement de conversion est limité pour des surfaces significatives et sa structure vieillit prématurément une fois exposée à la lumière naturelle.

Même si l'incertitude est forte, les recherches sur les couches minces restent très ouvertes. De nouveaux principes physiques concernant de nouveaux polymères et molécules ont été découverts ces dernières années. Comme cela a été le cas pour le silicium cristallin avec l'industrie électronique, les filières des couches minces pourraient bénéficier de fortes interrelations technologiques avec le secteur des diodes électroluminescentes organiques utilisées pour les écrans de téléphones portables, la physique de ces diodes étant la même que celle des cellules PV (BIRRAUX et LE DEAUT [2001]). Plusieurs types de matériaux restent encore à étudier.

Jusqu'à une période récente la filière des cellules en couches minces au tellurure de cadmium était considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses du point de vue des baisses potentielles des coûts, grâce aux possibilités d'automatisation de la fabrication, et des rendements assez élevés qu'elle pourrait atteindre. Mais le cadmium, composé organique très dangereux, pourrait engendrer des problèmes de pollution et des coûts de recyclage importants ce qui compromettrai une diffusion à grande échelle (FTHENAKIS [2000], JAGER-WALDAU [2004], TSOUTSOS *et al.* [2005]).

La technologie au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS), bien que contenant également du cadmium, mais en quantité limitée, fait l'objet de beaucoup d'intérêts grâce aux rendements élevés qu'elle pourrait permettre d'atteindre (MULLER et DESSERRIERES [2001], CEA [2004]). Le silicium mono ou multicristallin en couches minces (5 à 20 µm d'épaisseur) semble être également une approche prometteuse. Cette solution pour réaliser à faible coût des cellules PV consiste à prélever dans une plaquette de silicium un film de quelques dizaines de microns et à le rapporter sur un support à faible coût comme le verre ou la céramique. De cette manière n'est utilisée que la quantité de silicium strictement nécessaire au fonctionnement de la cellule, ce qui permet d'éviter les pertes liées au sciage. Cette technologie permet en outre de bénéficier des apprentissages et de la maîtrise technologique déjà acquis sur cette filière.

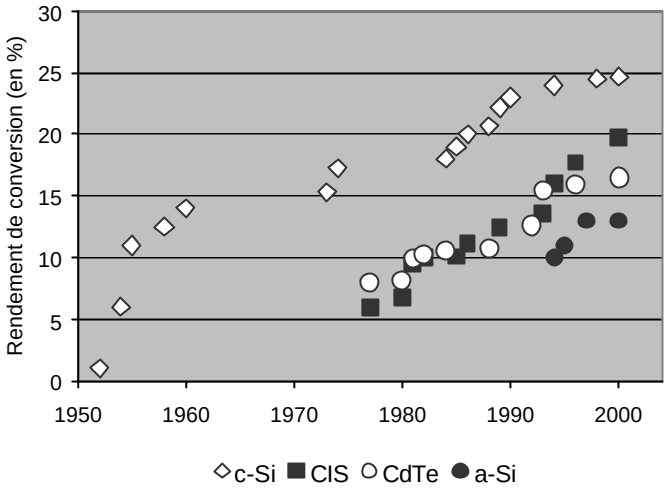
D'autres technologies, n'ayant pas encore dépassé le stade de la recherche fondamentale, pourraient connaître des développements et constituer à long terme une « troisième génération » de cellules PV : on peut citer les cellules organiques, qui comprennent les cellules « humides » dites « de GRÄTZEL » et les « cellules plastiques » utilisant des polymères organiques peu onéreux, et les cellules à plusieurs couches minces (phosphore d'indium et de gallium/germanium) (JOURDE [2001], BULLETIN SCARABEE [2004]).

La technologie en couches minces utilise de faibles quantités de métaux rares (cadmium, indium, gallium, sélénium), sous-produits de l'industrie minière, pour lesquels aucune contrainte d'approvisionnement ne se pose actuellement. A plus long terme, si leur disponibilité quantitative est assurée, en devenant des co-produits, leur prix pourrait toutefois augmenter devant un fort accroissement de la demande (ANDERSSON et JACOBSSON [2000]).

1.2.4. L'évolution des performances

Les innovations incrémentales dans les procédés de production que nous avons précédemment évoqué ont été suivies par des perfectionnements, souvent issus de l'industrie électronique, sur les cellules elles-mêmes (texturation des surfaces, amélioration de la cristallisation…).

Figure 6. Progression des rendements maxima en laboratoire par technologie PV
Sources : à partir de ANDERSSON et JACOBSSON [2000], SYSTEMES SOLAIRES [2002a]



Les rendements maxima obtenus en laboratoire selon les technologies ont très fortement progressé depuis la mise au point des premières cellules dans les années 1950. Les rendements maxima des cellules au silicium en laboratoire ont franchi les 27% ces dernières années, après avoir longtemps stagné entre 20 et 25%. Le rendement moyen des cellules multicristallines commercialisées pour les applications en grandes surfaces reste le plus élevé (14-16%), celui des cellules monocristallines est proche mais systématiquement inférieur (12-14%). Les cellules au silicium amorphe commercialisées demeurent nettement moins performantes (6-8%), bien que leur rendement théorique soit assez élevé (25%), ce qui les confine à des applications pour lesquelles la puissance n'est pas la priorité. Les cellules les plus efficientes sont celles en couches minces à base d'arsénure de gallium (GaAs), encore non évoquées car elles ne font l'objet que d'une production très restreinte destinée uniquement aux utilisations spatiales.

Tableau 1. Rendements de conversion des différentes technologies de cellules PV en 2002
Source : SYSTEMES SOLAIRES [2002a]

Technologie	Rendements de conversion			Domaines d'application
	Théorique	Laboratoire	Commercialisées	
Silicium monocristallin (mono c-Si)	27,0 %	24,7 %	14,0 – 16,0 %	Modules de grande dimension pour toits et façades, appareils de faible puissance
Silicium multicristallin (multi c-Si)	27,0 %	19,8 %	12,0 – 14,0 %	Modules de grande dimension pour toits et façades, générateurs de toutes tailles
Arsénure de gallium (GaAs)	29,0 %	25,7 %	18,0 – 20,0 %	Systèmes de concentrateur, satellites
Silicium amorphe (a-Si)	25,0 %	13,0 %	6,0 – 8,0 %	Appareils de faible puissance, modules intégrés aux bâtiments
Diséléniure de cuivre et d'indium (CIS)	27,5 %	18,2 %	10,0 – 12,0 %	Appareils de faible puissance, modules intégrés aux bâtiments
Tellurure de cadmium (CdTe)	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grande dimension (bâtiments)

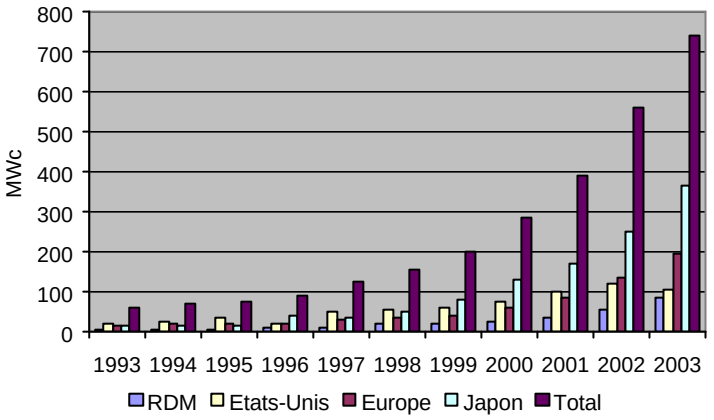
Les marges de progression des rendements de conversion des différentes technologies PV sont aujourd'hui incertaines. Certaines technologies sont assez proches de leur rendement théorique, c'est le cas du silicium monocristallin et de l'arsénure de gallium, d'autres, comme le silicium amorphe et le tellurure de cadmium, en sont encore éloignées. Compte tenu de l'incertitude et de la faible maîtrise concernant certaines technologies, peu d'études techniques se risquent aujourd'hui à avancer des projections précises sur les rendements que les différentes technologies PV seraient susceptibles d'atteindre dans le futur. Cependant, en l'absence de la survenance d'une innovation radicale à moyen terme, il ressort des prévisions disponibles que la filière au silicium cristallin devrait atteindre en moyenne des rendements de 20% à moyen terme (2010-2015) et de 30% à plus long terme (2020-2030). Les filières en couches minces pourraient afficher des rendements moyens de 15% à moyen terme, et supérieurs à 20% à plus long terme (EPIA [2004], JAGER-WALDAU [2004], VAN DER ZWANN et RABL [2004]).

1.3. La dynamique technologique et industrielle de l'industrie solaire PV

Dans un premier temps, ce paragraphe a pour but d'appréhender les évolutions rétrospectives et prospectives des quantités et des prix relatifs au solaire. Nous aborderons ensuite les politiques publiques et les stratégies des acteurs de la filière PV afin de déterminer dans quelle mesure ils sont susceptibles de renforcer le *lock-in* actuel ou, au contraire, d'aller vers une diversification technologique.

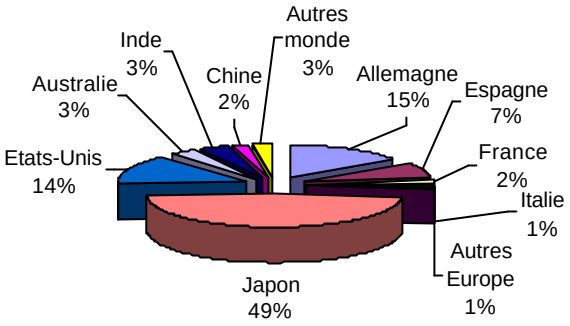
1.3.1. La localisation et l'évolution de la production annuelle de cellules PV

Figure 7. Localisation et production annuelle de cellules PV
Sources : à partir de MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]



Dans son ensemble l'industrie PV connaît une croissance remarquable ces dernières années. En 2003, 764 MWc de cellules PV ont été fabriqués, contre 558 MWc en 2002, ce qui représente une croissance de 36,9%. Durant les dix dernières années, le niveau de la production mondiale a été multiplié par plus de onze, soit une croissance annuelle moyenne de 31%. Le Japon, où 48% des cellules ont été produites en 2003, est le premier producteur, suivi par l'Europe (26,5%) qui a supplanté les Etats-Unis (14,3%). Dans le reste du monde, trois autres pays disposent de capacités de production non négligeables : l'Australie (26,2MWc), l'Inde (26,1MWc) et la Chine (15MW) (SYSTEMES SOLAIRES [2004a]). Dans ces trois pays les capacités de production s'expliquent par des marchés d'électrification rurale décentralisée très développés, alors qu'au Japon, en Europe et aux Etats-Unis ce sont les applications reliées au réseau qui dominent.

Figure 8. Répartition de la production mondiale de cellules PV en 2003
Source : à partir de SYSTEMES SOLAIRES [2004a]



Au plan mondial, par rapport à 2002, on peut observer un net retrait de la production des Etats-Unis (-6,6 MWc), un renforcement des capacités de production au Japon (+118,2 MWc), en Europe (+61,3MWc), en Australie (+16,5 MWc) ainsi qu'en Chine (+7,3 MWc). Dans l'Union européenne, l'Allemagne a accentué sa place de premier producteur avec un quasi doublement de la production (59 MWc en 2002 contre 115,3 MWC en 2003). La production de l'Espagne est moins spectaculaire avec +6,1 MWc (soit 56,2 MWc en 2003), la production française est restée stable avec 17,6 MWc, tandis que la production de l'Italie a connu une nette contraction de –25,9%, avec seulement 4,3 MWc produits.

1.3.2. Evolution des apprentissages et de la compétitivité du solaire PV

Dans les points suivants nous appliquerons la méthodologie des courbes d'apprentissage dans le but d'analyser de manière rétrospective et prospective l'évolution des quantités et des prix du solaire PV.

1.3.2.1. La courbe d'apprentissage : aspects méthodologiques

Comme nous avons pu l'observer les rendements de conversion des cellules PV sont en constante augmentation depuis la naissance de cette industrie. Dans une optique évolutionniste de l'innovation, ces améliorations n'apparaissent que progressivement sous l'effet des processus dynamiques des apprentissages par la pratique, par l'usage et par interaction entre les fabricants et les utilisateurs (ARROW [1962b], ROSENBERG

[1982], LUNDVALL [1988]). L'ensemble de ces apprentissages peut être traduit à l'aide de la courbe d'apprentissage (ou courbe d'expérience). Mise en pratique en management stratégique par le Boston Consulting Group (BCG [1968]), celle-ci a été initialement développée par WRIGHT [1936] dans une étude de l'industrie aéronautique afin de mettre en évidence la diminution du nombre d'heures de travail nécessaires en fonction de l'augmentation des volumes de production. Depuis, les courbes d'apprentissage sont employées dans de nombreux secteurs industriels, dans une approche rétrospective pour rendre compte de la relation empirique entre les coûts et les volumes de production cumulée, ainsi que dans une approche prospective afin d'établir des prévisions de décroissance des coûts à moyen et long termes. Récemment, les courbes d'apprentissage ont connu un regain d'intérêt dans le secteur des énergies renouvelables en tant qu'instrument supplémentaire permettant d'orienter et d'évaluer les politiques publiques technologique et énergétique (IEA [2000a], MC DONALD et SCHRATTENHOLZER [2001], NEIJ *et al.* [2003]). NEIJ [1997] et JENSEN *et al.* [2002] soulignent la pertinence d'appliquer les courbes d'apprentissage aux technologies des énergies renouvelables, comme les panneaux solaire PV et les éoliennes, car les équipements concernés sont homogènes, ce qui permet de rechercher des diminutions incrémentales de coûts par une production en série, et bénéficient de conditions de marché stables[337] assurant une diffusion continue.

Les courbes d'apprentissage mettent en relation l'évolution du coût de production unitaire (ou du prix) d'un bien et l'évolution de sa production cumulée dans le temps. L'allure générale d'une courbe d'apprentissage est de la forme d'une exponentielle en échelle décimale ou d'une droite en échelle logarithmique. On peut la noter sous la forme : $c_t = c_0 \left(v_t / v_0 \right)^{-a}$ où c_t est le coût unitaire de production à la période *t*, c_0 le coût unitaire à la période de base 0, v_t la production cumulée à la période *t*, v_0 la production cumulée à la période 0 et a le paramètre d'apprentissage. A chaque doublement de la production cumulée, les coûts diminuent d'une valeur exprimée par le coût initial multiplié par un facteur dénommé le ratio de progrès

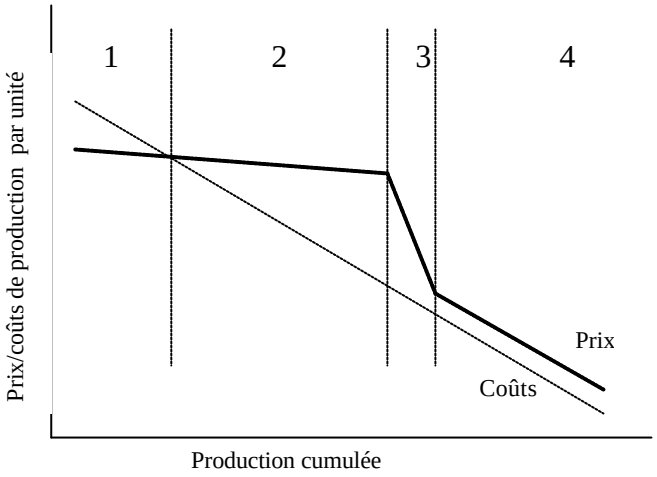
[337] Pour le solaire et l'éolien compte tenu des différences dans les niveaux de soutien des politiques publiques au plan international on peut faire l'hypothèse que les marchés les plus dynamiques et réguliers compensent les marchés nationaux plus erratiques.

$rp = 2^{-a}$. A chaque doublement de la production cumulée les coûts vont diminuer selon un taux d'apprentissage de $Ta = 1 - rp$. Ainsi un taux d'apprentissage de 30% (ratio de progrès de 0,70) signifie que les coûts diminuent de 30% à chaque doublement de la production cumulée[338].

Comme le suggère NEIJ [1997] les courbes d'expérience ne doivent pas être considérées comme une théorie établie et fixe. Elles représentent plutôt une méthode ayant l'avantage de pouvoir s'adapter à différents types d'approches ou d'observations empiriques. Par exemple les différents types de coûts pris en compte pour le calcul du *Ta* ne sont pas fixes, même si habituellement on se réfère aux coûts du capital, du travail, de la recherche et développement (R&D), du marketing, etc… Il en est de même pour les variables retenues pour calculer la baisse des coûts : on peut s'appuyer sur les changements intervenus dans le *process* de fabrication (les innovations de procédés, les effets d'apprentissage et les économies d'échelle), sur les caractéristiques du produit lui-même (innovations de produits, standardisation) et/ou sur la baisse du prix des inputs (matières premières). Toutefois, la difficulté qui se pose est de disposer de séries fiables concernant l'évolution des coûts. Pour les énergies solaire PV et éolienne, les séries de données publiées portent essentiellement sur les prix de ventes des modules (ou des systèmes solaires) et des éoliennes, et non sur les coûts pour lesquels n'existent que des données ponctuelles ou de courtes périodes. La courbe d'expérience basée sur les prix est couplée à celle basée sur les coûts, mais s'en différencie car elle reflète la structure de marché, les stratégies de prix menées par les producteurs, le pouvoir de négociation des investisseurs, ainsi que les réactions du marché aux politiques publiques (R&D, subventions) (BCG [1968], IEA [2000a]).

[338] En cas d'augmentation des coûts le taux d'apprentissage est inférieur à 0.

Figure 9. Courbe d'expérience prix/quantités et diffusion du produit
Source : IEA [2000a]



De façon stylisée, et similairement à la notion de cycle de vie de la technologie que nous avons précédemment évoqué, la relation entre la courbe d'expérience des prix et celle des coûts peut être décrite pour l'ensemble du cycle de diffusion d'une nouvelle technologie (ABERNATHY et UTTERBACK [1978], GORT et KLEPPER [1982], KLEPPER [1996]). Quatre phases sont distinguées (voir la Figure 9) (BCG [1968], IEA [2000a]) : (1) dans la phase de R&D, les efforts se concentrent sur la conception et les performances de la nouvelle technologie, le premier producteur fixe son prix en dessous de ses coûts afin d'établir le marché ; (2) Bénéficiant d'un pouvoir de marché, il maintient le niveau de ses prix alors que ses coûts diminuent (*« price umbrella »*), et de nouvelles firmes entrent sur le marché avec des coûts plus élevés. Jusqu'alors généralement le *Ta* est de 10%. (3) Par effet d'apprentissage des procédés de production les nouveaux entrants vont diminuer leurs coûts de production, ce qui déplace la compétition des performances techniques vers les prix, les prix diminuant plus vite que les coûts (*« shake out »*). Dans cette phase les taux d'apprentissage peuvent être variables, mais se situent aux alentours de 40%. (4) Dans la dernière phase le marché se stabilise, les marges des producteurs se réduisent, le rythme de la baisse des prix suit celui de la baisse des coûts et les deux courbes d'apprentissage deviennent équivalentes.

A partir d'une revue de nombreuses études sur différentes technologies, NEIJ [1997] établit une sorte de *benchmark* en différenciant trois catégories de technologies et de *Ta* moyens en fonction du degré d'économies d'échelle qu'elles représentent : (i) les courbes d'expérience des installations « grande échelle », comme les centrales nucléaires ou les centrales à charbon, avec selon les cas des *Ta* négatifs, pour celles dont

les effets d'expérience ont été souvent compensés par des hausses de coûts[339] ; (ii) les unités permettant une production de masse (industrie électronique) avec des Ta moyens de 20% ; (iii) les unités de production «en continu » (raffineries, produits chimiques) dont les Ta moyens sont supérieurs à 22%.

MC DONALD et SCHRATTENHOLZER [2001] ont étudié les taux d'apprentissage de 42 technologies de l'énergie. La fréquence de distribution pour l'ensemble des technologies montre que près de la moitié des taux calculés se situent dans l'intervalle entre 14 et 22%, un petit groupe de technologies se situe aux alentours de 5%, le taux le plus élevé atteint 33% et un taux est négatif. Les effets d'expérience progressent rapidement au début du processus de diffusion des nouvelles technologies lorsque les volumes produits sont faibles, alors qu'ils sont beaucoup plus difficiles à atteindre pour des technologies déjà établies et pour lesquelles un doublement de la production nécessite des volumes de production beaucoup plus importants.

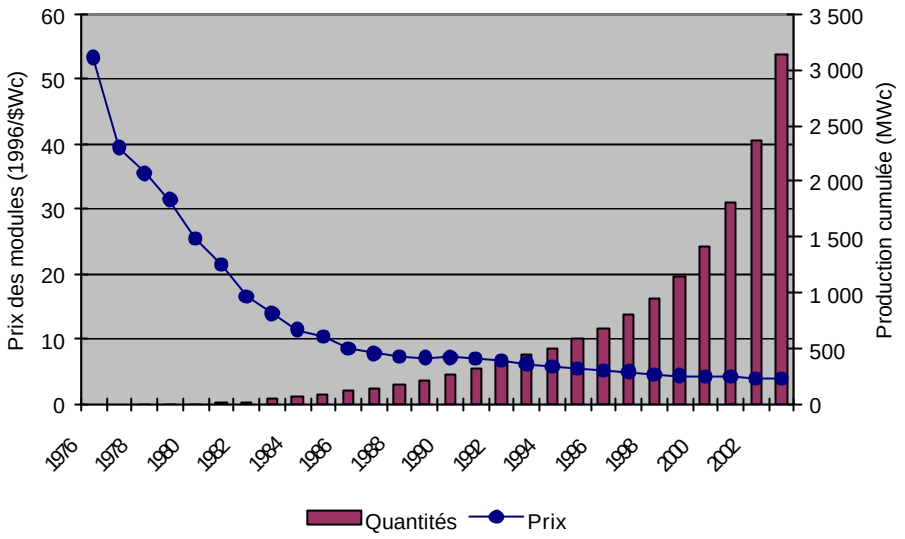
1.3.2.2. Courbe d'apprentissage du solaire PV : analyse rétrospective

Concernant le solaire PV, au niveau mondial les statistiques publiées ne portent que sur les prix de vente, que ce soit pour les modules (hors éléments de système et coûts d'installation) ou pour les systèmes. Dans un premier temps, dans le but de construire et donner une appréciation de la courbe d'apprentissage du solaire PV, nous avons reconstitué à partir de plusieurs sources une série longue mettant en parallèle les prix de vente et les quantités mondiales de modules solaires PV produites de 1976 à 2003 (ANNEXE 7) (MARGOLIS [2002], MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]).

[339] Les recherches permanentes pour améliorer la sécurité afin de réduire les risques d'accidents et les risques de dommages environnementaux n'ont pas entraîné (ou peu) de baisse des coûts.

Figure 10. Evolution du prix moyen et des quantités de modules PV (1976-2003)

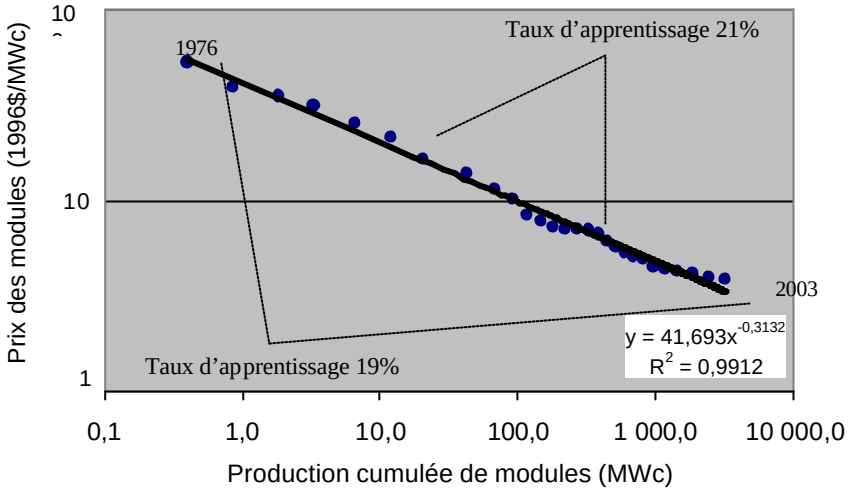
Sources : à partir de MARGOLIS [2002], HAAS [2004], MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]



On peut observer sur la Figure 10 que la baisse du prix des modules PV est très importante sur la première partie de la période considérée, alors que les quantités produites annuellement n'excèdent pas 100 MWc. En effet, le prix moyen des modules PV, que l'on peut considérer comme des prototypes en début de période, a été divisé par plus de six entre 1976 et 1986, passant de 53,3 à 8,5 $/Wc à 1986. Dans la deuxième moitié de la période, le rythme de la baisse se ralentit nettement : de 1986 à 2003 le prix moyen des modules a été divisé par plus de deux, pour passer récemment sous la barre des 4$/Wc et atteindre les 3,9 $/Wc (MARGOLIS [2002], HAAS [2004], MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]). Dans le même temps, la production annuelle de modules a fortement augmenté et connaît ces dernières années une croissance sans précédent.

La courbe d'expérience (log-log) construite à partir des mêmes données affiche un ratio de progrès de 0,81, ce qui signifie que le prix moyen des modules a baissé de 19% (taux d'apprentissage) à chaque doublement de la production cumulée entre 1976 et 2003. La prise en compte d'une section particulière de la courbe peut par contre révéler des effets d'expérience plus élevés, comme de 1976 à 1991 où le taux d'apprentissage est de 21%.

Figure 11. Courbe d'apprentissage (log-log) des modules PV (1976-2003)
Sources : à partir des données de MARGOLIS [2002], HAAS [2004], MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]



Le *Ta* de 19% correspond à celui d'un bien produit en série et se situe en outre dans l'intervalle de distribution de la majorité des technologies de l'énergie (MC DONALD et SCHRATTENHOLZER [2001]). Par contre ce taux est inférieur de quelques points à la majorité des derniers résultats publiés prenant en compte les chiffres de l'ensemble du marché mondial du solaire PV. Ces derniers, s'appuyant pour les plus récents sur des séries s'arrêtant à 1998, se rejoignent sur un taux d'apprentissage moyen compris entre 20 et 22% (NEIJ [1997], HARMON [2000], VAN DER ZWAAN et RABL [2004]).

Il semblerait donc que la prise en compte des dernières années jusqu'en 2003 fasse apparaître un essoufflement des effets d'expérience. Le ralentissement de la décroissance des prix des modules PV à la fin des années 1980 (voir la Figure 11) est intervenu alors que la technologie, dans son cycle, n'avait pas encore atteint le stade de la maturité. La forte augmentation de la production, les effets d'échelle et l'apprentissage par la pratique devraient au contraire marquer une accentuation de la pente de la courbe d'apprentissage. On peut interpréter ce ralentissement de la décroissance des prix essentiellement comme un début d'épuisement des effets d'apprentissage de la trajectoire du silicium cristallin qui vient se heurter aux limites de ses procédés de fabrication. Les procédés spécifiques de production des cellules PV, développés à partir de la base de connaissance de l'industrie électronique, n'ont pas connu de véritable innovation radicale permettant une diminution drastique des coûts. La proximité des deux industries a permis au secteur PV de bénéficier d'un transfert

quasi direct des apprentissages et d'un approvisionnement en matière première, mais cela n'a fait qu'accentuer jusqu'à aujourd'hui la dépendance du sentier sur la trajectoire du silicium cristallin. En outre, les cours des prix du silicium dépendent surtout de la conjoncture dans l'industrie électronique, le secteur solaire se retrouvant en situation de *« price taker »*.

Les cellules PV sont fabriquées soit à partir du silicium de qualité « électronique » et de ses « déchets », soit à partir de silicium de qualité «solaire » fabriqué exclusivement pour l'industrie solaire (entre 12 et 15 Kg de silicium/kW). Ces dernières années la forte croissance de la production de cellules, conjuguée à une reprise de l'industrie électronique après une stagnation, a conduit à une contraction des quantités de silicium disponibles et a une augmentation des prix[340]. En 2003, l'industrie solaire a utilisé environ 10 000 tonnes de silicium, et compte tenu des prévisions de croissance, les quantités nécessaires devraient s'élever à 53 000 tonnes en 2010 (CLSA [2004]). Il faut donc prendre en compte la contrainte de disponibilité de la ressource et les ruptures d'approvisionnement. Ainsi, pour l'année 2004, environ 1 000 tonnes de silicium feront défaut pour satisfaire la demande de l'industrie PV et cette insuffisance pourrait fortement s'accroître à court terme (8 000 tonnes en 2010 ?) si de nouvelles capacités de production ne sont pas mises en œuvre. En 2003, le prix moyen du silicium payé par l'industrie solaire se situait à 24 US$/Kg, celui-ci pourrait augmenter à près de 40 US$/Kg à court terme, avant de baisser ensuite si l'offre s'accroît. La satisfaction de la demande de matière première conditionne directement le niveau des prix des modules PV. Ces dernières années les industriels PV ont directement répercuté les hausses (même temporaires) du prix du silicium sur le prix des modules au consommateur. A moyen terme, même dans un marché solaire toujours soutenu, faute d'un approvisionnement suffisant, la hausse du prix du silicium pourrait donc venir annihiler les effets d'expérience issus des processus de fabrication des cellules.

On peut donc s'interroger sur la capacité technico-économique de cette trajectoire à assurer une production industrielle de masse en réduisant encore les coûts, sachant que ses procédés ont été initialement conçus pour produire des petites séries de

[340] En 2000 et 2001 l'industrie PV a bénéficié des capacités excédentaires de silicium destiné à l'industrie électronique, celui-ci ayant connu ces années une période de stagnation. L'industrie solaire a représenté en 2003 23% de la demande mondiale de silicium (CLSA [2004]).

haute qualité pour l'industrie spatiale, pour laquelle le coût de production n'était pas un critère déterminant dans le cahier des charges[341]. Pourtant, certains analystes avancent que la poursuite des apprentissages par une concentration sur la trajectoire du silicium cristallin devrait permettre, plus que des efforts de R&D, de réduire les coûts de fabrication de 25% d'ici 2010 (de 2 $US/W à moins de 1,5 $US/W) (CLSA [2004]).

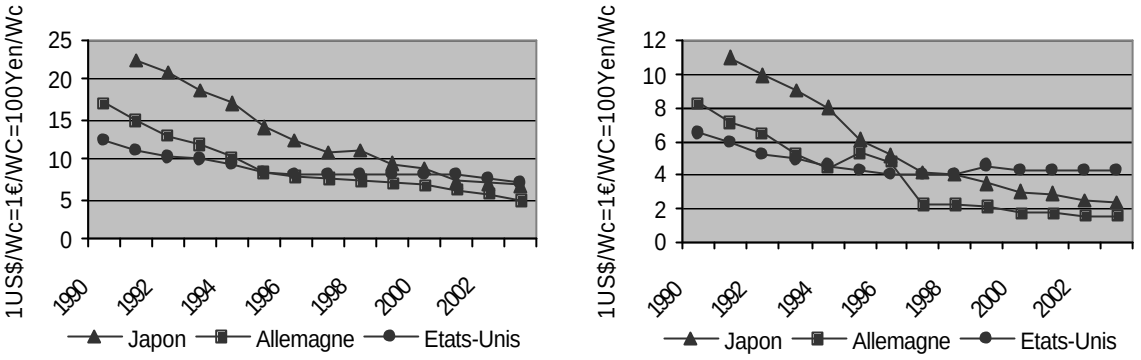
1.3.2.3. Evolution du prix des systèmes et de l'électricité solaire PV

Si l'on s'intéresse maintenant à l'évolution des prix des systèmes connectés au réseau (puissance moyenne 3 kWc) dans les marchés les plus représentatifs, on observe une baisse continue jusqu'en 1996 au Japon, en Allemagne et aux Etats-Unis, puis une relative stagnation depuis, entre 6 et 9 US$/€/100Y/Wc (Figure 12). Parallèlement, on peut noter que si les prix des modules étaient les plus bas aux Etats-Unis en début de période (12,5 $/Wc en 1990), c'est là aussi qu'ils sont les plus élevés (8,2 $/Wc) en 2001. Les baisses de prix ont été également très importantes entre 1990 et 2001 pour les composants des systèmes hors modules (BOS) notamment, en Allemagne (-80%) et au Japon (74%), dans une moindre mesure aux Etats-Unis (-35%) (Figure 13-droite). Toutefois, ces baisses ont eu des répercutions différentes sur le prix total des systèmes PV puisque la part des BOS est assez variable selon les pays (24% en Allemagne, 52% aux Etats-Unis et 36% au Japon en 2001). Le très net ralentissement de la baisse des prix depuis 1996 s'explique en partie par une forte augmentation de la demande pour les systèmes à la suite de la mise en place des plans nationaux de promotion (au Japon et en Allemagne), ce qui a conduit à une contraction des quantités de systèmes PV disponibles sur les marchés.

[341] Les critères déterminants des cellules PV pour les applications spatiales sont en effet le rendement, la qualité de fabrication et la durée de vie. Le coût des cellules n'a qu'un poids très relatif dans le coût total d'un satellite ou d'une station spatiale.

Figure 12. Evolution du prix des systèmes PV raccordés au réseau (gauche) et des composants (hors module PV) (droite)

Sources : à partir de HAAS [2004], IEA [2004a]



Les coûts de production de l'électricité PV varient assez largement selon les pays, en fonction du coût d'investissement des installations et de la ressource solaire liée à la situation géographique. Pour les zones d'exposition maximale, ils sont les plus bas en Australie, aux Etats-Unis (Hawaï, Nouveau Mexique) et dans le Sud de l'Europe, tout en restant entre deux et trois fois supérieurs au prix de l'électricité distribuée par le réseau (HAAS [2004], Tableau 2). Dans le centre et le Nord de l'Europe les coûts sont beaucoup plus élevés, de trois à quatre fois supérieurs à l'électricité conventionnelle (voir ANNEXE 8).

Tableau 2. Coûts d'investissement et coûts de production de l'électricité pour un système PV connecté au réseau

Source : HAAS [2004]

Pays	Investissement moyen[342]	Devises /kWc	Radiations		Coût (€/kWh)	
			Maxi.	Mini.	Maxi. radiations	Mini. Radiations
Australie, N[elle] Zélande	7 500	US$/kWc	2 200	1 600	0,36	0,49
Etats-Unis	8 300	US$/kWc	2 300	1 200	0,37	0,72
Espagne, Italie	7 500	€/kWc	1 900	1 300	0,41	0,60
Autriche, Suisse Allemagne, Pays-Bas	6 500	€/kWc	1 200	1 000	0,57	0,68
Japon	7 600	100Y/kWc	1 500	1 100	0,47	0,77
Suède, Finlande, Royaume-Uni	7 300	€/kWc	1 050	700	0,73	1,09

[342] Investissement moyen calculé pour une durée de fonctionnement de 15 ans et pour un taux d'intérêt de 5%.

Le solaire PV, comme les autres sources d'énergies renouvelables, pourrait gagner en compétitivité si les coûts externes engendrés par l'ensemble des sources de production d'électricité étaient internalisés. Le programme ExternE de l'Union européenne, quantifiant pour chaque Etat membre les coûts socio-économiques liés à la production d'électricité selon une méthodologie évolutive, fournit des chiffres de référence (EXTERNE [1995, 1998]). Ces coûts externes sont très variables selon les filières énergétiques et les pays, et assez incertains compte tenu des difficultés méthodologiques (voir ANNEXE 9). Les plus élevés concernent les centrales au charbon et au fioul les plus anciennes, pour lesquelles les coûts des dommages (entre 2 et 4 c€/kWh) peuvent dépasser les coûts de production de l'électricité. Les coûts des dommages des centrales à gaz représentent entre un tiers et la moitié de ceux du charbon et du fioul, ceux des centrales nucléaires sont très faibles au regard du prix de l'électricité. Les coûts externes environnementaux des filières renouvelables doivent être interprétés avec précaution puisqu'ils peuvent être très variables en fonction de la localisation des installations (RABL [2001], voir ANNEXE 8). Le solaire PV, l'éolien et l'hydroélectricité se distinguent des autres filières par le fait qu'elles n'émettent pas de pollution pendant la phase de production d'électricité. Les seules pollutions engendrées le sont en amont, au cours de la fabrication, et éventuellement en aval au démontage des installations. L'impact paysager des systèmes solaires individuels connectés au réseau peut être considéré comme nul puisqu'ils viennent soit s'intégrer sur des surfaces existantes (toits), soit remplacer des matériaux de construction (vitres, tuiles) pour une intégration parfaite (TSOUTSOS *et al.* [2005]).

Si les coûts externes engendrés pour la production d'électricité étaient internalisés, l'électricité solaire PV pourrait gagner actuellement un avantage de coût par rapport aux sources fossiles compris entre 1 et 4 c€/kWh. Toutefois, compte tenu que le solaire PV peut être en compétition avec les turbines à gaz pour la production d'électricité pendant les périodes de pointe, il convient de retenir plutôt la limite basse de cette fourchette (1 c€/kWh).

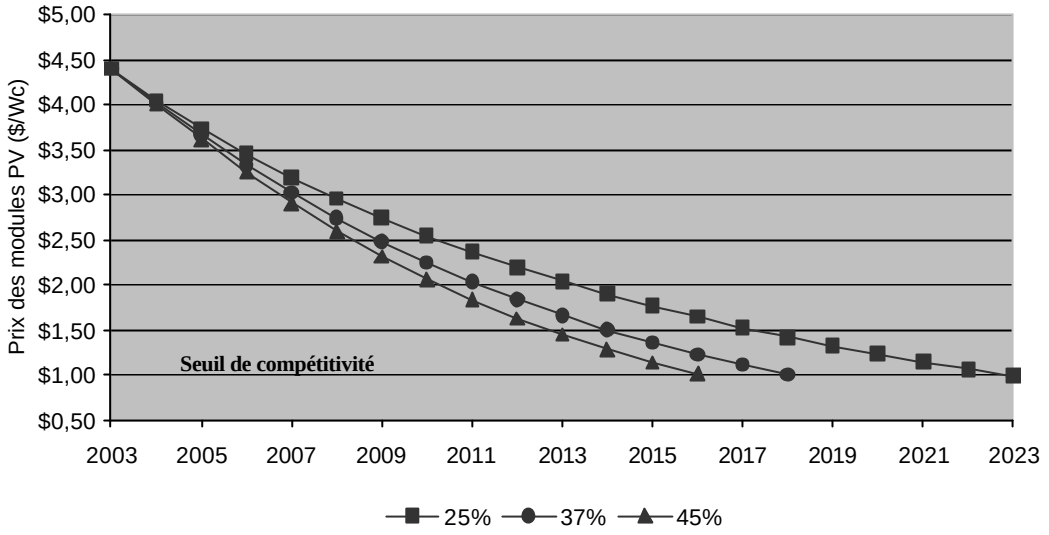
1.3.2.4. Courbe d'apprentissage du solaire PV : analyse prospective

Les possibilités de réductions des coûts du solaire PV à moyen terme sont conditionnées par la poursuite de la croissance en volume du marché. Celui-ci dépend

très étroitement pour l'instant de l'ensemble des mesures publiques de soutien, motivées par la réduction des gaz à effet de serre, par la volonté de réduire la dépendance énergétique et par l'accès à l'énergie dans les PED. Dans une approche prospective les courbes d'expérience peuvent être utilisées pour donner des indications sur le niveau futur des prix en fonction des quantités. Toutefois, dans cette optique leur interprétation reste délicate puisqu'elles n'intègrent pas de paramètre d'incertitude et ne distinguent pas les économies statiques, relatives à la baisse des coûts (réversibles) et qui entraînent un déplacement de la courbe d'apprentissage vers la droite, des économies dynamiques, relatives aux effets d'apprentissage (irréversibles) et qui entraînent un déplacement de la courbe vers le bas.

En reprenant la méthodologie que nous avons exposée, il est possible de proposer une estimation des périodes auxquelles le solaire PV pourrait atteindre le seuil de compétitivité. Selon les dires d'experts, ce dernier est généralement fixé à 1 $/Wc (EC [2004], EPIA [2004], JAGER-WALDAU [2004], VAN DER ZWAAN et RABL [2004]). A partir d'une projection de la série longue du prix des modules que nous avons reconstitué, la Figure 13 représente les courbes d'apprentissage pour un taux d'apprentissage de 20%, selon trois scénarii de croissance annuelle de la production, permettant d'atteindre le seuil de 1 $/Wc. Un premier scénario correspondant à la poursuite de la tendance actuelle (*« business as usual »*) de 37% de croissance annuelle, montre que ce seuil pourrait être franchi en 2018. Un deuxième cas correspondant à un ralentissement de la production de modules (25% de croissance annuelle) suite par exemple à un retrait des soutiens publics, repousse la date d'atteinte du seuil à 2023. Enfin, un troisième scénario envisage une accélération de la production annuelle (50%) et une période de compétitivité dès 2016.

Figure 13. Dates d'atteinte du seuil de 1 $/Wc pour un *Ta* de 20% selon trois scénarii de croissance annuelle de la production de modules PV



1.3.3. Les politiques publiques et les stratégies de acteurs : vers la variété technologique ?

1.3.3.1. Les politiques publiques de soutien

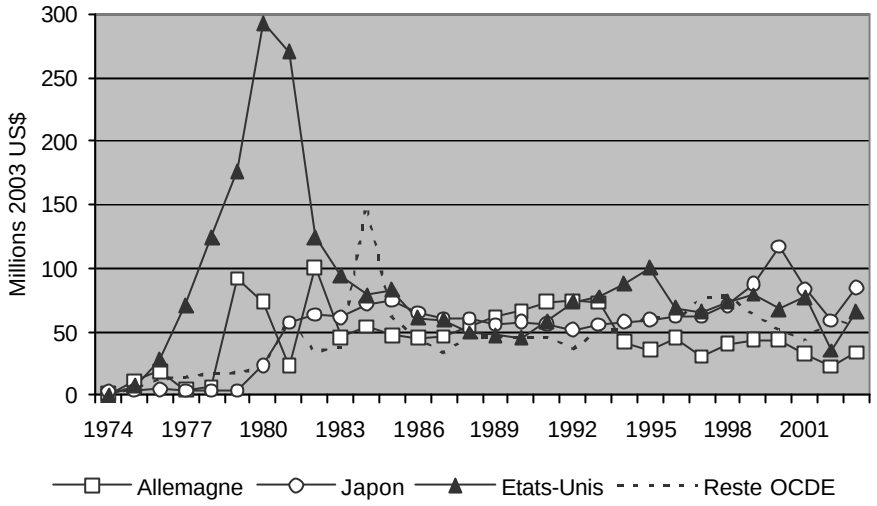
1.3.3.1.1. Les politiques technologiques

Bien que les mesures publiques de soutien affichent des résultats très significatifs dans certains pays en terme de diffusion, l'incertitude demeure sur la trajectoire technologique qui permettra au solaire d'être compétitif. Néanmoins, tant de l'avis des chercheurs et des ingénieurs que de celui des industriels, seule la technologie des cellules en couches minces, quel que soit le matériau employé, est vue comme celle qui permettra de réaliser une production à grande échelle et une économie substantielle de matière première, le tout à des coûts peu élevés (CEA [2004], EC [2004], EPIA [2004]). La compétition technologique dans le solaire PV présente ainsi des similarités avec celle étudiée par ARTHUR [1988, 1989] : les rendements croissants d'adoption (RCA) et les phénomènes de dépendance du sentier ont conduit la technologie au silicium cristallin à verrouiller le marché. En outre, les débouchés créés par les programmes publics ont contribué à une diffusion de plus en plus large de cette technologie, compte tenu de son degré de maturité et de sa disponibilité. Cependant, à

long terme, cette trajectoire n'est pas jugée comme la plus efficiente, techniquement et économiquement. Selon l'analyse évolutionniste, le degré d'inflexibilité de cette situation apparaît élevé puisque les RCA qui ont prévalu concernent les interrelations technologiques, l'apprentissage par l'usage et les économies d'échelle (FORAY [1989]). La transition vers un nouveau *« dominant design »* doit passer par un développement de la variété technologique afin que le standard technologique le plus efficient puisse être évalué par comparaison et sélectionné (COWAN [1991], COWAN et HULTEN [1996], ISLAS [1997]). Comme nous l'avons vu, au niveau de la recherche fondamentale la diversité des voies explorées actuellement traduit bien l'incertitude de la part des pouvoirs publics et des firmes sur le futur de la compétition intra-technologique. La « gestion » de la période actuelle apparaît donc cruciale quant au devenir de l'industrie solaire PV. La difficulté est de développer et de maintenir une diversité des options technologiques, notamment parmi la filière des couches minces, le temps de réduire l'incertitude sur les potentialités des matériaux utilisables, pour ensuite faire émerger un standard afin qu'il puisse bénéficier des effets d'autorenforcement. La mise en œuvre des politiques technologiques est donc contrainte par le dilemme du géant aveugle, par le paradoxe de la « fenêtre étroite », pour le *timing* optimal de l'intervention, et doit tenir compte des « orphelins enragés » (DAVID [1987], DAVID et FORAY [1994]). En effet, si à moyen ou long terme les espoirs fondés sur la technologie en couches minces se traduisent concrètement par des avancées technico-économiques importantes, la majorité des firmes qui ont largement investi dans des unités de production de cellules au silicium cristallin devront supporter de lourds *switching costs* au risque de ne plus être compétitives. Théoriquement, l'exploration de la diversité technologique est coûteuse d'un point de vue social. D'abord, en retardant l'adoption d'une technologie environnementale plus efficiente, elle entraîne une perte de bien-être due à la prolongation de l'utilisation d'une technologie polluante (LAFFOND *et al.* [2000]). Ensuite, elle nécessite de maintenir un niveau élevé de dépenses pour soutenir la R&D et favoriser ensuite les apprentissages interactifs sur les meilleures options. L'évolution des dépenses publiques de R&D pour le solaire PV montre une relative stabilité du milieu des années 1980 jusqu'à ces dernières années, après la forte augmentation, surtout aux Etats-Unis, ayant suivit les chocs pétroliers[343] (Figure 14).

[343] On peut noter que les pays de l'AIE ont multiplié leurs dépenses de R&D sur l'énergie, toutes filières confondues, par 2,5 entre 1974 et 1980. Cet effort a ensuite lentement diminué pour revenir en 2000 au

Figure 14. Evolution des dépenses publiques de R&D pour le solaire PV (pays AIE)
Sources : à partir de IEA online R&D database, www.iea.org, IEA [2004, 2003, 2002]



Avec respectivement 84,5 et 65,7 millions de dollars engagés en 2003, le Japon et les Etats-Unis ont été les pays les plus actifs en matière de dépenses publiques de R&D (IEA [2004a]). En considérant en plus l'Allemagne (33,5 millions de dollars), ces trois pays ont représenté plus de 77% des dépenses publiques mondiales de R&D en 2003. Sur la période, bien que les Etats-Unis aient engagé les plus importantes dépenses de R&D, en termes de réductions des prix des systèmes ils n'arrivent qu'en troisième position (voir la Figure 14). L'Allemagne et le Japon affichent des réductions des prix presque deux fois supérieures à celle des Etats-Unis.

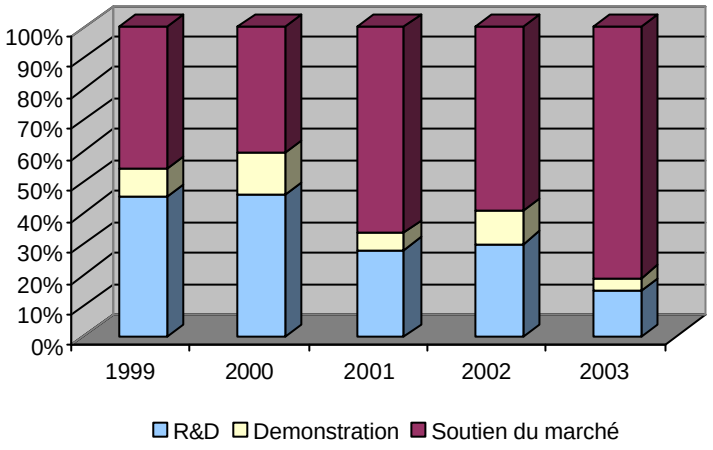
Historiquement, ces trois pays ont opté pour une stratégie consistant à soutenir la création d'une industrie et d'un marché nationaux du solaire PV (*« strategic niche management »*), et à élargir ensuite les débouchés *via* les marchés à l'exportation (KEMP *et al.* [1997, 1998]). Si tous les pays membres de l'AIE ont des budgets de R&D, les dépenses, en volume, demeurent très concentrées géographiquement. En augmentation en 2003 par rapport à 2002, elles apparaissent encore insuffisantes pour accélérer à court terme les apprentissages par la variété et *a fortiori* pour permettre un saut technologique. Peu d'informations sont disponibles sur la répartition de la R&D par type de technologie. En Allemagne, en 2003, 40% des dépenses ont été affectées pour les recherches sur les couches minces, contre 53% pour le silicium cristallin (IEA [2003a]). Le Japon dans le cadre du programme *« New Sunshine Project »* a établi une

niveau de celui de 1974 (environ 7 milliards US$/2000) [IEA, base de données de R&D en ligne, www.iea.org].

feuille de route très précise jusqu'en 2030 détaillant les financements de R&D et de soutien au marché et les affectations par types de technologies PV (voir en ANNEXE 10). Actuellement et à court terme, les affectations de R&D publique privilégient donc la poursuite des apprentissages sur la trajectoire du silicium cristallin pour diminuer encore les coûts de production. Les couches minces sont perçues comme une technologie de plus long terme.

Figure 15. Evolution des parts relatives des dépenses publiques de R&D, de démonstration et de soutien du marché solaire PV (pays AIE)

Sources : à partir de IEA [2000b, 2001, 2002, 2003a, 2004]



La comparaison, en valeur relative, de la tendance des dépenses publiques de R&D, de démonstration et de soutien au marché montre que les dépenses de R&D sont affectées prioritairement ces dernières années à des mesures destinées à soutenir le marché, au détriment de la R&D. Les financements publics des instruments de soutien aux marchés solaire PV se sont élevés en 2003 à 1,7 milliard de dollars de dépenses de la part des pays de l'AIE, dont 757 millions de la part de l'Allemagne.

1.3.3.1.2. Les instruments économiques de soutien à l'installation et la production

Dans le cadre de programmes nationaux, les incitations à l'installation de systèmes solaires PV peuvent prendre la forme de subventions directes à l'investissement, de réductions ou d'exonérations fiscales ou de prêts à taux bonifiés. Ces aides, différenciées ou non pour les particuliers ou les entreprises, peuvent être octroyées de manière forfaitaire ou proportionnellement à la puissance installée. Les

subventions directes sont plus efficaces que les allégements fiscaux du fait de leur caractère direct et immédiat. Par contre, elles ont les inconvénients d'alourdir les dépenses publiques, ce qui peut compromettre leur pérennité, et peuvent créer des effets d'aubaines. En outre, elles doivent être soutenues par des campagnes de promotion sur les mérites des technologies et les aides associées afin d'informer au mieux les bénéficiaires potentiels[344].

Les systèmes d'incitations à la production d'électricité verte s'appuient sur des instruments similaires à ceux mis en œuvre dans le cadre des politiques environnementales, et se réfèrent également au débat prix *versus* quantités (WEITZMAN [1974], MENANTEAU *et al.* [2003a], PERCEBOIS [2004]). WEITZMAN [1974] a montré qu'en univers incertain une régulation par les prix était plus efficiente qu'une régulation par les quantités[345]. Appliquée aux ER, cette approche a conduit à définir des tarifs d'achat garantis (« *fixed feed-in tariffs* ») pour l'électricité verte. De par leur stabilité ces tarifs, fixés par le régulateur public, assurent une bonne prévisibilité de rentabilité des investissements aux particuliers, dans le cas d'un système PV individuel, et aux développeurs d'installations plus importantes d'ER (éolien). Ce système est accompagné d'une obligation d'achat de l'électricité produite pendant une durée définie (10 à 15 ans) par les compagnies ou le gestionnaire du réseau de transport se situant dans la zone des producteurs. Le tarif comprend un prix réglementé du kWh auquel vient s'ajouter une prime fixée en fonction du degré de maturité de chaque technologie[346]. Le tarif peut être calculé par rapport aux coûts évités des compagnies sur lesquelles porte l'obligation d'achat, par rapport au coût marginal de long terme de l'électricité verte ou plus généralement par rapport au prix payé par les consommateurs finals. Ce système, basé sur une information transparente et des coûts de transaction

---

[344] Par exemple, un sondage réalisé par l'ADEME [2003] sur le solaire PV connecté au réseau a montré que les personnes interrogées ne distinguaient pas réellement les technologies du solaire PV et du solaire thermique destinées à la production d'eau chaude.

[345] Cf. Chapitre 2.

[346] Le surcoût (c'est-à-dire la différence entre le coût marginal du kWh « vert » et le coût marginal du kWh conventionnel, à laquelle s'ajoute la rente des producteurs d'électricité verte, c'est-à-dire la différence entre le prix garanti et le coût marginal de l'électricité verte) peut être financé par le consommateur final, par un fonds de service public comme c'est le cas en France, ou par le contribuable comme au Danemark (MIRABEL et POUDOU [2004]).

faibles, à l'avantage d'offrir aux producteurs d'électricité verte un revenu constant (FINON et PEREZ [2004]). Les particuliers équipés d'un toit solaire PV et d'un compteur réversible peuvent voir le produit de la vente de l'électricité injectée dans le réseau déduit directement de leur consommation sur leur facture d'électricité. Les opérateurs d'installations évitent les fluctuations comme sur les marchés *spot* et la rente qu'ils perçoivent les incite à investir dans la R&D afin de diminuer leurs coûts. Mais le système des prix fixes n'est pas sans inconvénient, notamment pour le régulateur public. D'abord, les tarifs d'achat fixes ne permettent pas d'atteindre précisément un objectif quantitatif d'électricité verte (PERCEBOIS [2004]). Si le prix de rachat est connu *ex ante*, la courbe de coût marginal et la quantité d'électricité verte produite ne sont connues qu'*ex post*. Toute erreur dans l'appréciation de la pente de la courbe du coût marginal conduit à des quantités d'électricité verte différentes de celles voulues par le régulateur. Ensuite, ce système peut lui aussi engendrer des comportements d'aubaine de la part des producteurs dont le coût marginal est inférieur au tarif de rachat, mais l'introduction d'une dégressivité des tarifs (éventuellement par type de technologie) doit permettre de les éviter (CHABOT [2001]). Enfin, les tarifs garantis n'intègrent pas les externalités négatives engendrées par l'intermittence des énergies comme le solaire ou l'éolien. La gestion de l'intermittence entraîne plusieurs types de coûts : de défaillance, de mise en réserve de centrales de pointe et d'équilibrage du réseau. En régime de monopole c'est la compagnie électrique qui supportera ces coûts, dans un système de marché, ils sont internalisés, des pénalités financières sont imputées aux producteurs défaillants (MENANTEAU *et al.* [2003b]).

Les *feed-in tariffs*, combinés ou non à d'autres mesures (subventions, prêts bonifiés), sont actuellement utilisés dans la grande majorité des pays européens (REICHE et BECHBERGER [2004]). Concernant le solaire PV, ils ont prouvé leur efficacité en termes de puissances installées en Allemagne et en Espagne, où leurs niveaux, très incitatifs, a permis de créer des *bridging markets*, soutenant le passage d'une utilisation de niches à une diffusion de masse (voir en ANNEXE 11).

1.3.3.2. Les positionnements technologiques et stratégiques des firmes du secteur solaire PV

La croissance soutenue du marché des systèmes solaires connectés au réseau a entraîné un début de structuration de l'industrie PV. Pour la filière silicium, cette dernière peut être divisée en deux groupes de firmes, représentant les deux principaux maillons « amont » et « aval » de la chaîne de valeur [347]:

- les producteurs de matière première, de lingots et de briques de silicium cristallin, de plaquettes (*« wafers »*) ;
- les fabricants et assembleurs de produits semi-finis ou finis, c'est-à-dire les cellules et les modules solaires PV[348].

1.3.3.2.1. Le secteur « amont » de l'industrie PV

La domination actuelle de la technologie solaire au silicium cristallin confère un rôle de plus en plus stratégique aux firmes chargées de produire cette matière première. Les producteurs de silicium de qualité électronique fournissent actuellement la grande majorité du silicium utilisé par l'industrie solaire. Parmi les firmes[349] les plus représentatives, les plus actives sont Tokuyama Corporation (Jap.), Hemlock (E.-U.) et Wacker (All.). Incitées par la forte croissance de la demande de l'industrie solaire, ces trois firmes développent actuellement des technologies de purification du silicium afin d'accroître leur capacité de production à partir de 2006 (IEA [2004a]).

---

[347] Nous ne traiterons pas du segment des différents industriels fabricant les autres composants des systèmes solaires (régulateurs, onduleurs, batteries, supports…), sachant que ceux-ci ne sont pas actuellement dans leur grande majorité spécifiques aux installations solaires. Toutefois compte tenu des évolutions en cours, à l'avenir ce segment pourrait prendre de l'importance dans la chaîne de valeur de l'industrie solaire.

[348] On peut noter que les principales firmes, les «*majors* historiques », de la filière silicium sont (quasi)intégrées verticalement, de même que celles de la filière couches minces, mais ces dernières le sont en raison des contraintes techniques.

[349] Les principales unités de production se situent aux Etats-Unis, au Japon, en Allemagne et en Italie.

En 2003, Solar Grade Silicon LLC (SGL, E.-U.)[350] fut la première firme à débuter une production de silicium entièrement destinée à l'industrie solaire. Au cours de cette première année d'activité la firme a produit environ 2 000 tonnes de lingots et plaquettes. Elle développe actuellement un réacteur en lit fluidisé devant permettre de diminuer les coûts de production dès sa mise en fonctionnement en 2006.

La fabrication de lingots et de plaquettes de silicium est généralement intégrée sur un même site géographique. En 2003, la production mondiale de lingots de silicium s'est élevée à 1 215 tonnes (565 t mono c-Si, 650 t poly c-Si) et celle de plaquettes à 615 MWc (150 MWc mono c-Si, 465 MWc poly c-Si) (IEA [2004a]). Depuis la fin des années 1990 plusieurs firmes ont acquis de fortes positions sur ce segment surtout en Europe, mais la production tend à se répartir géographiquement. Les principales d'entre elles sont ScanWafer (Nor.) (64 MWc produits en 2003), Deutsche Solar (All.) (78 MWc produits en 2003, mais une capacité de production de 120 MWc/an), et PV Crystalox (All., R.-U.). D'autres firmes comme Sumco, JFE (Jap.), Pillar (Ukr.) ou Emix (Fra.) démarrent actuellement leurs activités. Ces acteurs sont positionnés exclusivement sur la filière du silicium multicristallin, exceptés Pillar et Deutsche Solar qui produisent également du silicium monocristallin. Suivant et anticipant la hausse de la demande de cellules au silicium cristallin, tous ont inauguré des nouvelles capacités de production ces dernières années, notamment ScanWafer qui a ouvert une quatrième ligne de production d'une capacité de 48 MWc/an. Compte tenu des caractéristiques du marché actuellement, ces fabricants fournissent chacun un nombre limité d'assembleurs de modules par le biais de contrats d'approvisionnement de long terme.

De manière globale, l'offre de silicium et de plaquettes ne devrait pas permettre de satisfaire l'ensemble de la demande pendant encore quelques années mais, compte tenu des extensions de capacités de production actuellement planifiées et de l'entrée de nouveaux acteurs, le marché devrait rapidement s'équilibrer à partir de 2008/2009.

A côté du premier groupe de firmes, issues pour la plupart des industries électronique et/ou chimique, il faut considérer les *majors* de l'industrie solaire, verticalement intégrées, comme Kyocera (Jap., capacité de 76 MWc/an en 2003,

[350] Solar Grade Silicon est une *joint-venture* formée en 2002 entre Renewable Energy Corporation (AS Nor.) et AsiMI LLC (E.-U.).

extension à 120 MWc/an en 2004), BP Solar (E.-U., capacité de 55 MWc/an en 2003), Shell Solar (E.-U., capacité de 55 MWc/an en 2003), Photowatt (Fra., 17 MWc produits en 2002) et RWE Schott (All./E.-U., capacité de 40 MWc/an en 2003) qui assurent elles-mêmes une partie de la fabrication des lingots de silicium et des plaquettes, et l'assemblage des modules (IEA [2003c]). Compte tenu de cette intégration des activités et de leur caractère stratégique, peu d'informations spécifiques au segment « amont » de ces firmes sont disponibles.

Toutefois, on peut citer l'exemple de Shell Solar qui, en 1998, en collaboration avec l'organisation professionnelle Northwest Energy Efficiency Alliance, a engagé un programme de R&D de 1 million de dollars dans le but d'améliorer l'efficience de son procédé de fabrication du silicium[351]. Dans un premier temps Shell Solar a mené des études théoriques sur un nouveau *design* de fours à silicium. La démarche a ensuite consisté à diffuser les résultats théoriques obtenus par le biais de publications et de participations à des conférences afin d'avoir des commentaires de la communauté scientifique et d'attirer d'éventuels partenaires industriels pour tester et améliorer en retour ce procédé. La mise en œuvre de cette capacité d'émission de connaissances codifiées a permis à Shell Solar de nouer un partenariat avec Advanced Silicon Materials Inc. (AsiMI), important fournisseur de silicium pour l'industrie électronique, afin de développer les nouveaux fours (PENIN [2003]). A la suite d'un processus d'apprentissage, ce procédé est désormais bien maîtrisé par Shell Solar et a permis de réduire la consommation d'électricité de 51% et d'augmenter la productivité du cycle de 20%.

1.3.3.2.2. Le secteur « aval » de l'industrie PV

Le segment de la fabrication des cellules et de l'assemblage des modules PV est largement dominé par les firmes dont les métiers de base s'exercent dans les secteurs électroniques ou pétro-gaziers.

Depuis 2000, Sharp est le premier producteur mondial de cellules (Tableau 3). La firme, qui fabrique des cellules PV depuis 1963, a produit 197,9 MWc[352] en 2003,

[351] First quarter Northwest Energy Efficiency Alliance Newsletter, http://www.nwalliance.org/news/index.

[352] Pour moitié monocristallines et pour moitié multicristallines.

représentant une part de marché de 25%. Le marché domestique japonais représente 30% de ses débouchés. D'un point de vue technologique Sharp est exclusivement positionné sur le silicium cristallin. Bien que ne fabricant pas ses propres plaquettes, ses activités de R&D portent sur une diminution de l'épaisseur des cellules cristallines et sur l'augmentation de leur efficience[353], mais également sur la technologie en couches minces au silicium amorphe pour laquelle la firme a déposé 24 brevets entre 1990 et 1998 (voir ANNEXE 12). Cependant, pour l'heure, aucune diversification technologique vers les couches minces n'est prévue. Au contraire ces dernières années, Sharp a fortement investi dans de nouvelles capacités de fabrication de cellules au Japon, où huit nouvelles chaînes de production ont été mises en service en 2004, mais également à l'étranger afin de rapprocher les lieux de fabrication et d'assemblage des lieux de commercialisation des modules. En 2003, la première usine en dehors du Japon a été ouverte à Memphis aux Etats-Unis (capacité 20 MWc/an). La même année la division Europe pour les ventes et le marketing a été installée à Hambourg en Allemagne, et les premières usines destinées à fournir le marché européen ont débuté leurs opérations au Pays de Galle (capacité actuelle de 20 MWc/an, portée à 35 MWc/an en 2005). Ces nouvelles installations vont porter la capacité totale de production de cellules de Sharp à 400 MWc/an en 2005. En outre, privilégiant le marché des systèmes domestiques raccordés au réseau, la firme a noué plusieurs accords de partenariats avec des constructeurs de maisons individuelles au Japon et aux Etats-Unis afin de proposer des installations directement intégrées aux constructions.

[353] En 2003, en collaboration avec l'Agence nationale spatiale japonaise et l'Institut technologique de Toyota, Sharp a testé en laboratoire une cellule d'une efficience de 36,5%, ce qui constitue le rendement record jamais atteint pour une cellule PV.

Tableau 3. Production (MWc) et rang des 10 premiers producteurs mondiaux de cellules PV

Sources : à partir de MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2000a, 2001a, 2002a, 2003a, 2004a]

	Ption						Rang					
Firmes	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**
Sharp	14	30	50,4	74	123,1	197,9	4	3	1	1	1	1
Kyocera	24,5	30,3	42	54	60	72	2	2	2	3	3	2
BP Solar	62,6	65	41,8	54,4	71,4	69,3	1	1	3	2	2	3
Shell Solar*	20	26	29,5	48,3	55,5	62	3	4	4	4	4	4
RWE Schott Solar**	4	10	14	22,7	29,5	44	5	/	7	6	7	5
Mitsubishi Electric	/	/	11	14	24	42	/	/	8	9	9	6
Isofoton	/	6,1	9,5	18,7	27,4	35,2	/	7	9	7	8	7
Sanyo	6,5	13	15	16	30	35	6	5	6	8	5	8
Astropower	7	12	18	26	29,7	29,7	5	6	5	5	6	9
Q-cells	/	/	/	/	9	28,2	/	/	/	/	10	10
Autres industriels	/	/	44,5	59,8	98,3	148,3						

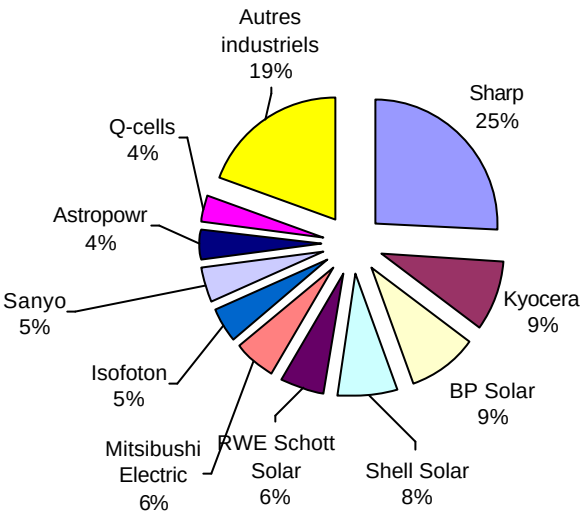
** Siemens Solar pour 1998 et 1999*
*** ASE pour 1998 et 1999*

La firme japonaise Kyocera produit des cellules multicristallines depuis 1983 en contrôlant entièrement sa chaîne de fabrication. Le groupe, qui a fabriqué 72 MWc de cellules en 2003, soit une part de marché de 9%, s'est toujours classé ces dernières années au 2ème ou 3ème rang mondial des fabriquants (voir le Tableau 3). Kyocera concentre la totalité de ses activités de R&D et de production industrielle sur les cellules multicristallines[354] et n'envisage pas de diversification vers d'autres technologies. Au contraire, à court terme la stratégie définie consiste à devenir le premier groupe mondial totalement intégré. Pour cela la firme a engagé ces dernières années un grand programme d'investissements atteignant quasiment 100 millions de dollars. En premier lieu, la capacité de production de cellules multicristallines, réunie sur une seule usine au Japon afin de bénéficier au maximum des économies d'échelle, va être doublée d'ici 2005 pour atteindre 240 MWc/an. Depuis 2003, avec l'ouverture d'une usine en Chine (zone Asie), l'assemblage des modules est délocalisé au plus des grandes zones des marchés d'installation. Ainsi, en 2004 une unité d'assemblage (36 MWc/an) a été mise

[354] En 2003 Kyocera a mis sur le marché son nouveau module d.Blue utilisant une nouvelle texture antireflet augmentant l'efficience. A dimension égale sa production maximale passera de 158 à 167 W.

en service au Mexique afin de servir les marchés américains, particulièrement la Californie, et en 2005 une autre unité (60 MWc/an) débutera ses activités en République Tchèque pour fournir la zone Europe et particulièrement l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne et la République Tchèque.

Figure 16. Parts de marché des fabricants de cellules PV en 2003
Sources : à partir de MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004a]



BP Solar est la première firme directement détenue par un groupe pétro-gazier à contrebalancer le poids des industriels japonais dans le solaire PV. La filiale, créée en 1981, est entrée dans le secteur solaire en investissant dans un certain nombre de participations et en rachetant des sociétés fabricant des cellules et assemblant des modules[355]. Cette démarche a permis à BP Solar d'accéder directement à des ressources spécifiques et de bénéficier des compétences de ces firmes. Au début des années 1990, l'entreprise s'est distinguée en définissant une stratégie « globale » de ses activités PV en se positionnant technologiquement à la fois sur la filière silicium et sur les couches minces, et en ouvrant plusieurs unités de production et d'assemblage de grande capacité (131 MWc au total)[356]. Ce développement lui a permis d'atteindre en 1998 et en 1999 la

[355] En 1981 BP Solar a pris une participation de 50% dans Lucas Energy Systems. En 1983 le groupe rachète Solarex entreprise « historique » du secteur solaire PV aux Etats-Unis, où le nom commercial de BP Solarex a été gardé. En 1984 BP Solar a racheté Monosolar, la division couches minces de Nortek.

[356] A la fin de l'année 2001 BP Solar disposait de cinq unités de fabrications de cellules et de modules. Concernant le silicium, les usines se situent près de Madrid (Alcobendas, 16 MWc/an et Tres Cantos, 30 MWc/an, silicium cristallin), à Sydney (25 MWc/an, silicium mono et multicristallin), à Bangalore en

place de premier producteur mondial, devant Kyocera (voir le Tableau 3). Cependant, en 2002 l'évolution du marché a poussé BP Solar à une réorientation stratégique. L'accroissement de la concurrence, se traduisant par une pression sur les coûts de production et de recyclage, et une demande insuffisante ont contraint BP Solar à arrêter sa production de cellules en couches minces et à se focaliser uniquement sur le silicium cristallin (SYSTEMES SOLAIRES [2003a], JAGER-WALDAU [2004])[357]. Depuis cette restructuration, l'entreprise a régressé en termes de part de marché mais continue d'investir de façon soutenue en nouvelles capacités sur le silicium cristallin[358]. A court terme l'objectif de BP Solar est de porter sa capacité de production de 90 MWc/an actuellement à 200 MWc/an en 2006[359] en concentrant sa distribution sur les marchés des systèmes solaires raccordés au réseau aux Etats-Unis (Californie), en Europe (Allemagne, Espagne) et en Australie. Mais également l'entreprise crée ses propres débouchés en quelque sorte en développant et en exploitant des grandes installations comme la centrale solaire de Geiseltsee en Allemagne mise en service en 2004 (puissance initiale 4 MWc/an, extensible à 6 MWc/an)[360]. Ce type de projet, en nécessitant plusieurs dizaines de milliers de panneaux solaires pour une même installation, crée un effet d'échelle et contribue ainsi à diminuer les coûts de production.

Les positions industrielles et technologiques des grands fabricants mondiaux de cellules PV sont révélatrices de la double incertitude portant à la fois sur les conditions de marché et les politiques de soutien, ainsi que sur les perspectives d'évolution des différentes alternatives technologiques susceptibles de s'imposer comme futur *dominant design*.

Sur la première, on peut citer l'incertitude qui a prévalu en Allemagne (deuxième marché solaire mondial) pendant quelques mois courant 2003 alors que le

---

Inde (15 MWc/an, silicium multicristallin) et à Frederick aux Etats-Unis (35 MWc/an, silicium multicristallin). Aux Etats-Unis deux autres usines fabriquaient des cellules en couches minces : à Tonano (8 MWc/an, silicium amorphe) et à Fairfield (2 MWc/an, CdTe) (EC [2003]).

[357] Nous trouvons ici une illustration du paradoxe des « orphelins enragés » (DAVID [1987]).

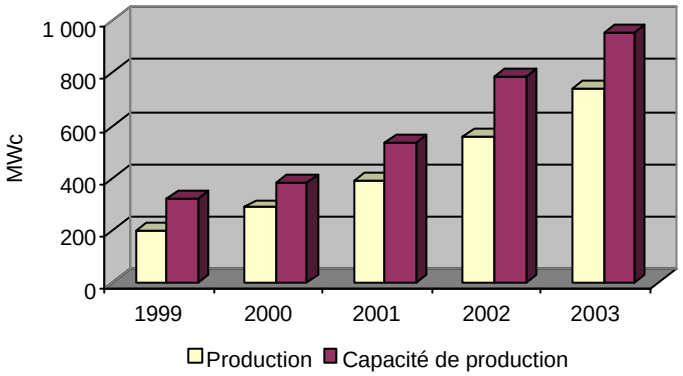
[358] En 2003 BP Solar a investi 120 millions d'euros afin de doubler la capacité de production (de 30 à 60 MWc/an) de l'usine espagnole de Tres Cantos et ouvrant la possibilité technique de porter la capacité à 200 MWc/an dans les prochaines années.

[359] Press release, October 20, 2004, www.bpsolar.com

[360] Press release, September 17, 2004, www.solaraccess.com

programme «100 000 toits solaires » se terminait à la fin de cette même année. Les industriels, attendant la définition du nouveau cadre incitatif qui allait rentrer en vigueur début 2004, ont ralenti leur production. Mais dès l'annonce du niveau des nouveaux tarifs de rachat contenu dans la nouvelle loi sur les ER, le marché a continué de progresser et la concurrence s'est accrue[361]. Certaines firmes ont dû rationaliser leur production, comme BP Solar, d'autres, en difficultés financières, ont été rachetées comme AstroPower par General Electric aux Etats-Unis, et Siemens Solar par Shell Solar en Allemagne (IEA [2004a]). L'industrie PV reste globalement surcapacitaire, notamment sur les couches minces, même si le taux moyen d'utilisation des capacités de production a augmenté ces dernières années pour se situer à un niveau proche des 80% (voir la Figure 17).

Figure 17. Evolution de la production et de la capacité de production de cellules PV
Sources : à partir de IEA [2000, 2001, 2002, 2003b, 2004]



Sur l'incertitude technologique, nous avons vu qu'en choisissant la technologie la mieux maîtrisée et la plus éprouvée, les trois premiers industriels ont misé sur une progression future de la courbe d'expérience du silicium cristallin. BP Solar, qui avait opté pour une stratégie attentiste, en développant une petite capacité de production sur les couches minces, a finalement abandonné cette relative diversification technologique, jugeant le coût de son maintien trop élevé. En jouant de leur puissance financière et en planifiant d'importantes extensions de capacités de production de cellules cristallines Sharp, Kyocera et BP Solar tentent d'imposer leurs choix technologiques afin d'engendrer des rendements croissants d'adoption et de retarder une véritable percée des couches minces. Même si cette dernière technologie semble porteuse à long terme

[361] Voir *supra*.

de fortes marges de progression technico-économiques, sa standardisation à l'échelle industrielle, exceptée pour le silicium amorphe, reste à mettre en œuvre. Actuellement, chaque ligne de production de cellules en couches minces constitue un prototype et, de ce fait, les coûts d'investissements initiaux[362] représentent quasiment le double de ceux nécessaires pour le silicium cristallin, ce qui constitue une barrière à l'entrée importante pour des firmes nouvelles voulant se positionner sur cette technologie (JAGER-WALDAU [2004]). Parmi les autres firmes leaders, seulement trois d'entre elles ont produit des cellules en couches minces en 2003 : Sanyo au Japon avec 5 MWc de silicium amorphe et 30 MWc de cellules tri-couches amorphes et cristallines[363], Shell Solar aux Etats-Unis avec 3 MWc de cellules au diséléniure de cuivre (et 50 MWc de silicium cristallin) et RWE Schott Solar en Allemagne, 2 MWc de silicium amorphe. A côté de ces grandes firmes des *start-up* tentent de réaliser des percées technologiques. En Australie, Pacific Solar développe des cellules polycristallines en couches minces et STI a installé une capacité de production de 0,5 MWc/an de cellules organiques « humides »[364]. En Allemagne Antec Solar et Würth Solar ont débuté en 2002 une production de cellules au tellurure de cadmium et au diséléniure d'indium. Pour enclencher des rendements croissants d'adoption et accroître leurs parts de marché, ces firmes devront d'abord faire la démonstration de la supériorité technique de ces nouvelles cellules et de la possibilité de les produire à grande échelle, faute de quoi la trajectoire des cellules au silicium cristallin sera encore confortée.

Malgré la contrainte liée à son intermittence, l'énergie solaire PV permet de produire de l'électricité, pratiquement sans pollution environnementale, au plus près de son lieu de consommation. Compétitive pour de nombreuses applications isolées et dans les cas d'un premier accès à l'électricité dans les pays en développement, elle suscite désormais l'intérêt dans les pays industrialisés en tant que source d'énergie décentralisée, connectée au réseau. Depuis une dizaine d'années, les programmes de

---

[362] Les coûts d'investissement se situent entre 1 et 2 millions €/MWc pour les cellules au tellurure de cadmium et le silicium amorphe et aux alentours de 2 millions €/MWc pour les cellules au diséléniure de cuivre. Ils sont inférieurs à 0,7 million €/MWc pour le silicium cristallin (JAGER-WALDAU [2004]).

[363] En 2000 Sanyo a mis au point une cellule solaire dont le rendement de conversion atteint 21 %, soit environ 5 points de plus que la plupart des modèles disponibles. Le principe repose sur l'utilisation d'une cellule tri-couche (une couche de silicium amorphe entre deux couches de silicium monocristallin) et d'un silicium très pur pour la couche de base.

[364] Voir *infra*.

soutien mis en place notamment au Japon et en Allemagne ont permis un véritable décollage du marché. Toutefois, en l'absence d'internalisation des externalités liées à la pollution environnementale, les prix de l'électricité solaire demeurent au minimum entre deux et trois fois supérieurs à ceux de l'électricité produite à partir des sources conventionnelles. Du fait de sa proximité avec l'industrie électronique, le secteur solaire PV est verrouillé par la technologie au silicium cristallin depuis sa constitution. Cette technologie a progressé de manière incrémentale sur sa courbe d'apprentissage, affichant une amélioration de ses performances économiques, mais l'incertitude subsiste quant à ses possibilités de franchir le seuil de compétitivité. La technologie concurrente des cellules en couches minces, peu diffusée à grande échelle, présente des performances nettement inférieures. Mais, compte tenu de la très faible quantité de matériaux qu'elle nécessite pour sa fabrication, elle est jugée comme la technologie qui pourra permettre d'atteindre d'importantes réductions de coûts dans le futur. Selon l'analyse évolutionniste de l'innovation, les politiques publiques doivent gérer cette incertitude par un maintien de la diversité des options avant de focaliser les apprentissages sur la technologie qui présente les meilleures possibilités. Même si certains pays jouent un rôle moteur, le niveau actuel des dépenses publiques de R&D des pays de l'AIE pour le solaire PV est globalement insuffisant pour soutenir ces apprentissages par la variété technologique. Du côté des industriels, la demande créée par certains grands programmes solaires a conduit les principales firmes du secteur à opter presque exclusivement pour les cellules au silicium cristallin afin de bénéficier d'économies d'échelle dans la fabrication. Cependant, à moyen terme, en l'absence d'un saut technologique, une diffusion de masse des systèmes solaires connectés au réseau reste intimement liée au maintien de fortes mesures de soutien à l'installation et le passage à une phase autoentretenue reste encore incertaine.

Section 2. Les systèmes techonologiques : l'exemple du développement de l'énergie solaire photovoltaïque en Allemagne

L'Allemagne est devenu un pays « référence », en Europe et dans le monde, pour ses politiques de soutien aux ER. Le pays a développé ces vingt dernières années sa puissance électrique installée à partir des ER (biomasse, hydroélectricité, éolien, solaire PV et thermique). En 2002, les ER ont contribué à hauteur de 10% de la production nette d'électricité, celle-ci s'effectuant par ailleurs majoritairement à partir du charbon (51%) et du nucléaire (31%) (BECHBERGER et REICHE [2004]). Premier pays européen pour la puissance solaire PV installée et pour le dynamisme de cette industrie, l'Allemagne apparaît comme un cas d'étude incontournable. Afin de mettre en évidence les facteurs technologiques, institutionnels et industriels concourrant à cette réussite nous présenterons, dans un premier temps, l'approche théorique des systèmes nationaux d'innovation, puis plus précisément celle des systèmes technologiques (ST), permettant d'analyser la constitution et la diffusion d'une technologie particulière. Nous appliquerons ensuite ce cadre pour analyser le développement de l'énergie solaire PV en Allemagne.

2.1. Les systèmes d'innovation

La notion de système d'innovation (SI) regroupe un ensemble d'approches incorporant des éléments institutionnels dans les études sur les changements technologiques et dans les analyses de la structuration des systèmes scientifiques. Ces approches ont pour point commun de concevoir l'innovation comme un processus d'apprentissage issu d'un ensemble d'acteurs insérés dans des réseaux d'institutions. Les interactions entre les acteurs eux-mêmes (firmes, laboratoires de recherche, universités…) et entre les acteurs et leur environnement sont prises en compte. L'environnement, considéré de manière plus ou moins étendue, ne se réduit pas à un ensemble de prix de marché, mais intègre également un ensemble de règles, d'organisations et d'institutions.

L'approche par les SI souligne que l'innovation est une partie endogène de l'économie et qu'elle constitue un déterminant important du changement technique. Les processus (incertains) d'innovation impliquent une évolution économique dans le

temps. Par conséquent, un SI n'atteint jamais un équilibre au sens de l'analyse économique standard et il n'est pas possible de spécifier *ex ante* de SI optimal (EDQUIST [2001]). L'évaluation d'un SI ne peut reposer que sur l'évaluation de ses fonctions ou la comparaison de différents SI existants.

Les approches par les SI reposent sur trois fondements conceptuels les situant dans la lignée des travaux institutionnalistes et évolutionnistes (SMITH [2000], AMABLE [2003]) :

- les fondements institutionnels des décisions économiques sont explicitement reconnus. En conséquence, différentes structures institutionnelles peuvent donner lieu à des différences dans les comportements économiques et dans les performances affichées par ces comportements ;
- l'avantage compétitif d'un pays résulte de la variété des innovations et de sa spécialisation, et possède les propriétés de dépendance du sentier. Les spécialisations industrielles et technologiques entraînent des phénomènes auto-renforçant produisant des effets de système ;
- les connaissances technologiques sont produites par un apprentissage interactif engendrant des bases de connaissances différentes selon les agents. Ces bases de connaissances déterminent les possibilités d'innovation.

Les deux derniers points montrent clairement que les SI s'appuient sur l'analyse évolutionniste de l'innovation.

L'étude des SI pose en premier lieu le problème de la délimitation géographique, fonctionnelle et sectorielle des systèmes étudiés. Une grande partie des analyses s'appuie sur la notion de système *national* d'innovation (SNI). Nous en présenterons brièvement les différentes conceptions dans un premier temps. Cependant, dans le but d'analyser dans la section suivante le développement de l'énergie solaire PV en Allemagne nous privilégierons la dimension sectorielle, permettant de se focaliser sur une technologie, avec la notion de système technologique.

2.2. Les systèmes nationaux d'innovation

Si les approches concernant les SI s'attachent toutes à mettre en évidence les spécificités nationales en matière de création et de diffusion des innovations

technologiques, elles se démarquent néanmoins les unes des autres sur la conception de la technologie retenue ainsi que sur l'étendue des relations entre les différents acteurs.

2.2.1. Les spécificités nationales en matière d'innovation

Curieusement l'étude des SNI a commencé à la fin des années 1980 alors que se manifestaient de plus en plus nettement les signes de la globalisation économique (FREEMAN [1987, 1988], LUNDVALL [1988], NELSON [1988]). Le concept de système national d'innovation (SNI) permet de mettre en évidence la spécificité des procédures et des institutions utilisées dans les différents pays pour créer et diffuser des technologies. La répartition géographique non uniforme des firmes innovatrices et le maintien de certains avantages comparatifs sectoriels dans différents pays[365] viennent immédiatement soutenir l'existence de SNI. D'une manière plus générale, la capacité d'innovation est distribuée de manière non uniforme dans le système économique mondial et on peut distinguer une asymétrie d'*output* et une asymétrie institutionnelle (SAVIOTTI [1995]). En effet, chaque pays produit différents biens avec une structure institutionnelle très spécifique. Cette spécificité s'explique moins par la dotation de facteurs, que par les configurations institutionnelles et par le caractère local et cumulatif des connaissances. L'évolution des activités liées aux connaissances affiche des propriétés de dépendance du sentier et donc les choix passés (l'histoire) ont des effets sur les comportements et les politiques présentes et futures. La contradiction entre les SNI, entraînant la localité et l'hétérogénéité des innovations, et la mondialisation, entraînant une convergence des produits échangés, n'implique pourtant pas une convergence des structures institutionnelles de production et donc à terme une disparition des SNI. La continuité historique et la lenteur d'adaptation des institutions, surtout publiques, impliquent que différentes configurations institutionnelles peuvent conduire à un même résultat final. Cela justifie le maintien de politiques technologiques nationales, même si celles-ci doivent inévitablement intégrer l'intensité croissante des liens entre les différents SNI «ouverts ». En effet, le mimétisme institutionnel, c'est-à-dire la « greffe » d'une institution étrangère dans un SNI donné, n'est pas forcément une

[365] De longue date certains pays affichent une spécialisation dans des secteurs particuliers d'activités : les produits chimiques, les voitures haut de gamme et les machines outils en Allemagne ; les ordinateurs, les logiciels et le secteur de l'aérospatiale aux Etats-Unis ; l'électronique au Japon…

réponse pertinente aux problèmes de politique industrielle, puisque ce n'est pas un type d'institution qui crée un système, mais un ensemble d'interactions entre une série d'institutions et les informations qu'elles reçoivent de leur environnement (JOHNSON et LUNDVALL [1992], NIOSI *et al.* [1992]).

2.2.2. Les différentes conceptions des SNI

L'examen des différentes approches théoriques utilisant la notion de SNI montre certaines divergences quant à la conception de la technologie retenue ou au niveau des relations entre les différents acteurs. Nous donnons un aperçu synthétique des principales approches.

La paternité du concept de SNI est attribuée à FREEMAN [1987] qui le définit comme *« the network of institutions in the public and private sectors whose activites and interactions imitate, import, modify and diffuse new technologies »* [*ibid.*, p.1]. FREEMAN [1987, 1988, 1995] avance la notion de SNI pour marquer l'existence de différences internationales dans les adaptations institutionnelles qui suivent les changements de paradigmes socio-techniques entraînant l'apparition de grappes d'innovations et d'innovations radicales. Selon lui, les pays diffèrent dans leur capacité à produire et diffuser efficacement des nouvelles technologies (FREEMAN [1995]). Dans sa description et son analyse du SNI japonais après la 2ème guerre mondiale il se concentre sur quatre principaux éléments, donnant ainsi une définition plus opérationnelle du SNI (FREEMAN [1987, 1988]: (i) le rôle des politiques publiques, et en particulier du ministère du commerce international et de l'industrie (MITI), dans la prévision et l'orientation du changement technologique ; (ii) le rôle de la R&D des firmes en ce qui concerne l'assimilation et l'amélioration des technologies importées (*reverse engineering*) ; (iii) le rôle du système éducatif et de la formation dans la hausse des qualifications ; (iv) la structure conglomérale de l'industrie, l'intégration verticale des *keiretsus* minimise les coûts de transaction.

FREEMAN propose une analyse générale des SNI, assez éloignée de l'analyse évolutionniste, ce qui entraîne des imprécisions sur l'influence réelle des institutions sur le progrès technique. Selon GARROUSTE et KIRAT [1995] la conception de FREEMAN comporte un certain déterminisme technologique et s'attache plus aux nécessités de

l'architecture institutionnelle qu'aux marges d'action et aux formes d'organisation des processus d'innovation.

PORTER [1990] utilise la notion de SNI pour expliquer les différences internationales dans le succès de certaines industries à partir de quatre facteurs déterminants : (i) les conditions liées aux facteurs de production ; (ii) les conditions concernant la demande intérieure considérées comme capitales pour la compétitivité internationale ; (iii) les industries de « soutien » qui ont un rôle dans les flux de technologies ; (iv) la structure et les stratégies concurrentielles des firmes qui sont influencées par le contexte national. PORTER fait donc correspondre la notion de SNI aux caractéristiques de l'environnement national dans lequel les firmes mettent en œuvre leurs stratégies. Cependant, d'un point de vue analytique il ne propose pas d'outils pour comparer les différents SNI.

Enfin, au début des années 1990 deux autres études majeures sur les SNI ont été réalisées par LUNDVALL et ses collaborateurs [1992][366] et NELSON [1993]. Ces deux études se distinguent par une définition plus ou moins large des SNI. Les commentaires de LUNDVALL [1992, p. 12] permettent d'expliquer ces deux approches : *« The narrow conception would include organisations and institutions involved in searching and exploring – such as R&D departments, technological institutes and universities. The broad definition (…) includes all parts and aspects of the economic structure and the institutional set-up affecting learning as well a searching and exploring – the production system, the marketing system and the system of finance present themselves as subsystems in which learning takes place. »*

Le travail de NELSON [1993] s'inscrivant dans la définition étroite des SNI, a pour objet l'étude des politiques technologiques et du système scientifique et technologique de quatorze pays répartis selon leur niveau de revenus (hauts, moyens, bas). Ne cherchant pas à mettre à l'épreuve un cadre théorique précis, il s'attache à décrire l'évolution des activités de R&D en repérant les sources et les montants des financements, le rôle des universités et des politiques publiques, les caractéristiques des firmes selon les secteurs industriels… Ce type d'approche tend à minimiser

[366] Reprenant des travaux antérieurs de LUNDVALL [1988].

l'importance des institutions qui ont une influence macroéconomique au profit de déterminants strictement technologiques territorialement plus limités[367].

Dans la conception large, pour LUNDVALL [1992, p. 2] *« a system of innovation is constituted by elements and relationships which interact in the production, diffusion and use of new and economically useful knowledge (…) inside the borders of a national state »*. L'auteur place les interactions, c'est-à-dire les échanges de biens matériels, d'apprentissages et de connaissances, entre les producteurs et les utilisateurs de technologies (les universités, les firmes, les consommateurs finaux) au centre de son approche des SNI des pays scandinaves. Il complète ce niveau micro-économique par une perspective plus macro en distinguant des «blocs de développements[368] », c'est-à-dire certains secteurs clés du système productif dans lesquels les relations évolutives entre les agents économiques sont à l'origine d'innovations.

L'interaction entre les organisations composant le système reflète non seulement les relations de marché mais également un contexte culturel et social plus large. Les institutions ont alors une importance en façonnant la qualité de l'apprentissage interactif entre les organisations. Selon LUNDVALL [1992, p. 26] *« (…) they reduce uncertainties, coordinate the use of a knowledge, mediate conflicts and provide incentive systems. »* Bien que cette dernière approche des SNI soit rigoureuse, elle n'aborde pas directement la question du poids respectif et des fonctions assumées par les institutions formelles et informelles ainsi que leurs règles d'évolution.

Les approches par les SNI présentent un certain flou dans la définition même des systèmes (un groupe plus ou moins limité d'organisations ou d'institutions selon les conceptions) et une certaine hétérogénéité dans les problématiques définies. GARROUSTE et KIRAT [1995] soulignent que finalement caractériser un SNI dans sa version étroite revient à caractériser la politique technologique, alors que la version étendue recouvre des phénomènes autres que la politique de R&D. Notre objectif étant d'analyser le développement systémique d'une technologie d'ER précise dans un pays, il nous faut donc utiliser une voie médiane, méso-analytique, entre la pertinence du

[367] Comme par exemple les externalités de connaissance circulant dans les systèmes d'innovation régionaux.

[368] La notion de *« development blocks »* a été initialement introduite par DAHMEN [1989, p. 111] qui les définit comme *« a sequence of complementarities wich by way of a series of structural tensions, i.e., desequilibria, may result in a balanced situation »*.

concept de SI et son applicabilité. Compte tenu de ces éléments, l'approche par les systèmes technologiques (ST) va nous apparaître plus pertinente.

2.3. Les systèmes technologiques

Le processus par lequel une nouvelle technologie émerge, est améliorée et diffusée peut être étudié à travers la notion de système technologique, c'est-à-dire un système d'innovation limité à la considération d'une technologie particulière. Cette approche est particulièrement intéressante pour analyser la compétition entre des technologies déjà établies et une ou plusieurs technologies émergentes, et entre leurs systèmes technologiques respectifs. CARLSSON et STANKIEWICZ [1991, p. 111], à l'origine du concept, définissent un ST comme *« (…) a network of agents interacting in a specific* economic/industrial area *under a particular* institutional infrastructure *for the purpose of generating, diffusing, and utilizing technology (…). Technological systems are defined in terms of knowledge/competence flows rather than flows of ordinary goods and services. They consist of dynamic* knowledge and competence networks [369]*»*. Les auteurs soulignent que les frontières géographiques « naturelles » d'un ST peuvent correspondre à celle d'un pays, ce qui le rapproche d'un SNI, mais elles peuvent tout aussi bien avoir une dimension inférieure (régionale ou locale, comme par exemple la *Silicon Valley*) ou supérieure (internationale). Un ST est dynamique, c'est-à-dire que sa dimension est instable. Elle dépend des caractéristiques de la technologie et de son marché, des compétences des différents acteurs impliqués dans son développement, de leur localisation et de leur degré d'interdépendance…

2.3.1. Les composantes d'un système technologique

Un ST est composé de trois éléments principaux (CARLSSON et STANKIEWICZ [1991], JACOBSSON et JOHNSON [2000], EDQUIST [2001], JOHNSON et JACOBSSON [2003], JACOBSSON et BERGEK [2004]) : des organisations, c'est-à-dire des acteurs et les compétences techniques et autres qui leur sont associées, des réseaux et des institutions.

[369] Souligné par les auteurs.

2.3.1.1. Les organisations : des acteurs et leurs compétences

Les organisations[370] d'un ST comprennent l'ensemble des firmes (fournisseurs, fabricants, consommateurs), universités et laboratoires publics de recherche, agences publiques spécialisées, les apporteurs de capitaux… Parmi ces acteurs, deux types ont un rôle particulièrement important à jouer (UNRUH [2000, 2002]) :

- les *« prime movers »*, les organisations qui entrent les premières dans le secteur peuvent, de part leurs compétences techniques, leur prise de risque financier ou leur capacité de négociation politique fortement influencer le développement et la diffusion de la technologie ;
- les organisations à but non lucratif, comme les organisations sectorielles de professionnels et d'utilisateurs, en dehors des relations de marché, fédèrent des intérêts et des besoins collectifs pour tenter d'influencer à leur avantage l'environnement institutionnel[371]. Elles ont également à la fois un fort pouvoir d'influence sur la confiance et sur les attentes des utilisateurs quant aux possibilités futures d'une nouvelle technologie et un pouvoir de *lobbying* auprès des instances politiques. Ce type d'organisation joue un rôle important dans le processus de légitimation d'une nouvelle technologie

2.3.1.2. Les réseaux : les canaux de circulation des connaissances

Un ST est caractérisé par une organisation industrielle en réseaux technico-économiques[372] par lesquels circulent les informations et les connaissances tacites et codifiées (CARLSSON et STANKIEWICZ [1991]). Lorsque la technologie est standardisée et stable, les informations échangées entre les utilisateurs et les producteurs peuvent l'être à faible coût et sur de longues distances. Par contre, quand l'innovation

---

[370] *« Organizations are formal structures with an explicit purpose and they are consciously created.»* (EDQUIST and JOHNSON [1997, p.47]).

[371] Les organisations professionnelles sont par exemple souvent à l'origine de la définition de normes techniques et de codes de bonnes pratiques du secteur.

[372] CALLON [1993] définit le réseau technico-économique comme un ensemble coordonné d'acteurs hétérogènes : laboratoires publics, centres de recherche technique, entreprises, organismes financiers, usagers et pouvoirs publics qui participent collectivement à l'élaboration, à la production-diffusion de procédés de production, de biens et de services dont certains donneront lieu à une transaction marchande.

technologique est radicale et évolue ensuite de manière incrémentale, une proximité géographique et culturelle est nécessaire pour faciliter les échanges de connaissances tacites (LUNDVALL [1988]). CALLON [1993] propose une morphologie des réseaux permettant de représenter la circulation de la technologie entre différents pôles. Il distingue trois pôles principaux : un pôle scientifique qui est le lieu d'élaboration des connaissances scientifiques (centres et laboratoires de recherche publics et privés) ; un pôle technique, composé des services d'études et de développement privés et des centres d'essais publics, qui produit des *artefacts* (brevets, prototypes) ; enfin, le marché qui englobe les aspects relatifs à la commercialisation d'un bien. Deux autres pôles ont en charge les activités d'intermédiation des trois premiers : les pôles « transfert » et « développement » qui mettent en relation respectivement la science et la technologie et la technologie et le marché.

La notion de réseau est déterminante car elle marque le passage entre les comportements micro-économiques des firmes et les niveaux méso et macro-économique. Comme nous l'avons analysé dans le chapitre précédent, les externalités positives ont une importance cruciale dans le processus du changement technique. Les canaux des réseaux par lesquels transitent les effets externes répartissent les risques, réduisent l'incertitude et ont une influence décisive sur les choix des agents et donc sur l'efficacité macro-économique de ces choix, particulièrement en présence de rendements croissants d'adoption des techniques.

2.3.1.3. Le rôle des institutions dans le changement technique

Les défaillances de marché associées aux activités d'innovation rendent indispensables la prise en compte des institutions. Celles-ci, en régulant la création et la diffusion des connaissances scientifiques et techniques, ont une influence sur les formes adoptées par le changement technique[373]. Les institutions représentent les règles, les lois, les politiques publiques, mais aussi les normes culturelles et sociales, les routines et les conventions qui gouvernent les relations et les interactions entre les organisations

[373] En premier lieu les institutions qui définissent le régime des droits de propriété garantissant (ou non) une protection des innovations et un pouvoir de monopole aux firmes innovantes (Cf. Chapitre 2).

et les (groupes de) particuliers (EDQUIST et JOHNSON [1997])[374]. Elles englobent les « règles du jeu » qui influencent, sans garantie *ex ante* ou *ex post* d'efficacité sociale, le comportement des organisations en constituant des contraintes ou des incitations à l'apprentissage et à l'innovation. Notamment, les institutions, en économisant sur les coûts de transactions, permettent d'accroître la confiance dans les relations entre les organisations et donc d'éviter les comportements opportunistes (NORTH [1990]). De façon générale, elles améliorent le degré de « connectivité » du système (CARLSSON [1997]). Le cadre institutionnel influence les types et la stabilité des arrangements (coopératifs ou non) entre les organisations ainsi que les mécanismes de circulation et d'acquisitions des connaissances[375] et de formation des compétences.

2.3.2. Les fonctions d'un système technologique

Une manière d'analyser la dynamique d'un bon (ou mauvais) fonctionnement d'un ST est de se focaliser sur les fonctions qu'il accomplit. Cinq principales fonctions apparaissent primordiales (CARLSSON et STANKIEWICZ [1991], CARLSSON [1997], JOHNSON [1998], JACOBSSON et BERGEK [2004]) :

- *la création et la diffusion de nouvelles connaissances* : les innovations peuvent résulter de connaissances « véritablement » nouvelles, mais aussi par combinaison de connaissances déjà établies, par imitation… ;
- *l'orientation de la direction des recherches* : cette fonction consiste en premier lieu à identifier un problème et des besoins, et ensuite à sélectionner ou aider au développement des technologies les mieux adaptées en tenant compte de leur potentiel futur ;
- *l'apport de ressources* : celles-ci comprennent les capitaux financiers et l'ensemble des compétences nécessaires au développement d'une technologie. L'entrée

[374] La définition des institutions dans la littérature concernant les systèmes d'innovation et les systèmes technologiques est souvent imprécise. Les institutions sont parfois incluses dans les organisations. Nous retiendrons la conception de EDQUIST et JOHNSON [1997] qui est assez proche de celle de NORTH [1990].

[375] A travers les capacités d'absorption et d'émission de connaissances des firmes (COHEN et LEVINTHAL [1989], PENIN [2003]).

de nouveaux acteurs[376], porteurs de nouvelles connaissances, entraîne l'agrandissement d'un ST et permet d'assurer des fonctions jusqu'alors inaccomplies ;

- *la création d'économies externes positives, pécuniaires ou non* : par la diffusion de l'information dans le réseau, mais aussi par la création de ressources complémentaires, comme des services offerts aux firmes ;
- *la formation de nouveaux marchés* : les innovations technologiques apparaissent dans un premier temps sur des marchés niches, c'est-à-dire soit des marchés protégés réglementairement et/ou subventionnés, soit des marchés sur lesquels il n'existe pas de technologie concurrente. Les niches permettent de créer des apprentissages, de former les préférences des consommateurs et d'améliorer le ratio prix/performance des nouvelles technologies (KEMP *et al.* [1998])[377]. Dans un second temps, le développement de *« bridging markets »* par l'exploration de plusieurs niches avant une diffusion à plus grande échelle permet de standardiser la technologie, d'augmenter les volumes de production, de structurer le ST et d'inciter de nouveaux acteurs à se positionner sur la chaîne de valeur (GEELS [2002]).

Les fonctions d'un ST ne sont pas indépendantes les unes des autres et des changements dans l'une d'entre elle entraîne inévitablement des conséquences sur les autres. La dernière fonction consistant à soutenir la formation de nouveaux marchés est cruciale dans l'enclenchement d'un processus auto-entretenu de diffusion d'une nouvelle technologie.

2.4. Le système technologique allemand de l'énergie solaire PV

Ce paragraphe a pour objet de présenter et d'analyser le développement du ST allemand du solaire PV. Nous distinguerons deux phases dans son évolution. Une première phase « d'expérimentation », du début des années 1970 à 1989, pendant laquelle la politique fédérale de R,D&D a initié la création de nouvelles connaissances

[376] Par exemple des firmes spécialisées dans la fourniture à d'autres firmes de biens ou services spécialisés.

[377] KEMP *et al.* [1998, p.184] soulignent que *« Without the presence of a niche, system builders would get nowhere (…). Apart demonstrating the viability of a new technology and providing financial means for further development, niches help building a constituency behind a new technology, and set in motion interactive learning processes and institutional adaptation (…) that are all important for the wider diffusion and development of the new technology ».*

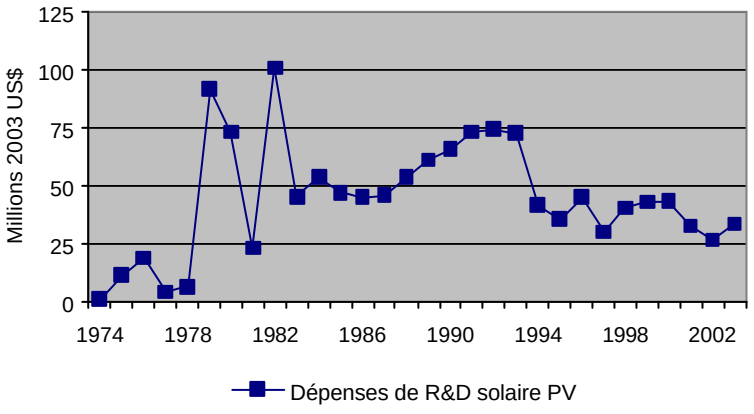
sur l'énergie solaire PV. Une deuxième phase, de 1989 à 2004, qui a vu l'élargissement du ST et la création d'un marché du solaire PV avec l'entrée de nombreux acteurs.

2.4.1. La phase d'expérimentation (fin des années 1960-1989) : le rôle crucial de la politique de R,D&D

Au milieu des années 1960, les restrictions sur les importations imposées par les Etats-Unis ont conduit Telefunken et Siemens, en collaboration avec le Batelle Institute, à s'engager pour la première fois en Allemagne dans des recherches sur les cellules solaires pour équiper les satellites de l'Agence spatiale européenne. En 1971, ces deux firmes ont développé des cellules au silicium cristallin, puis quelques années après des cellules en couches minces à base de cadmium (JOHANSON *et al.* [1993]). Une fois l'embargo américain levé, il faudra attendre la période suivant les chocs pétroliers pour que l'énergie solaire PV suscite à nouveau un intérêt. Au cours de cette période un influant mouvement écologiste Vert s'est développé, ne voyant l'avenir énergétique du pays ni dans le nucléaire, ni dans le pétrole. En 1978, le gouvernement fédéral a alors réagi en augmentant fortement les dépenses de R&D consacrées au solaire PV et depuis l'Allemagne figure parmi les pays qui engagent encore les plus gros budgets pour soutenir cette énergie (voir la Figure 18). Toutefois, il est nécessaire de largement relativiser la part affectée au solaire (33,5 millions d'euros en 2003), en la rapportant au total des dépenses de R&D pour l'énergie (300,5 millions d'euros en 2003).

Figure 18. Evolution des dépenses de R&D pour le solaire PV et du total des dépenses de R&D en Allemagne

Source : à partir de IEA online R&D database, www.iea.org



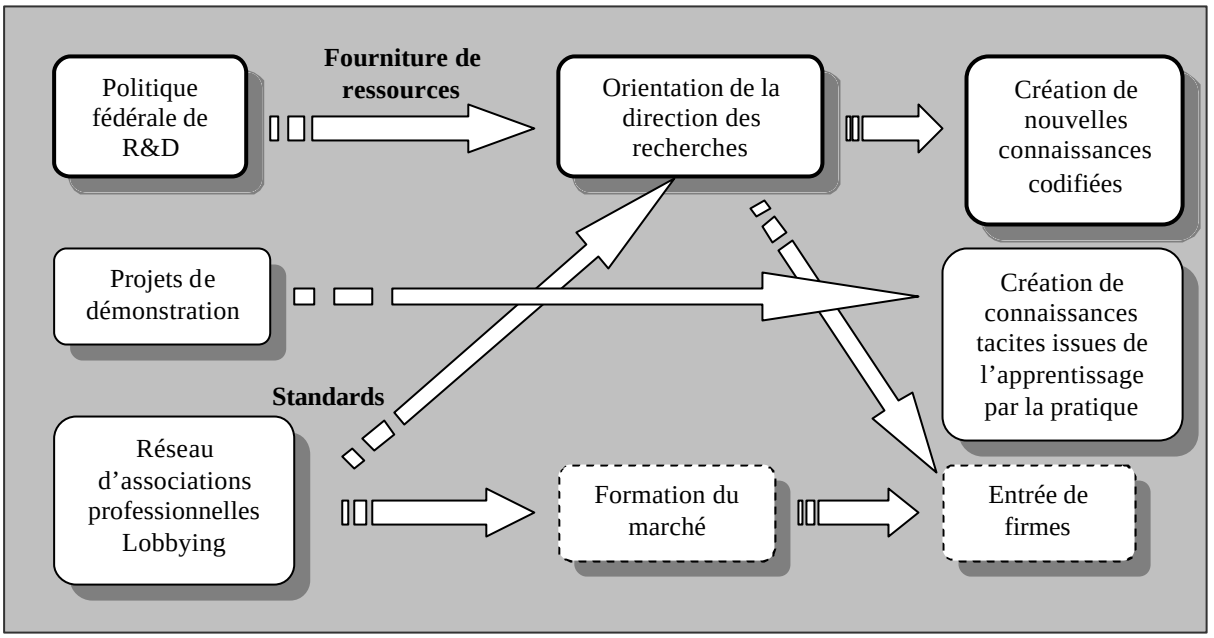
Au cours de la période 1977-1989, 18 universités, 39 firmes et 12 instituts de recherche ont bénéficié de soutiens financiers fédéraux pour mener des études sur le solaire PV[378] (JACOBSSON *et al.* [2002]). Cela a contribué à établir une large base de connaissances issue de la recherche académique et de la recherche industrielle. Les recherches ont privilégié les cellules au silicium cristallin, mais plusieurs matériaux en couches minces ont également été étudiés (tellurure de cadmium, désiléniure de cuivre indium)[379]. Le silicium amorphe a rapidement été perçu comme la technologie qui pourrait remplacer le silicium cristallin. Au début des années 1980, la firme MBB (Messerschmidt-Bölkow-Blohm) a commencé à développer des cellules au silicium amorphe en vue de fournir l'industrie spatiale. Une première unité de fabrication a été construite à la fin de la même décennie.

Ainsi au début de cette première phase de la constitution du ST allemand, la fonction « d'apport de ressources » soutenue par les dépenses de R&D publiques a permis de « créer de nouvelles connaissances » en explorant plusieurs trajectoires technologiques. En conséquence, « guidées dans leurs recherches », quelques firmes ont été incitées à entrer dans le secteur solaire PV (voir la Figure 19).

[378] Notamment sur l'exploration des différentes technologies solaire PV, leurs applications et les autres composants des systèmes.

[379] La firme NUKEM, fournisseur du secteur nucléaire, a mis en œuvre ses compétences dans le domaine chimique pour développer des cellules à base de sulphide de cadmium. Mais compte tenu des risques environnementaux associés à ce matériau, la firme a préféré s'intéresser ensuite au silicium amorphe et cristallin.

Figure 19. La phase d'expérimentation du système technologique allemand de l'énergie solaire PV (fin des années 1960-1989)



En 1983 le premier projet de démonstration a été mis en œuvre. L'installation solaire, entièrement financée par des crédits du gouvernement fédéral et utilisant des cellules solaires de la firme allemande AEG (anciennement Telefunken), affichait une puissance de 300 kWc, la plus importante en Europe à l'époque. Ce projet sera suivi en 1986, par un programme de démonstration qui aboutira à la construction de 70 installations jusqu'au milieu des années 1990 (IEA [1997, 1999]). Ce programme a eu pour but d'évaluer les technologies disponibles et de démontrer la faisabilité des systèmes solaires PV. En 1989, l'*utility* Bayenwerk a construit une première installation (320 kWc) en collaboration avec Siemens et BMW (EPIA [1995]). L'objectif de ce système était d'utiliser l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène pour des piles à combustible. A la suite de cette première collaboration, Bayenwerk et Siemens ont fondé Siemens Solar, qui par la suite est devenu un des plus importants producteurs de cellules PV au monde[380].

Ces premières installations ont porté la puissance solaire PV installée en Allemagne à 1,5 MWc en 1990. Si ce programme n'a eu que peu d'effet dans la fonction de « formation du marché », il a par contre permis, par son effet de démonstration, de créer de nouvelles connaissances tacites, issues de l'apprentissage par la pratique (voir la Figure 19).

[380] Voir *supra*.

Cette période de formation du système technologique allemand a été également marquée, par la constitution de trois types d'organisations, des groupes de pression, qui ont joué un rôle déterminant dans la promotion des ER (SCHEER [2001], EPIA [1995]).

Le premier type d'organisation rassemble surtout des particuliers. C'est le cas de la Société allemande pour l'énergie solaire, formée en 1975, qui réunit plusieurs milliers de membres (particuliers, scientifiques et représentants de l'industrie) dans le but de diffuser des informations sur les ER auprès de la classe politique et des industriels. Une autre organisation, Förderverein Solarenergie, créée en 1986, a été à l'initiative du concept de *« cost covering payment »*, repris ensuite dans les lois fixant les tarifs de rachat de l'électricité produite à partir des ER.

Le second type d'organisation concerne les associations d'industriels. En 1978, l'Association des industriels allemands de l'énergie solaire a été fondée dans le but de diffuser des informations de nature technique sur le solaire. Dans les années 1980, cette association a eu une grande influence sur les membres du parlement allemand.

Enfin, un troisième type d'organisation, Eurosolar, a été créée en 1988 afin de faire pression à l'intérieur même des partis politiques du pays. Eurosolar compte 65 membres issus de tous les partis présents au parlement allemand, excepté la CDU, et 800 élus aux niveaux local, régional et fédéral.

Représentant une importante force de pression, ces organisations vont s'employer à modifier l'environnement institutionnel, et plus largement l'environnement de sélection, pour abaisser les barrières et favoriser la diffusion des technologies des énergies renouvelables. Une partie de leurs activités porte directement sur les technologies, comme la définition de standards et de normes techniques. L'autre partie, plus informelle, concerne la création de réseaux s'étendant à tous les niveaux du pays afin de diffuser les informations et d'impliquer un maximum d'acteurs et de parties prenantes sur l'énergie solaire (élus, industriels, collectivités locales et particuliers). Compte tenu de la spécificité de l'organisation, très décentralisée, du secteur électrique en Allemagne, faisant intervenir un très grand nombre d'acteurs[381], cette tâche n'a pas

[381] La production électrique en Allemagne est assurée par 9 compagnies nationales qui représentent 80% de la production d'électricité et par environ 520 compagnies régionales et municipales qui fournissent 10% de la production au niveau régional et au niveau municipal. 6 compagnies nationales assurent l'ensemble du transport et environ 40% de la distribution d'électricité. La part restante de la distribution est assurée par environ 900 compagnies électriques aux niveaux régional (30%) et municipal (30%) (FINON [2001]).

été aisée. Mais la forte connectivité de ces réseaux, à tous les échelons du pays, favorise la création et la circulation d'externalités positives. Les externalités prennent la forme d'informations techniques, mais aussi d'informations « grand public » qui débordent des projets de démonstration. En réduisant les risques, elles facilitent les coopérations et les apprentissages interactifs entre firmes privées et entre les firmes et les organismes de recherche publics.

Cette première phase d'exploration et d'expérimentation du système technologique allemand du solaire PV permet surtout de mettre en évidence la fonction cruciale «d'apport de ressources » qu'ont assuré les premiers programmes fédéraux de R,D&D. Ces derniers ont orienté rapidement les recherches des firmes vers une certaine variété technologique. En soutenant des installations pilotes de démonstration, ils ont ensuite contribué à la création de nouvelles connaissances et de nombreux apprentissages issus de la pratique. Pour autant, à ce stade, le système technologique n'a pas encore développé de dynamique de croissance auto-entretenue et il n'existe pas de marché du solaire PV.

2.4.2. L'enclenchement d'une dynamique de croissance (1990-2003)

2.4.2.1. Le succès du premier programme de R,D&D et les difficultés des industriels

Cette deuxième période est marquée, comme la première, par le rôle essentiel des budgets de R,D&D affectés au solaire PV. Même s'ils connaissent des variations temporaires d'une année à l'autre, ils se maintiennent à des niveaux parmi les plus élevés des pays de l'AIE (entre 45 et 50 millions de dollars par an)[382]. Entre 1990 et 1999, 15 universités, 41 firmes et 17 instituts de recherche supplémentaires vont bénéficier de ces financements (JACOBSSON *et al.* [2002]). En moyenne ces derniers sont affectés pratiquement à parts égales entre la technologie au silicium cristallin et celles en couches minces, même si la première bénéficie de plus d'attention du fait de l'avancement de son développement et des interrelations technologiques avec l'industrie électronique.

[382] Voir *infra*.

En 1990, le ministère fédéral de la recherche et de la technologie a lancé, conjointement avec les gouvernements des régions, le « Programme d'analyse et de mesure de 1 000 toits solaires » afin d'établir des règles d'installation sur les constructions, d'optimiser l'ensemble des composants et d'inciter les particuliers à économiser l'énergie (ERGE *et al.* [2001]). Ce programme a été initié en 1988, à la suite d'une résolution du parlement allemand proposant d'augmenter les crédits de R,D&D pour les ER[383]. Cette proposition est intervenue dans un contexte marqué à l'époque par un vif débat sur la politique énergétique nationale et, particulièrement, sur les parts à accorder à la production d'électricité à partir du charbon et du nucléaire. A la suite de l'accident de Tchernobyl en 1986 l'opposition, le SPD et les Verts, et de nombreux *Länders* ont mis en avant les conséquences environnementales des choix de politique énergétique et réclament l'abandon du nucléaire. De 1990 à 1995 le succès du programme « 1 000 toits solaires » a permis l'installation de plus de 2 250 systèmes (1-5 kWc unitaires), totalisant une puissance de 5,3 MWc (EPIA [1995]). Une centaine de toits a été équipée d'appareils permettant de mesurer et d'analyser les performances de chaque élément. Parallèlement des enquêtes ont été réalisées auprès des utilisateurs sur leur appréciation des aspects architecturaux et des conditions de fonctionnement. La collecte de ces informations a permis, après divers types d'analyses (techniques, économiques et sociologiques), de fixer des standards d'installation et de connexion au réseau, et de mettre au point de nouveaux onduleurs, plus fiables. En même temps l'ensemble des installateurs impliqués dans le programme avait acquis un bon savoir-faire. De nouvelles connaissances, codifiées (standards) et tacites (apprentissages), ont donc été créées en aval de la filière solaire PV.

Cependant, hormis les installations PV réalisées dans le cadre du programme « 1 000 toits solaires », le marché allemand n'a pas connu de véritable démarrage et les industriels nationaux ont subi des pertes financières importantes. Une phase de sélection des firmes s'est alors produite, conduisant le principal fabricant, Siemens, à s'implanter et à développer ses capacités de production surtout aux Etats-Unis *via* le rachat de Arco. La plupart des autres fabricants nationaux de plus petite taille a été absorbée par la firme ASE en 1994, elle aussi implantée aux Etats-Unis par le biais du rachat de Mobil Solar (JACOBSSON *et al.* [2002]). Ainsi, après quasiment une vingtaine d'années d'efforts de

[383] Le ministère de la recherche et de la technologie a également défini un programme visant à installer 250 MW d'éolien.

R,D&D le marché des cellules PV en Allemagne n'était pas parvenu à enclencher une phase de croissance, les producteurs nationaux réalisant l'essentiel de leur activité aux Etats-Unis, où le marché solaire était dynamique[384] (NORBERG-BOHM [2000]).

Les conditions de rachat de l'électricité produite à partir du solaire et des autres ER en Allemagne avaient été publiées par la loi *Stromeinspeisungsgesetz*[385] (ou Electricity feed-in law, loi EFL) de 1991 (BEICHBERGER et REICHE [2004]). Soutenue par l'association des propriétaires de petites installations hydroélectriques et par l'industrie éolienne naissante, cette loi avait été votée, contre l'avis des compagnies électriques, grâce à la mobilisation du groupe parlementaire Eurosolar qui avait réussi à convaincre la majorité détenue par la CDU. La loi EFL obligeait les *utilities* à racheter toute l'électricité produite à partir des sources renouvelables, entraînant un surcoût surtout pour celles situées près des installations[386]. Le prix payé correspondait à un pourcentage du prix de vente aux consommateurs résidentiels[387]. Contrairement à l'éolien, qui bénéficiait d'aides supplémentaires prévues par le programme « 250 MW », le niveau des tarifs, environ 8,5 c€/kWh, n'était pas incitatif pour le solaire PV (CHABOT [2000]). C'est pourquoi à partir de 1992, l'association Förderverein Solarenergi, Eurosolar et des groupes de militants locaux pour l'environnement ont joué de leur influence auprès des compagnies de distribution municipales afin que des tarifs de rachats plus élevés soient appliqués au solaire PV. Ces actions de lobbying au niveau local, ont trouvé un premier aboutissement lorsqu'en 1994 l'*utility* de ville de Aachen a décidé d'appliquer des tarifs beaucoup plus élevés que ceux prévus par la loi EFL (SCHEER [2001]). De nombreuses autres compagnies municipales ont ensuite suivi ce modèle. La même année, Bayernwerk a été la première grande *utility* à investir dans une installation solaire PV de 50 kWc et à mettre en place une « tarification verte ». La

[384] En 1990, 25% des productions réunies de Siemens et ASE (2,3 MWc) étaient réalisées en Allemagne, les 75% restants (7 MWc) aux Etats-Unis. En 1996 la production de cellules PV en Allemagne a été très faible (<0,2 MWc).

[385] Loi sur la fourniture d'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables.

[386] Du fait de la structure régionalisée de la distribution d'électricité, la loi EFL faisait supporter le surcoût de l'achat de l'électricité verte uniquement à la compagnie locale (dans la limite de 5% de l'électricité distribuée). Les compagnies électriques présentes dans les zones fortement ventées pouvaient donc être fortement pénalisées par le rachat de l'électricité éolienne.

[387] Le tarif de rachat était fixé à 90% du prix payé par les consommateurs résidentiels pour l'éolien et le solaire et entre 65 et 80% selon la puissance des installations pour l'hydraulique et la biomasse (BECHBERGER et REICHE [2004]).

démarche de Bayernwerk a consisté à présenter à une partie de ses clients, qui étaient susceptibles d'avoir une disponibilité à payer pour protéger l'environnement, la possibilité de payer plus cher l'électricité produite à partir de l'installation solaire[388]. Ces initiatives ont permis de maintenir un minimum d'activité sur le marché du solaire PV après la fin du programme « 1 000 toits solaires » et ont révélé un certain intérêt des consommateurs pour l'électricité verte.

2.4.2.2. Le programme « 100 000 toits solaires » et la loi EEG de 2000 : l'élargissement du système technologique

Depuis 1993, Eurosolar et l'Association des industriels allemands de l'énergie solaire travaillaient sur le projet d'un grand programme d'installation de 100 000 toits solaires. Mais les propositions de ces organisations venaient se heurter régulièrement à l'opposition des compagnies électriques dont la production était assise sur les technologies énergétiques conventionnelles centralisées et qui militaient auprès du parlement pour une suppression de la loi EFL de 1991. En 1997, un groupe de parlementaires a été chargé de dresser un bilan et de faire des propositions afin de maintenir ou d'amender la loi EFL. Sous la forte pression du lobby de l'industrie éolienne, le maintien d'une loi au niveau fédéral a été retenu et la loi EFL allait être révisée (JACOBSSON *et al.* [2002]).

Au cours de cette même période les industriels allemands ont intensifié leur lobbying et ont obtenu en 1998 de la coalition « Rouge-Vert » la mise en place du programme « 100 000 toits solaires » à partir de 1999. Ce programme, très ambitieux, doté d'un budget de 350 millions d'euros, a pour objectif d'atteindre une puissance installée de 350 MWc en 2003. L'objectif est de promouvoir l'installation de systèmes solaires connectés auprès des particuliers, des associations et des petites et moyennes entreprises, et de poser les bases pour le développement pérenne d'une industrie solaire nationale. La principale aide financière a consisté en l'octroi d'un prêt à long terme (20

[388] La tarification verte (*« green princing »*) a été appliquée pour la première fois aux Etats-Unis dans le Colorado avec le mouvement de déréglementation du secteur électrique. Certaines *utilities* ont voulu « capter » la disponibilité à payer de certains de leurs clients pour de l'électricité verte. Sur le même principe aujourd'hui dans les marchés électriques déréglementés, on parle plutôt de « marketing vert » à propos des offres de certains distributeurs d'électricité qui cherchent à différencier leurs produits (BIRD *et al.* [2002]).

ans), d'un montant proportionnel à la puissance du système PV installé (maximum 500 000 euros) avec un taux d'intérêt bonifié fixe (1,91% en 2003) (BERCHBERGER et REICHE [2004]). Après une période de démarrage, le nombre de systèmes installés a fortement augmenté à partir de 2000, lorsque sont entrés en application les nouveaux tarifs de rachat de l'électricité avec la loi EEG[389]. Le nombre de systèmes acceptés chaque année dans le cadre du programme est passé de 3 522 (8,9 MWc) en 1999 à 19 882 (146 MWc) en 2003, et la puissance moyenne des systèmes installés a presque triplé en quatre ans (voir le Tableau 4). La banque du crédit pour la reconstruction, responsable de la mise en œuvre du programme, a stoppé l'octroi de nouveaux prêts en juin 2003, l'objectif de 350 MWc ayant été atteint.

Tableau 4. Résultats du programme « 100 000 toits solaires »
Source : à partir de IEA [2003]

	Puissance prévue (MWc)	**Systèmes acceptés** (MWc)	**Nombre de systèmes PV**	**Taille moyenne des systèmes PV** (kWc)	**Puissance annuelle installée*** (MWc)
1999	10	8,9	3 522	2,5	13
2000	50	36,6	7 819	4,7	42
2001	65	75,8	19 326	3,9	78
2002	80	78	15 191	5,1	83
2003	95	146	19 882	7,3	130
Total	**300**	**345**	**65 740**		**346,3**

** Installations connectées au réseau*

Le succès du programme « 100 000 toits solaires » a été assuré par la combinaison d'une incitation à l'installation des systèmes et par le niveau élevé des tarifs de rachat de l'électricité solaire depuis 2000. Bénéficiant d'un assez large consensus politique et soutenue surtout par les Verts, Eurosolar et les associations professionnelles du secteur des ER, la loi *Eneuerbare Energien Gesetz* (EEG) a remplacée la loi EFL en 2000. La loi EEG a procédé à une révision du mode de calcul des prix de rachat afin de réduire une partie de la rente dont bénéficiaient certains producteurs. Les nouveaux tarifs, applicables à travers des contrats de 20 ans, introduisent une dégressivité annuelle (-5%/an pour le solaire)[390] permettant de prendre en compte les avancées technologiques réalisées par chaque filière. La loi EEG est assortie d'un dispositif de «contrôle-commande » permettant un ajustement des tarifs

[389] Voir *supra*.

[390] La dégressivité des tarifs est de -1,5 %/an pour l'éolien et de -1%/an pour le solaire. Pour l'éolien une modulation en fonction de la localisation des installations est également introduite.

tous les deux ans en fonction des résultats obtenus. Si la hausse moyenne des tarifs pour l'ensemble des ER a atteint à peine 10%, elle a été beaucoup plus substantielle pour le solaire PV puisque le prix moyen du kilowattheure est passé de 8,25 à 50,62 centimes d'euros[391] (IEA [2004a], BERCHBERGER et REICHE [2004). En outre, afin d'éviter d'alourdir les charges financières des compagnies électriques et de dissiper les problèmes d'équité entre elles, la loi EEG instaure un système de compensation entre les compagnies de transport et les compagnies de distribution et *in fine* le surcoût entraîné par le rachat de l'électricité verte est mis à la charge du consommateur final (estimation à 5,34 €/an/abonné) (CHABOT [2000])[392].

En réaction à ces nouvelles conditions de marché un nombre croissant d'acteurs a rapidement pris des positions en Allemagne dès 1999 avec l'annonce du programme « 100 000 toits solaires ». Ces industriels, déjà en place ou nouveaux entrants, déjà actifs dans le solaire ou non, ont permis d'élargir considérablement le système technologique en améliorant la division du travail le long de la chaîne de valeur, en apportant de nouvelles ressources (financières, compétences technologiques) et en favorisant la création de nouvelles connaissances (voir la Figure 21).

Ainsi, ASE a décidé d'investir dans une unité de fabrication de cellules (20 MWc de capacité) en mettant en œuvre les compétences technologiques acquises aux Etats-Unis à travers Mobil Solar. Percevant ces mêmes opportunités de croissance, Shell Solar est entré sur le marché allemand en mettant en commun ses activités sur le solaire avec celles de Siemens Solar dans une *joint-venture*[393] à laquelle participait également E.ON, actionnaire initial de Siemens Solar. En 1999, une usine de fabrication de cellules à Gelsenkirchen d'une capacité initiale de 10 MWc/an a été construite, sa capacité a été portée à 25 MWc/an depuis (SYSTEMES SOLAIRES [1999]). ASE et Shell Solar et de nombreuses firmes nouvelles entrantes dans le secteur solaire ont bénéficié de subventions fédérales et/ou régionales pour démarrer leur activité. Ainsi la fonction « d'apport de nouvelles ressources » de l'Etat fédéral ou des régions ne s'est pas limitée

[391] Voir le détail des tarifs révisés en 2004 en ANNEXE 10.

[392] Voir CHABOT [2000] pour une présentation détaillée du système de compensation de l'électricité verte entre les compagnies de transport et de distribution.

[393] Les participations initiales étaient les suivantes : Siemens 34%, E.ON 33% et Shell 33%. En 2002 Shell a racheté l'ensemble des parts de ses partenaires. (Shell Solar press releases, 28/02/2001, 24/01/2002, www.shellsolar.com)

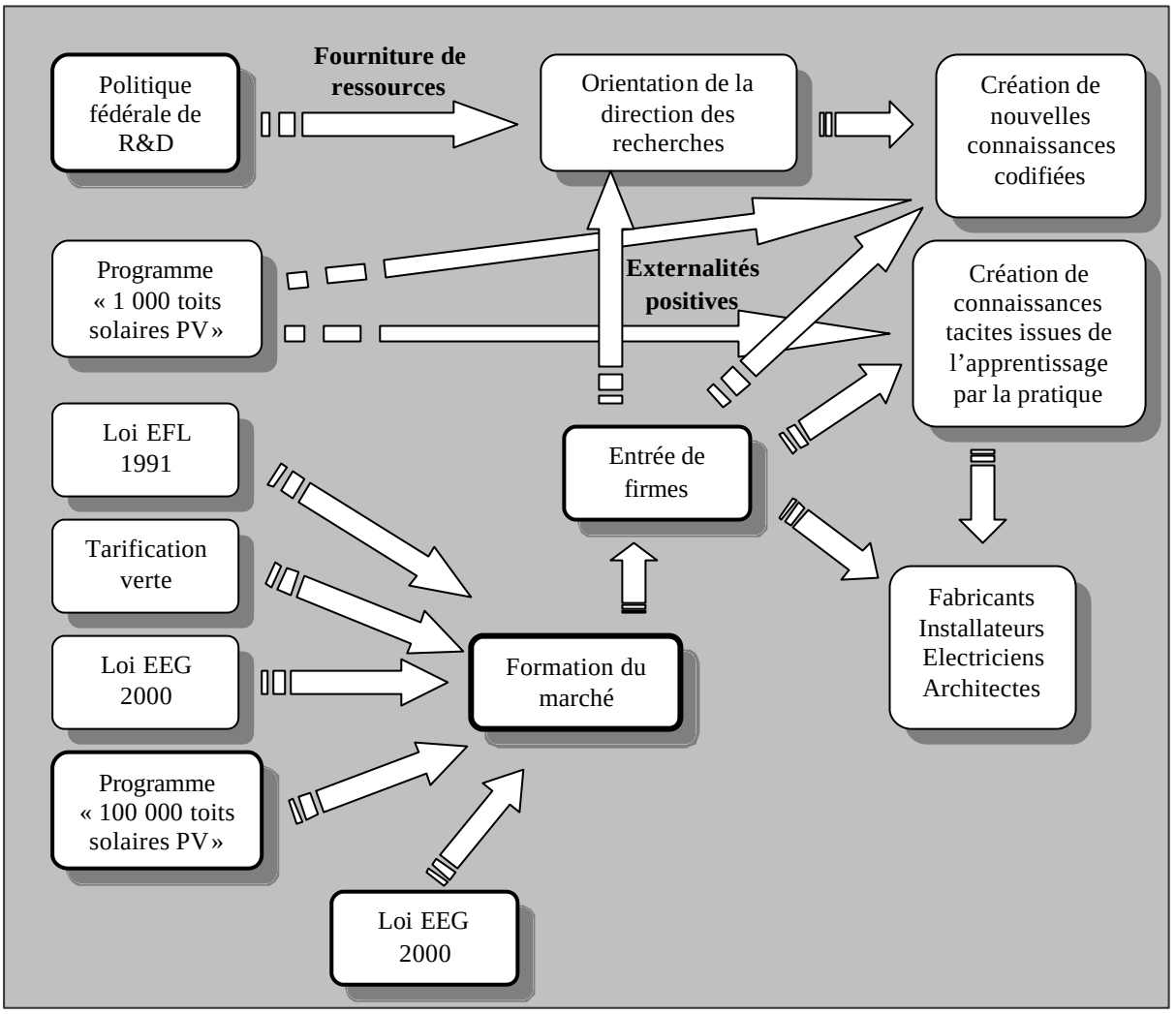
à la politique de R,D&D. Depuis 1996, avec ASE et Shell Solar, le nombre de fabricants de cellules et de modules n'a cessé de croître. En 2003, 6 firmes[394] ont fabriqué des cellules et 18 firmes ont assemblé des modules, ce qui a placé l'Allemagne au deuxième rang mondial derrière le Japon. Les cellules au silicium cristallin représentent l'essentiel de la production, mais certaines firmes comme Antec Solar, fondée par d'anciens chercheurs du Batelle Institute[395], ou Wurth Solar, en collaboration avec l'institut ZSW de l'université de Stuttgart, cherchent à industrialiser des procédés de production pour les technologies en couches minces. A la différence de la technologie du silicium cristallin qui a bénéficié de la base de connaissances de l'industrie électronique, la technologie des couches minces nécessite un soutien de la fonction « création de nouvelles connaissances », non seulement sur les cellules elles-mêmes, mais également sur les chaînes de fabrication. Pour l'instant aux niveaux mondial et régional aucun procédé n'est standardisé et les quelques firmes ayant investi sur ce segment ne révèlent pas les caractéristiques de leurs prototypes. Ces comportements stratégiques, destinés à se protéger des imitations des concurrents ou des fournisseurs, sont motivés par l'éventuel bénéfice (privé) que les firmes pourront en retirer si elles accèdent à l'étape industrielle. Cependant pour le moment, faute d'émission et de partage de connaissances, aucun processus d'apprentissage ne peut s'enclencher au niveau collectif, ce qui bloque le développement de ce segment

De nombreuses firmes se sont également positionnées en aval de la chaîne de valeur. Les toits solaires représentant la quasi-totalité des nouvelles installations, un très grand nombre de PME du secteur électrique se sont portées sur ce créneau. Ces installateurs ont d'abord bénéficié de stages de formation de la part des fabricants de modules, et des cycles d'apprentissage sur le solaire PV ont été développés dans le systèmes éducatif. Egalement, des réseaux d'architectes sont associés aux fabricants de toits solaires ainsi qu'à des entreprises du secteur de la construction (IEA [2003a]). Ainsi, tout un ensemble d'acteurs interagissent dans les phases de construction afin d'intégrer au mieux les installations solaires, qu'elles soient individuelles ou collectives.

[394] Shell Solar (9 MWc), Deutsche Cell (17 MWc), RWE Schott Solar (42 MWc), Q-cells (28,2 MWc), Ersol Solar Energy (9 MWc) et Sunways 6,7 MWc.

[395] Voir *infra*.

Figure 20. La phase d'élargissement et de croissance du système technologique allemand de l'énergie solaire PV (1989-2003)



Désormais, les firmes entrant dans le secteur solaire en Allemagne viennent s'insérer dans un large réseau d'acteurs. L'importance de la base de connaissance développée dans les universités et les instituts de recherche fait de ces institutions des partenaires très attractifs pour les firmes. Les coopérations entre la recherche académique et les firmes permettent d'une part de transférer et de partager des connaissances scientifiques codifiées, et, d'autre part, de créer de nouvelles connaissances tacites, engendrées au cours des processus d'apprentissage interactifs sur l'ensemble des segments de la chaîne de valeur du solaire. Les firmes réalisent des applications de la recherche de base dans un premier temps et agissent ensuite de façon rétroactive sur la définition et l'orientation des futurs programmes scientifiques. Dans certains *Länders*, comme en Bavière, l'obtention de financements régionaux pour la R,D&D pour le solaire PV est conditionnée à la réalisation préalable de partenariats

firmes-recherche académique (JACOBSSON *et al.* [2002]). En aval de la filière, les processus d'apprentissages interactifs sont également développés entre les assembleurs de modules, les installateurs, les architectes, et la fonction de création de nouvelles connaissances intervient à différents points de la chaîne de valeur.

* * *

Cette section avait d'abord pour objet de présenter, en partant du cadre général des systèmes nationaux d'innovation, la notion de système technologique. Celle-ci permet d'étudier la constitution d'une filière technologique particulière en prenant en compte les organisations et leurs compétences techniques, les institutions et les réseaux, vecteurs de la circulation des connaissances tacites et codifiées. Nous avons ensuite analysé le développement du ST de l'énergie solaire PV en Allemagne. La distinction d'une première phase « d'expérimentation », de 1970 à 1989, a permis de mettre en évidence le rôle crucial de la politique fédérale de R,D&D et du système de recherche dans la fourniture de ressources pour créer de nouvelles connaissances (surtout codifiées dans un premier temps) sur l'énergie solaire PV. La deuxième phase a montré le début d'un processus de croissance auto-entretenue. D'abord, la politique de R&D et le programme public « 100 000 toits solaires », influencés par les groupes de pression, ont entraîné la création d'un marché tout en continuant à orienter les recherches. Ensuite, la loi EEG de 2000, en fixant durablement les tarifs de rachat bonifiés de l'électricité « verte », a « réactivé » l'activité des firmes en place et a incité de nombreux et nouveaux acteurs (fabricants, installateurs, architectes) à se positionner sur la chaîne de valeur du solaire PV. Ces acteurs, soutenus par les institutions de recherche et le système éducatif, ont contribué à la création de nouvelles connaissances par le biais d'apprentissages par l'usage. En outre, ils sont venus renforcer le pouvoir des associations professionnelles qui participent à la légitimation des nouvelles technologies, comme le solaire PV, et au façonnage d'un environnement favorable à leur développement. Il y a donc eu co-évolution de la technologie et de son environnement institutionnel.

L'analyse du ST du solaire PV en Allemagne permet de tirer deux enseignements pour le *policy maker*. Le premier enseignement concerne « l'espace » qu'il est nécessaire de créer pour donner une prise au développement du marché d'une nouvelle technologie. La politique technologique seule est insuffisante pour former un tel espace ; elle doit être assortie de mesures fortes de soutien du marché. Le deuxième

enseignement porte ensuite sur la nécessité de faire coexister et de trouver un équilibre entre les mesures de formation du marché (en aval) et celles de maintien de la diversité technologique (en aval), bien que celles-ci soient coûteuses, le temps d'établir des *dominant design* donnant lieu à des économies d'échelle et d'apprentissage.

Section 3. Le système technologique de l'éolien au Danemark

Bien que considérée aujourd'hui comme une « énergie » nouvelle, l'énergie éolienne s'est développée dès le XIXème siècle aux Etats-Unis essentiellement, mais aussi en Europe, sous la forme d'éoliennes rudimentaires destinées au pompage de l'eau (ACKERMANN et SODER [2000]). Au début du XXème siècle, les premières conceptions et mises au point d'éoliennes pour la production d'électricité ont été l'œuvre du danois LA COUR qui fait aujourd'hui figure de père fondateur des éoliennes modernes.[396] A la fin des années 1970 l'éolien, à l'instar du solaire PV, apparaîtra comme une technologie environnementale alternative aux sources d'énergies fossiles. Cette section vise à étudier les spécificités du développement du système technologique de l'éolien à travers les politiques de R&D, le Programme éolien danois et ses deux sous-systèmes technologiques, et les instruments économiques et réglementaires de soutien.

3.1. Les politiques de R&D pour l'éolien : évolution internationale et au Danemark

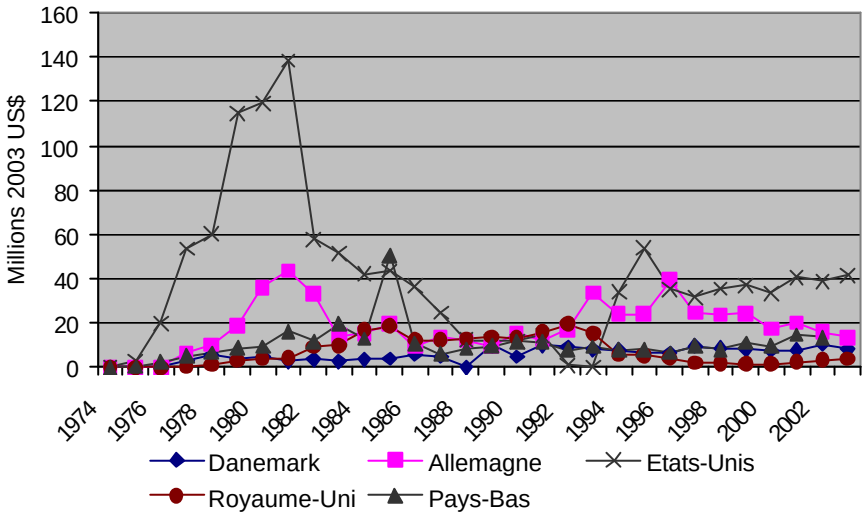
3.1.1. L'inefficacité des politiques de « technology push »

Après la première crise pétrolière de 1970, la hausse des prix des hydrocarbures et les problèmes de sécurité d'approvisionnement ont fait apparaître un intérêt des pays industrialisés pour l'éolien en tant que source alternative aux énergies fossiles pour produire de l'électricité. Plusieurs pays comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Allemagne, le Danemark mais surtout les Etats-Unis, ont mis en œuvre des programmes de R&D *« techology push »*, d'ampleur variable, pour développer rapidement des éoliennes multi mégawatts (GIPE [1995]). Ces programmes avaient en commun la volonté de s'appuyer sur les bases de connaissances des industries

[396] P. LA COUR, enseignant «l'électricité éolienne » à la haute école populaire d'Askov, a formé la Société des électriciens éoliens en 1904 au Danemark. Ses travaux ont permis la commercialisation de petites éoliennes pour l'électrification rurale au début de la première guerre mondiale. En 1918, 120 compagnies d'électricité danoises utilisaient des éoliennes pour des puissances unitaires allant de 20 à 35 kW. La puissance totale installée au Danemark était évaluée à 3 MW ce qui permettait de couvrir environ 3% des besoins en électricité (KROHN [2002]).

aéronautique et électrique pour permettre à la technologie éolienne traditionnelle de réaliser un « saut technologique » afin de produire de l'électricité à un coût peu élevé (JOHANSSON *et al.* [1993], STREET et MILES [1996], MENANTEAU [1999, 2000c]). Parmi les pays de l'AIE les Etats-Unis se sont distingués par l'ampleur des financements accordés à la R&D du secteur éolien. A partir de 1975 (2,7 millions de dollars) leur budget a été en très forte augmentation jusqu'en 1981 (138,5 millions de dollars), avant de connaître une baisse brutale, puis à nouveau un regain depuis le milieu des années 1990 (voir la Figure 21). Hormis l'Allemagne, qui a maintenu un niveau moyen de dépenses relativement soutenu sur l'ensemble de la période, les budgets des autres pays n'ont pas, en moyenne, dépassé les 20 millions de dollars par an.

Figure 21. Evolution des dépenses de R&D consacrées à l'énergie éolienne
Source : à partir de IEA online R&D database, www.iea.org



En collaboration avec les agences publiques, plusieurs firmes américaines et européennes des secteurs aéronautique et spatial, mais aussi de l'électricité, se sont lancées dans le développement de prototypes d'éoliennes de grande puissance. Ce fut le cas de Boeing (2 MW), Hamilton Standard (4 MW) ou Westinghouse Electric Company (3,2 MW) aux Etats-Unis, de British Aerospace et WEG (3 MW) au Royaume-Uni, de MAN (3 MW) et MBB (1 MW) en Allemagne (BREMONT et LOISEAU [1986], JOHANSSON *et al.* [1993], GPE [1991, 1995])[397]. Les technologies employées se sont

[397] On peut noter que dans la mise en œuvre des programmes pour développer des éoliennes multi-mégawatts, la France s'est relativement démarquée de la plupart des autres pays. A la fin des années 1970 la politique française conduite par le Comité pour l'Energie Solaire (COMES) et par l'Agence Française

vite révélées inadaptées à l'éolien. La plupart de ces grandes éoliennes, en plus de produire de l'électricité à un coût largement supérieur aux modèles de petite taille, ont connu de nombreuses difficultés techniques après seulement quelques milliers d'heures de fonctionnement. Les problèmes rencontrés ont concerné essentiellement la fiabilité des principaux composants et la résistance des matériaux qui avaient été employés. La plupart des firmes impliquées dans ces programmes se sont progressivement désengagées du secteur éolien au cours des années 1980, aucune n'ayant mis à profit leurs connaissances technologiques de base pour accéder au stade industriel[398].

3.1.2. La politique de R&D au Danemark

Le Danemark possède une longue tradition historique dans l'utilisation des prêts et des subventions pour stimuler le développement des ER. Les premiers prototypes de LA COUR en 1895, puis ceux de son disciple JUUL, concepteur des éoliennes modernes dans les années 1950, avaient déjà bénéficié de soutiens financiers du gouvernement (VAN EST [1999], KROHN [2002]). Pourtant, dans les années 1970, alors que plusieurs pays consacraient d'importants financements au développement de grandes éoliennes, le Danemark s'est démarqué par un niveau modeste de ses dépenses[399]. La contradiction apparente entre ces budgets de R&D, relativement peu élevés à l'époque, et la position dominante des industriels danois dans l'énergie éolienne actuellement[400], et ceci depuis le milieu des années 1990, a été souvent commentée par les économistes et les historiens du changement technique (KARNOE [1993], HEYMANN [1998], MENANTEAU [1999, 2000c], KAMP *et al.* [2004]). Ces derniers remarquent, comme cela a été effectivement le cas, qu'à la différence des politiques *« technology push »*, la trajectoire technologique danoise a suivi un schéma *« bottom up »* de développement de petites

---

pour la maîtrise de l'Energie (AFME), a également cherché à transférer des connaissances de la recherche aéronautique vers l'éolien. Mais finalement la priorité a été donnée au développement d'aérogénérateurs de moyenne puissance de 50 à 200 kW dans le but d'équiper des sites isolés non reliés au réseau dans les DOM-TOM.

[398] US Windpower (devenu Kenetech Windpower en 1993) n'a pas participé aux grands programmes de R&D et a été le seul fabricant américain a maintenir ses activités au-delà des années 1980. Malgré un élargissement de ses ventes au niveau mondial la firme a fait faillite en 1996 (GIPE [1991]).

[399] Sur la période 1974-1981 alors que les Etats-Unis ont consacré 509 millions de dollars pour développer l'éolien, le Danemark n'a dépensé que 21 millions de dollars.

[400] Voir *supra*.

éoliennes. Celles-ci ont bénéficié de séries d'innovations incrémentales engendrées à partir d'une base de connaissances techniques empruntée aux secteurs industriels traditionnellement forts au Danemark (machinisme agricole, construction navale). De ce fait, ces études en concluent que la politique de R&D a joué un rôle mineur dans la croissance de cette industrie et que celle-ci a été surtout soutenue par des incitations financières à l'investissement et à la production d'électricité.

Notre analyse de l'évolution du système technologique danois de l'énergie éolienne vise à nuancer ces commentaires en montrant que, même si les dotations financières des budgets de R&D n'ont pas été proportionnellement aussi élevées que dans d'autres pays, le cadre développé progressivement par les politiques technologique et énergétique a favorisé concomitamment l'établissement d'une base de connaissances technologiques et scientifiques sur l'éolien, et la formation d'un marché. En outre, selon nous, le « modèle danois » de l'éolien ne doit pas être appréhendé à travers un système technologique, mais plutôt à travers deux sous-systèmes technologiques : un concernant les grandes éoliennes, l'autre les éoliennes de petite puissance.

3.2. Le Programme éolien danois : deux sous-systèmes technologiques

Le Programme éolien danois a débuté en 1976 dans le cadre du Programme national de recherche sur les énergies, lui-même défini dans le premier plan de politique énergétique du Danemark (NIELSEN [2002], MEYER [2004]). Ce plan, issu du débat commun aux nations industrialisées à l'époque, avait pour objectif de réduire la dépendance énergétique du pays[401] en privilégiant l'exploitation des ressources nationales, fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) et renouvelables (éolien, solaire), et en développant le nucléaire. L'accent était mis sur la cogénération de chaleur et d'électricité à partir du gaz naturel, sur les mesures de planification et d'économies d'énergie et sur le soutien à la R&D. L'engagement dans un programme nucléaire, repoussé à plusieurs reprises après de nombreux débats, et bien que réaffirmé dans le second plan énergétique de 1981, sera finalement définitivement annulé en 1985 faute

[401] L'approvisionnement énergétique du Danemark dépendait à la fin des années 1970 pour 90% des importations de produits pétroliers.

d'un consensus national[402]. Le plan énergétique de 1976, bien que soulignant en même temps les incertitudes technologiques, fixait un objectif de 3% de pénétration des ER dans l'approvisionnement électrique du pays en 1995. Le programme éolien danois était axé autour de deux voies de recherches qui vont donner lieu au développement de deux sous-systèmes technologiques, l'un concernant les grandes éoliennes, l'autre les éoliennes de petite puissance (VAN EST [1999], ANDERSEN et LEMMING [1999], NEIJ *et al.* [2003]).

3.2.1. Le sous-système technologique des grandes éoliennes (1976-1986)

Le premier volet du programme éolien danois a cherché à initier le développement d'éoliennes de grande puissance dans le but de confier ensuite leur construction à des firmes du secteur industriel et leur exploitation aux compagnies électriques. Les partenaires impliqués étaient le département de R&D de l'Association des *utilities* danoise, les départements « ingénierie » des principales *utilities*, le laboratoire de mécanique des fluides de l'université technique du Danemark, la section « météorologie » du laboratoire de recherche national Risoe ainsi que les grandes firmes du secteur mécanique du pays (VAN EST [1999], NIELSEN [2002]). Grâce aux financements publics ces acteurs devaient dans un premier temps créer des nouvelles connaissances scientifiques et techniques sur les grandes éoliennes. Trois pistes de recherche ont été privilégiées : le développement technologique des éoliennes, l'étude des sites pour leur implantation et l'intégration de l'électricité produite aux réseaux électriques.

3.2.1.1. Le développement des grandes éoliennes

Les ingénieurs danois, n'ayant pas de base de connaissance, comme celle de l'aéronautique, sur laquelle s'appuyer, ont décidé de restaurer et de remettre en service une ancienne éolienne construite en 1956 par l'ingénieur JUUL sur la côte de Gedser

[402] Les deux premiers plans énergétiques danois de 1976 et 1981 proposant l'introduction du nucléaire ont été chacun immédiatement suivis de plans alternatifs remplaçant le nucléaire par une hausse de la contribution des ER, en particulier de l'éolien, et des mesures d'efficacité énergétique (VAN EST [1999], MEYER [2004]).

dans le Sud du Danemark (VAN EST [1999], KROHN [2002a]). Cette éolienne, d'une puissance de 200 kW, la plus élevée au monde pendant longtemps, avait été exploitée par la compagnie électrique SEAS. Dotée d'un rotor à trois pales face au vent, d'un système d'orientation électromécanique et d'une génératrice asynchrone, elle avait introduit une nouvelle conception des éoliennes modernes[403]. La comparaison des résultats des tests effectués sur l'éolienne de Gedser et de ceux réalisés sur d'autres autres éoliennes de conception différente (à axe vertical et à axe horizontal à un ou deux pales), a permis aux chercheurs du laboratoire Risoe de conclure que le *design* du rotor de la première était le plus fiable sur une longue durée de fonctionnement. Ce modèle technologique, très proche des éoliennes actuelles, a été très rapidement retenu et il n'y a pas eu de réelle phase d'apprentissage par la variété.

En 1977, sur la base des données recueillies sur l'éolienne de Gedser et grâce aux avancées scientifiques en aérodynamique, l'ensemble des acteurs ont mis au point et construit deux grandes éoliennes expérimentales, dites les éoliennes de Nibe, du nom de leur lieu d'installation. Les deux éoliennes, d'une puissance unitaire de 630 kW, étaient équipées d'un rotor à trois pales, mais différaient dans leur système de régulation de puissance : la première, Nibe A, était contrôlée par un système de décrochage aérodynamique similaire à celui de l'éolienne de Gedser (dit *« stall control »*), la deuxième, Nibe B, par un système de calage variable des pales (dit *« pitch control »*) (voir l'ANNEXE 14) (VAN EST [1999], KAMP *et al.* [2004]). Tout comme les autres grandes éoliennes développées à la même époque à l'étranger, les éoliennes de Nibe se sont avérées très chères et ont connu des problèmes techniques, même si celle régulée par un calage variable des pales a mieux fonctionné.

En 1981, afin de donner une nouvelle impulsion aux recherches sur les grandes éoliennes, le ministère de l'énergie a engagé une participation publique pour créer avec la compagnie électrique SEAS la société Danish Wind Technology (DWT) (VAN EST [1999], KAMP *et al.* [2004]). En même temps, toujours dans le cadre du programme éolien, le gouvernement Social Démocrate de l'époque, évaluant les retombées économiques et industrielles que pourrait apporter le développement d'une industrie éolienne, a demandé aux *utilities* de concevoir huit éoliennes. Ainsi, la compagnie

[403] L'éolienne de Gedser était contrôlée par un système de décrochage aérodynamique et équipée de freins aérodynamiques d'urgence situés à l'extrémité des pales et actionnés par la force centrifuge en cas de vitesse excessive. Ce système a inspiré celui utilisé aujourd'hui sur les éoliennes modernes à pas fixe (dit *« stall control »*) (Voir ANNEXE 13).

électrique Elkraft s'est chargée d'étudier la conception de cinq éoliennes de 750 kW, technologiquement très proches de l'éolienne Nibe B ; Elsam, l'*utility* de la région du Juntland, a conçu, également à partir de l'éolienne Nibe B, un modèle beaucoup plus puissant de 2 MW avec un rotor de 60 mètres de diamètre ; la société DWT a, d'une part, fabriqué les cinq éoliennes conçues par Elkraft, en renforçant les pales grâce à la fibre de verre et d'autre part, elle a conçu et fabriqué deux éoliennes de 265 et 300 kW de puissance. Aucun industriel n'ayant voulu s'engager seul pour construire l'éolienne de 2 MW, celle-ci a été réalisée sur la base d'un contrat engageant plusieurs firmes (VAN EST [1999]). Encore une fois, le fonctionnement de ces éoliennes a été perturbé par des problèmes techniques, concernant notamment les pales et le multiplicateur de la turbine.

Ainsi, l'orientation des recherches sur les grandes éoliennes s'est rapidement focalisée sur un concept déjà existant qui a pu être amélioré grâce à un apport de ressources du programme de R&D. De nouvelles connaissances, essentiellement codifiées, ont été créées par un apprentissage par l'usage et par des apprentissages par interaction, les *utilities* exploitant ces éoliennes faisant «remonter » les informations concernant le fonctionnement aux ingénieurs des centres de recherche publics.

3.2.1.2. Les études d'implantation des grandes éoliennes

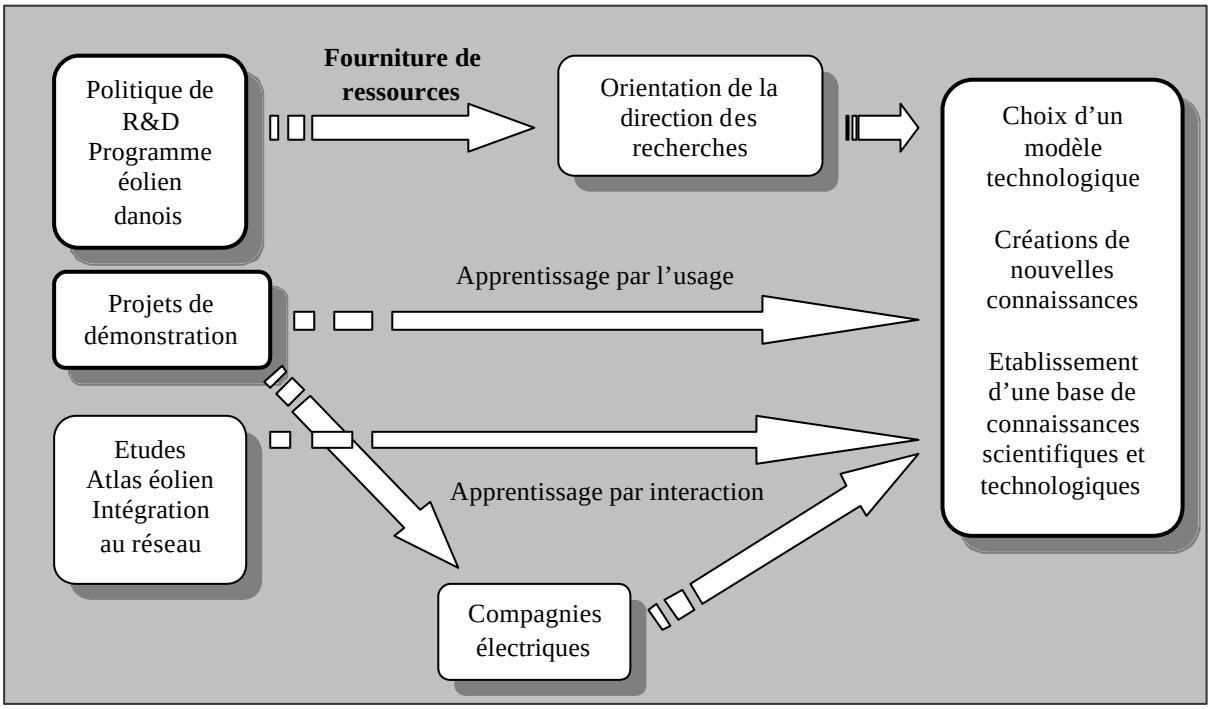
Les recherches sur les grandes éoliennes conduites dans le cadre du PREN ont également consisté à prospecter les meilleurs sites pour installer les turbines. En 1981, un groupe d'ingénieurs du laboratoire Risoe a réalisé un atlas éolien pour déterminer avec une faible marge d'erreur l'électricité produite par une éolienne de puissance donnée à un endroit donné du territoire national en fonction du régime des vents (ANDERSEN et LEMMING [1999]). De 1981 à 1986, à partir de l'atlas éolien, 400 sites précis ont été ensuite choisis en fonction de la ressource éolienne et de l'insertion environnementale qu'ils autorisaient. Ces études ont montré que l'installation d'éoliennes d'une puissance unitaire de 2,5 MW sur les sites les plus ventés pourrait permettre de produire jusqu'à 3 TWh d'électricité par an, soit 10% de la consommation nationale d'électricité de l'époque (MEYER [2004]). Toutefois, au moment de la réalisation, la technologie définie n'était pas disponible et ne faisait l'objet que

d'hypothèses. Ces connaissances n'ont donc pas eu une applicabilité immédiate, mais elles seront reprises avec profit en 1991 par le Comité d'implantation des éoliennes[404].

3.2.1.3. Les études sur l'intégration de l'électricité d'origine éolienne dans le réseau électrique

Le troisième et dernier domaine de recherche du programme sur les grandes éoliennes a consisté à étudier les problèmes qui pouvaient résulter de la connexion d'éoliennes de grande puissance au réseau électrique existant. En 1983, une étude du ministère de l'énergie danois a montré que pendant certaines périodes, comme les nuits d'hiver où la demande de chaleur est importante et celle d'électricité plus faible, l'ajout de la production des éoliennes à celle des centrales de co-génération pouvait entraîner un excès de charge sur le réseau (NIELSEN [2002]). Les *utilities* n'étaient donc pas prêtes à rémunérer au juste prix l'électricité excédentaire issue des éoliennes. Le renforcement et l'accroissement de la capacité du réseau électrique étaient donc les préalables indispensables à une large pénétration de l'éolien.

Figure 22. Le sous-système technologique danois des grandes éoliennes (1976-1986)



[404] Voir *supra*.

Nous avons considéré ce premier volet du Programme éolien sur le développement de grandes turbines comme un premier sous-système du système technologique éolien danois. Durant la période 1976-1986, on peut considérer que la politique *« technology push »* menée a échoué dans la réalisation des objectifs qui avaient été fixés, dans le sens où les projets de démonstration sur les grandes éoliennes n'ont pas amorcé le début d'une phase industrielle et commerciale. En dehors de réalisations ponctuelles, l'incertitude et le manque de maîtrise technologique des firmes ne leur ont pas permis de s'impliquer durablement en s'engageant de manière autonome dans la construction de grandes éoliennes. En outre, ces projets ayant été gérés par les ingénieurs des laboratoires publics, la diffusion et l'applicabilité industrielle des connaissances codifiées qu'ils maîtrisaient n'ont pas été favorisées. Au niveau des installations de démonstration, les seuls apprentissages par interaction développés l'ont été entre les ingénieurs des laboratoires publics et ceux des *utilities* chargées de l'exploitation. Malgré cet insuccès, cette première partie du Programme éolien a par contre établi un socle de connaissances scientifiques et techniques qui révélera son importance dans la phase de croissance du marché éolien à partir du milieu des années 1990 : un *design* technologique a été «pré-sélectionné », de nombreuses données sur le potentiel éolien du pays ont été formalisées et les conséquences techniques de l'intégration au réseau d'une importante production électrique d'origine éolienne ont été étudiées.

3.2.2. Le sous-système technologique des petites éoliennes (1978-1986)

Le deuxième sous-système du secteur éolien au Danemark a résulté de la mise en œuvre du volet du Programme éolien national portant sur le développement des petites turbines.

3.2.2.1. Le rôle déterminant de la station de test du Laboratoire Risoe

A partir de 1978 ce volet a prévu la création et le financement, d'abord pour trois ans, d'une station de test pour les petites éoliennes au sein du Laboratoire national Risoe (ANDERSEN et LEMMING [1999], VAN EST [1999]). La fonction première de la station était d'évaluer les quelques modèles de petites éoliennes mis au point à l'époque

et de conseiller (gratuitement) les concepteurs qui le souhaitaient dans l'amélioration de leur efficience et de leur fiabilité. Dès les premiers mois de test, les petites turbines à axe vertical avec trois pales s'inspirant du *design* de l'éolienne de Gedser se sont démarquées par leur simplicité de fonctionnement et leur fiabilité. Manquant de connaissances pratiques sur le fonctionnement *in situ* des éoliennes qu'ils étaient chargés de tester, les ingénieurs de la station ont décidé de former un « groupe de contact » avec l'ensemble de leurs interlocuteurs (fabricants et propriétaires d'éoliennes, Agence de l'énergie danoise, associations du secteur énergétique) pour faciliter les échanges et les évaluations mutuelles des activités de chacun (VAN EST [1999]). La mission de la station de test ayant été d'abord prévue à durée déterminée, celle-ci se devait d'obtenir rapidement des résultats, en termes d'améliorations techniques des modèles d'éoliennes fabriqués, pour pérenniser son fonctionnement.

En 1979, l'Agence danoise de l'énergie a chargé la station de délivrer aux fabricants les autorisations de commercialiser leurs éoliennes afin que leurs installateurs puissent percevoir les subventions prévues par le Programme éolien (NIELSEN [2002]). Aucun standard ni code technique n'ayant été définis, les tests étaient jusqu'alors réalisés au cas par cas par l'application des règles théoriques fondamentales de mécanique et d'aérodynamique. Une fois de plus, dans le but de mieux orienter leurs recherches, les ingénieurs de la station ont vu dans cette procédure de test obligatoire pour obtenir des subventions un moyen accru de collecter des informations sur les difficultés techniques que pouvaient rencontrer les fabricants. Ainsi, certaines règles, notamment sur la sécurité et le *design* des éoliennes, ont été définies directement après les premiers tests obligatoires. Le souci des chercheurs de la station était de mettre en application leurs connaissances scientifiques formelles en répondant aux attentes « pratiques » des fabricants et des exploitants d'éoliennes. Dans ce cadre, chacun des acteurs ayant à apprendre des autres, un schéma d'apprentissages interactifs s'est rapidement développé avec de nombreux échanges d'informations.

A partir de 1981, les activités de la station de test ont été maintenues. Deux unités ont été créées, une étant chargée d'effectuer des recherches, l'autre de délivrer les certificats de conformité (ANDERSEN et LEMMING [1999]). Depuis, la station est financée en partie par des subventions octroyées par le Programme de recherche énergies nationales et par l'Agence de l'énergie danoise, par les contributions des fabricants qui viennent faire certifier leurs éoliennes et enfin par le produit des travaux de consultance effectués à titre commercial. Bien que formellement séparées, les deux

unités se trouvent sur le même site géographique et même si une nouvelle station de test pour les éoliennes *offshore* a été créée il y a peu de temps sur la côte Est du Jutland, les trois unités travaillent dans une grande synergie, chacune bénéficiant directement des *spillovers* engendrés par les travaux des autres. Le Risoe est aujourd'hui un des centres de recherche et d'expertise sur l'éolien les plus reconnus dans le monde.

3.2.2.2. Les fabricants de petites éoliennes et l'évolution du marché

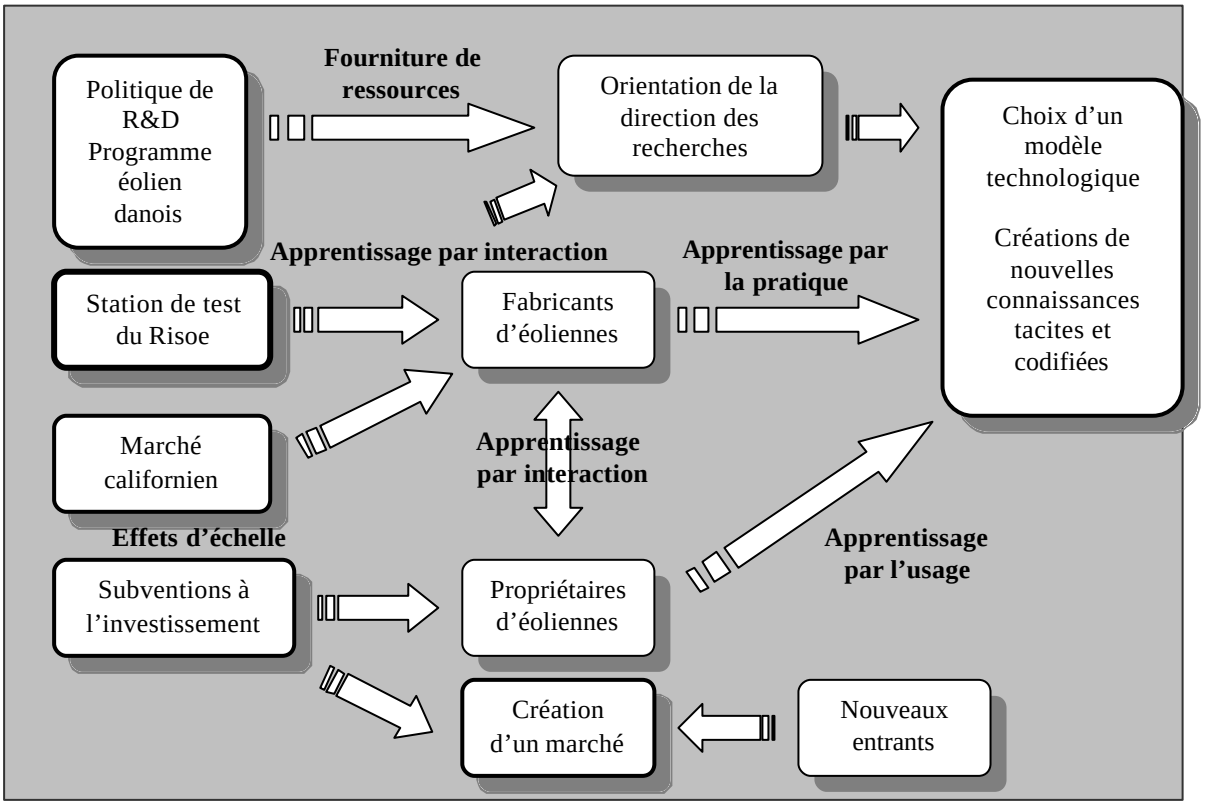
Au début des années 1980, environ une douzaine de fabricants de petites éoliennes étaient actifs sur le marché danois (NIELSEN [2002]). La plupart d'entre eux était issue du secteur du machinisme agricole. Ne possédant pas de compétences spécialisées en ingénierie aérodynamique, les fabricants, s'appuyant sur le modèle de l'éolienne de Gedser, ont cherché d'abord par un processus expérimental « d'essais-erreurs » à concevoir des turbines les plus sûres et les plus robustes possibles. Les échanges d'expériences entre les ingénieurs, les fabricants et les utilisateurs se sont largement développés notamment par le biais des *« wind meetings »* organisés régulièrement (KAMP *et al.* [2004]). En outre, depuis 1979 l'Association danoise des propriétaires d'éoliennes publiait dans son magazine *Naturlig Energi* la liste de toutes les éoliennes commercialisées assortie d'informations très complètes et de commentaires sur les performances techniques de chacune (ANDERSEN et LEMMING [1999]). Ainsi chaque acheteur potentiel d'une éolienne détenait une information quasi-complète sur les modèles disponibles. Cette transparence du marché a accru la concurrence entre les fabricants et a contribué à créer un environnement de sélection particulièrement sévère. En conséquence, de nombreuses améliorations incrémentales, notamment sur la solidité des composants, issues des expériences accumulées ont autorisé un accroissement progressif de la puissance des turbines de 30 à 55 kW en moyenne. A partir de 1979, une subvention d'investissement s'élevant à 30% du prix a été accordée aux acheteurs privés d'éoliennes, ce qui a contribué à développer rapidement un marché, les installateurs étant en grande majorité des particuliers. Entre 1980 et 1983, 600 éoliennes ont été vendues ; les quatre principaux fabricants Micon, Bonus, Nordtank et Vestas détenaient réunis une part de marché de 70% (VAN EST [1999]).

A la même période, suite à l'adoption de la loi PURPA[405] de 1978 aux Etats-Unis, qui a créé un nouveau statut pour les producteurs indépendants d'électricité, et grâce à l'instauration d'exonérations fiscales aux niveau fédéral et des Etats, un grand marché de l'éolien s'est ouvert (GIPE [1995], WISER *et al.* [1998], VAN EST [1999]). Compte tenu du manque de fiabilité des turbines fabriquées aux Etats-Unis, les firmes danoises, fortes de l'expérience qu'elles venaient d'acquérir au cours des dernières années sur leur territoire national, ont été les seules capables de répondre à cette demande. Ainsi, en 1984 1 600 éoliennes danoises ont été vendues en Californie. Voyant dans le *« California boom »* d'importantes opportunités de profits plusieurs firmes danoises sont entrées dans l'industrie éolienne (Wincon, Danwin, Vindsyssel, Dencon) (VAN EST [1999]). Le marché californien est rapidement devenu le lieu d'une concurrence intense entre les fabricants danois. La demande se portant vers des turbines de plus en plus puissantes, les nouvelles firmes entrantes ont cherché, à partir du « modèle danois » désormais éprouvé, à faire un « bond technologique » par rapport aux firmes installées. Cependant, les conditions de marché ont vite évolué. Dans un premier temps, l'augmentation de la puissance des éoliennes s'est traduite par des économies d'échelle dans la production d'électricité, sachant que les coûts d'installations et de maintenance étaient relativement indépendants de la taille des turbines. Dans un second temps, la crainte d'un arrêt des exonérations fiscales, a encouragé la demande pour des éoliennes plus efficientes. Ainsi, la compétition technologique s'est accrue entre les fabricants débouchant très rapidement sur quelques modèles de turbines plus grands et plus efficients. Cependant, pour essayer de suivre la tendance du marché, de nombreux fabricants, faute de compétences et de temps de mise au point, ont fabriqué en série et vendus des modèles dont les performances et la fiabilité n'étaient plus du tout assurées. Dans ce schéma concurrentiel intense de nombreuses firmes ont été conduites à proposer des modèles de turbines qui étaient soit obsolètes, ou qui se retrouvaient hors

[405] L'adoption en 1978 du *National Energy Act* (NEA), et en particulier du *Public Utility Regulatory Policy Act* (PURPA) a créé un statut nouveau de producteurs indépendants d'électricité : les *Qualifying Facilities* (QF) qui doivent produire de l'électricité par la cogénération ou les énergies renouvelables. Les *utilities* sont obligées d'acheter l'électricité produite par les *QF* à un prix garanti équivalent au coût évité, sous le contrôle des régies de service public (*Public Utilities Commissions* ou PUC) des États. A partir de 1983 la PUC de Californie a établi un *Standard Offer n°4* avec un contrat fixe standard de rachat de l'électricité sur 10 ans (0,08 $/ kWh) avec ajustement à la hausse. En plus un *State Tax Credit* de 15% venait s'ajoutait au *Federal Tax Credit* de 25% (GIPE [1995], WISER *et al.*[1998]).

d'état de fonctionnement après quelques milliers d'heures. En outre, l'éloignement des lieux de fabrication et d'exploitation des éoliennes, et le manque de connaissances des conditions de fonctionnement des éoliennes en Californie n'ont pas facilité les opérations de maintenance et de remplacement de certains composants en cas de pannes. A partir de 1985, les problèmes de gestion et les difficultés financières ont conduit à la faillite de la moitié des firmes danoises. En Californie la fin des contrats de rachat de l'électricité produite à partir des sources décentralisées en 1986 et la baisse du prix du pétrole ont marqué un arrêt quasi net des installations d'éoliennes. L'expérience californienne a donc été à la fois un succès et un échec pour les fabricants danois : un succès tant que les conditions de marché ont permis de fabriquer en série des modèles fiables dont la puissance pouvait être augmentée progressivement ; un échec quant à l'incapacité de la plupart des firmes de réaliser un saut technologique tout en garantissant un maintien de la fiabilité. Le manque de maîtrise des marchés à l'exportation a constitué également un handicap supplémentaire.

Figure 23. Le sous-système technologique danois des petites éoliennes (1978-1986)



Contrairement au premier sous-système, cette deuxième partie du système technologique éolien danois sur les petites turbines a réussi dans sa fonction de création

d'un marché. Plusieurs acteurs, ou groupes d'acteurs, clés ont participé directement ou indirectement à la création de nouvelles connaissances codifiées et tacites. Bénéficiant des ressources du programme national éolien, la station de test du laboratoire Risoe, de part sa position incontournable dans le système et ses capacités d'émission et d'absorption de connaissances, a permis d'initier de nombreux apprentissages par interaction avec les fabricants et les propriétaires de turbines. Un réseau très dense, avec un degré élevé de connectivité entre les acteurs s'est ainsi progressivement constitué. Il a été le générateur et le vecteur de très nombreuses externalités positives. Mises en œuvre avec un bon *timing*, les mesures incitatives des politiques publiques ont eu un effet d'accélérateur sur la dynamique des processus en cours. Au Danemark, les subventions à l'investissement, *via* une certification obligatoire des matériels, ont permis de constituer rapidement un marché, d'attirer de nouveaux entrants et d'activer le rythme des apprentissages par interaction. Enfin, l'ouverture des exportations vers la Californie a produit plusieurs effets. Elle a d'abord conduit à accentuer et déplacer la concurrence entre les fabricants danois sur un marché étranger. L'effet de masse créé a donné lieu ensuite à un apprentissage par la pratique. Mais l'expérience californienne a aussi révélé les limites d'une industrie relativement jeune, le manque de compétences technologiques de la majorité des firmes a été un critère fort de leur sélection.

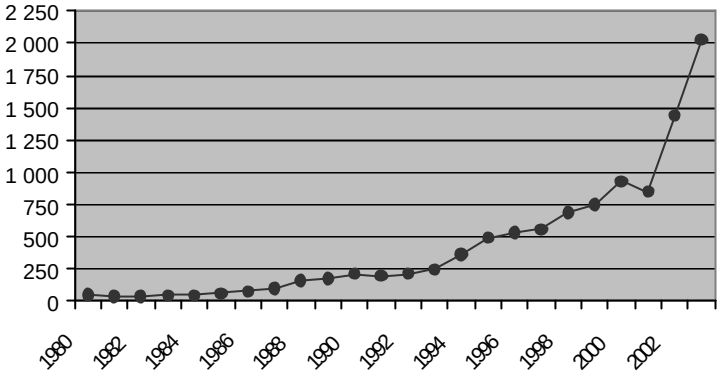
3.2.3. La réunion des deux sous-systèmes technologiques

Engagés en 1976, les deux volets, grandes et petites éoliennes, du Programme éolien danois ont été réunis en 1986. En effet, la particularité du système technologique éolien danois tient à ce que ses deux sous-systèmes, malgré leurs réussites différentes, après avoir évolué de façon parallèle pendant une quinzaine d'années, se sont réunis presque « naturellement », avant de l'être formellement.

L'observation de l'évolution de la taille moyenne des éoliennes installées chaque année au Danemark depuis 1980 donne une première indication (voir la Figure 25). Elle montre une évolution graduelle, par paliers, jusqu'à 500 kW en 1995. Depuis la croissance a été plus continue jusqu'en 2000 où la taille moyenne était proche du mégawatt. La baisse de l'année 2001 s'explique par les incertitudes qui ont prévalu sur la transition du système de tarifs d'achat garantis vers un mécanisme de certificats verts

et la forte augmentation de la puissance en 2002 et 2003 est due à l'installation de plusieurs parcs offshore avec des éoliennes de grande puissance (2,5-3 MW)[406].

Figure 24. Evolution de la puissance moyenne des éoliennes installées au Danemark (kW)
Sources : ANDERSEN et LEMMING [1999], Systèmes Solaires [2000b, 2001b, 2002b, 2003b, 2004b]



Les deux principaux bénéficiaires des subventions de recherche allouées par le Programme éolien danois, le Département de mécanique de fluides de l'Université technique du Danemark et la station de test du laboratoire national Risoe, ont poursuivi leurs recherches respectives sur les grandes éoliennes exploitées par les *utilities* et sur les modèles moins puissants. Mais, compte tenu de l'augmentation de la puissance moyenne des turbines fabriquées par les firmes danoises, les préoccupations liées aux deux voies de recherches sont devenues de plus en plus proches et complémentaires : le Département de mécanique des fluides a développé un environnement de recherche solide concernant les problèmes théoriques d'aérodynamique, ainsi que les problèmes opérationnels liés à l'intégration des grandes éoliennes aux réseaux électriques (KROHN [2002a, 2002b]). Le laboratoire Risoe coopère avec l'Université technique dans le domaine aérodynamique et a développé un réseau international qui travaille sur la standardisation des éoliennes[407] (VAN EST [1999], NIELSEN [2002]). En 2002, un consortium a été signé entre les deux acteurs afin de renforcer formellement leur

[406] Voir l'ANNEXE 14 sur l'évolution des puissances maximales des éoliennes.

[407] De part l'importance et les fréquences des relations qu'ils entretiennent avec le laboratoire Risoe, les fabricants danois se tiennent ainsi informés des avancées de la R&D dans leur domaine au niveau international.

coopération et d'assurer la formation des ingénieurs et techniciens de l'industrie éolienne (DEA [2003]).

3.3. Les instruments économiques et réglementaires de soutien à l'éolien

Le système technologique éolien danois a été soutenu par trois principaux types d'instruments de soutien économiques et réglementaires : les subventions à l'investissement, les accords négociés entre le gouvernement et les *utilities* et le système des tarifs d'achat garantis.

3.3.1. Les subventions à l'investissement

Comme nous l'avons déjà évoqué, en 1979 le gouvernement danois a adopté une mesure instaurant des subventions d'investissement pour les installations utilisant les ER. Le schéma défini pour cette mesure typiquement *« market pull »* faisait jouer un rôle central à la station de test du laboratoire Risoe dans la certification des éoliennes, et donc permettait un développement combiné des activités de recherche et de développement industriel. Ces subventions devaient permettre d'accélérer la standardisation des équipements d'ER favorisant une diffusion de masse.

Tableau 5. Subventions à l'investissement pour l'éolien accordées de 1979 à 1989
Source : ANDERSEN et LEMMING [1999]

	Mai 1979	Janvier 1981	Janvier 1982	Janvier 1985	Juin 1985	Janvier 1986	Janvier 1989	Août 1989
Subvention	30%	20%	30%	25%	20%	15%	10%	0%

Le système d'obtention des subventions a été voulu aussi transparent que possible par les autorités. Chaque année le budget des subventions attribuables pour chaque type d'ER était défini par l'Agence danoise de l'énergie au niveau national et un système de « file d'attente » était mis en place. Le système et l'instruction des dossiers étaient gérés par les municipalités, compétentes pour instruire et délivrer les permis de construire des éoliennes à des coopératives locales, des particuliers ou des *utilities*. Ainsi chaque déposant d'un dossier de demande de subvention était informé, en fonction du montant de subvention restant à attribuer pour l'année en cours, de sa position dans la file et de la durée à attendre avant de percevoir le montant financier. Par

sa gestion décentralisée, ce mode d'attribution a été efficace, mais son succés a eu l'inconvénient d'engendrer pour les fabricants un effet de *« stop and go »* dans la planification de leur production, les montants de subventions étant très rapidement épuisés en début d'année (ANDERSEN et LEMMING [1999]).

Figure 25. Evolution des subventions à l'investissement et à la production et évolution du nombre d'éoliennes produites par les fabricants danois et installées au Danemark
Source : NEIJ et al.*[2003]*

A partir de 1985, deux critères, dits « de résidence » et « de consommation », ont été ajoutés aux conditions d'obtention des subventions (TRANAES [2003]). Ces critères avaient pour but de développer un modèle participatif en soutenant l'engagement des habitants, directement ou *via* des coopératives, dans l'appropriation collective des installations éoliennes, évitant ainsi l'apparition du «syndrome » NIMBY (*« not in my backyard »)* (ADEME [2002]). Le critère de résidence a instauré une distance maximale autorisée de 10 kilomètres entre le lieu d'installation de l'éolienne et celui de résidence de son propriétaire-exploitant, ceci afin d'éviter les comportements de *« free ridding »*. En effet les personnes habitant en milieu urbain, bénéficiant comme les autres d'un surplus de bien-être du fait des externalités positives[408] engendrées par la production d'électricité verte auraient pu investir et percevoir les subventions attribuées à l'éolien, sans subir d'externalités négatives comme les atteintes aux paysages (voir ANNEXE 8 sur externalités). Le critère de consommation devait permettre d'éviter les effets d'aubaine. De manière à éviter les comportements spéculatifs, et sous la pression des *utilities* qui craignaient que des particuliers investissent dans des grandes éoliennes, un

[408] Représentées par les émissions polluantes évitées et l'amélioration de l'environnement.

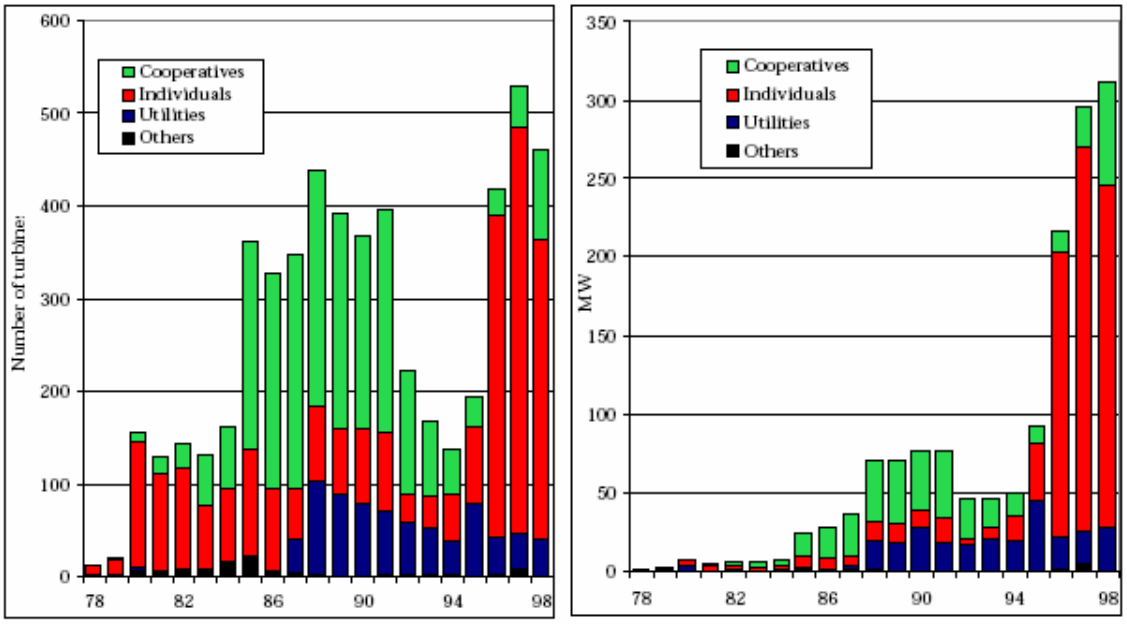
particulier membre d'une coopérative locale par exemple ne pouvait détenir sur des installations une part de production supérieure à sa consommation électrique + 35%, avec un minimum fixé à 6000 kWh (TRANAES [2003]). En outre la puissance des éoliennes détenues par des particuliers individuels ne devait pas dépasser 150 kW et devait être raccordée à son installation électrique privée ou professionnelle. Avec l'accroissement du nombre d'installations le critère de consommation a par la suite été élargi plusieurs fois. Depuis 1996, la référence à la consommation a été supprimée et les particuliers peuvent détenir des parts pour une production maximale de 30 MWh sur des installations situées sur des cantons connexes à celui de leur résidence, ou dans lesquels ils ont des intérêts personnels ou professionnels.

Le taux de la subvention à l'investissement accordée a été progressivement diminué jusqu'au début de l'année 1989, le système ayant été supprimé quelques mois plus tard. Le programme de subvention (pour un total de 38 millions d'euros) a connu un grand succès en permettant l'installation de 300 MW de puissance éolienne (voir la Figure 25). Jusqu'au milieu des années 1990, les particuliers ont fortement contribué à la croissance du marché à travers leurs investissements dans des parts de coopératives éoliennes (voir la Figure 26). Le nouveau régime de tarifs d'achat garantis mis ensuite en place et une baisse des taux d'intérêts ont permis aux particuliers (surtout des exploitants agricoles) d'investir directement dans l'achat d'éoliennes. Les installations types ont pris la forme de *clusters* de 3 à 7 éoliennes. Actuellement au Danemark, plus de 150 000 particuliers détiennent ou indirectement des parts dans l'olien (MEYER [2004]). Ces incitations à l'investissement ont donc permis de créer en quelques années un véritable marché de l'éolien, marqué par des rendements croissants d'adoption, en développant un modèle participatif très spécifique s'appuyant sur des réseaux de groupes d'acteurs[409] structurés échangeant de nombreuses informations entre eux.

[409] L'Association de l'industrie éolienne danoise, l'Association des propriétaires d'éoliennes, l'Agence danoise de l'énergie et la station de test du laboratoire Risoe.

Figure 26. Evolution des installations annuelles par nombre d'éoliennes (gauche) et par puissance (droite) en fonction du type de propriétaires

Source : Danish Energy Agency, www.ens.dk



3.3.2. Les accords entre le gouvernement danois et les *utilities*

Les critères « de résidence » et « de consommation » introduits dans les conditions d'obtention des subventions d'investissement ont fait partie d'un accord signé en 1985 avec le gouvernement par lequel les compagnies électriques s'engageaient à installer 100 MW de puissance éolienne avant 1990 (ANDERSEN et LEMMING [1999]). Craignant la spéculation des investisseurs privés, ce premier accord permettait au gouvernement danois d'ouvrir deux voies de développement pour l'éolien : une première constituée d'éoliennes uniques ou de *clusters* installés et gérés par des particuliers et des coopératives locales, et une deuxième pour des installations plus importantes opérées par des *utilities*. Cependant, ces dernières, arguant que le gouvernement ne leur proposait pas de sites favorables, les *utilities* ont tardé à satisfaire leur engagement, leur manque d'implication dans les phases de développement et d'installation des grandes éoliennes auprès des constructeurs ayant été dénoncé par les associations professionnelles et des petits propriétaires. En 1990, un deuxième accord pour installer 100 MW avant 1996 est intervenu avant que le premier ne soit complètement réalisé (il le sera en 1993). Un troisième accord de 200 MW à réaliser pour l'année 2000 a suivi. Il a donné lieu au développement des deux premiers projets de démonstration de parcs *offshore* de 5 MW chacun (Vindeby en 1991, Tuno Knob en 1995) (NEIJ *et al.* [2003]).

En 1997, l'association des *utilities* danoises a proposé au ministère de l'environnement et de l'énergie un plan d'action visant à installer 750 MW d'éolien *offshore* d'ici 2008. Ce plan s'est appuyé sur une étude prospective qui, anticipant la puissance des éoliennes disponibles,[410] évaluait le « productible » *offshore* du Danemark, à partir des meilleurs sites, à 20 TWh (4 000 MW installés) soit 65% de la consommation annuelle d'électricité du pays en 2030 (IEA [1999b], DEA [2001]).

[410] Les sites recensés en mer du Nord et dans les eaux intérieures danoises pouvaient permettre des durées de fonctionnement annuelles comprises entre 3 000 et 4 500 heures pleines.

Tableau 6. Parcs éoliens *offshore* installés au Danemark
Source : DWIA [2001, 2002, 2003, 2004]

Année	Nom/Localisation	Caractéristiques
1991	Vindeby Lolland	Projet pilote 5 MW (11 x 450 kW)
1995	Tuno Knob Arhus Bay	Projet pilote 5 MW (10 x 500 kW)
2001	Middelgrunden Copenhague	Projet pilote 40 MW (20 x 2 MW)
2002	Horns Rev Esbjer	Projet de démonstration 160 MW (80 x 2 MW)
2003	Rodsand Nysted	Projet de démonstration 165,5 MW (72 x 2,3 MW)
2003	Paludans Flak Samso	Projet de démonstration 165,5 MW (72 x 2,3 MW)
2003	Ronland Limfjorden	Projet côtier 17,2 (4 x 2,3 MW + 4 x 2 MW)
2003	Frederikshavn	Projet côtier 10,6 (2 x 3 MW + 2 x 2,3 MW)
2003	Grenaa Harbour	Projet côtier 8,25 (3 x 2,75)

Depuis 1999, avec l'entrée en vigueur de l'*Electricty Reform Agreement* réformant le secteur électrique pour l'ouvrir à la concurrence conformément à la Directive européenne 1996/92/CE (CE [1996]), l'installation des parcs éoliens *offshore* est soumise, dans le cadre d'un programme de démonstration, à un permis et une licence d'exploitation délivrée par l'Autorité danoise de l'énergie. Mis en œuvre par les compagnies électriques, plusieurs projets ont été réalisés *via* des appels d'offres depuis 1991 dont ceux de Rodsand et Paludans, les plus importants, totalisant chacun une puissance de 165,5 MW. Ainsi le Danemark, avec plus de 577 MW éoliens installés fin 2003 occupe la première place dans l'*offshore* (DWIA [2001, 2002, 2003, 2004]). L'implication des *utilities* dans ce domaine a été soutenue par les conditions tarifaires favorables pour le rachat de l'électricité produite.

3.3.3. L'efficacité des tarifs d'achat garantis

Les conditions de raccordement au réseau électrique et le niveau plus ou moins élevé des tarifs d'achat de l'électricité produite par les éoliennes conditionnent le développement de l'ensemble de la filière. Au Danemark, sous l'autorité de l'Agence de l'énergie, le premier accord national entre l'Association des *utilities* et l'Association des propriétaires d'éoliennes fixant les modalités de l'achat de l'électricité produite par les éoliennes est intervenu en 1979, le prix perçu par les exploitants était fixé sur une base du coût de production évité par les *utilities* plus 50%. En 1984, un deuxième accord a favorisé les coopératives locales en leur accordant un prix correspondant à 85% du prix payé par les consommateurs résidentiels, contre 70% pour les particuliers. L'harmonisation des tarifs a été réalisée en 1992 sous le gouvernement Social-

Démocrate de 1992 qui a établi un prix de rachat de base unique pour tous les exploitants d'éoliennes, fixé à 85% des coûts de production et de distribution supportés par les *utilities* (MEYER [2004]). Les particuliers résidant à proximité des installations percevaient en sus une prime de 3,7 c€/kWh. En outre depuis 1994, compte tenu de l'ancienneté de nombreuses éoliennes de faible puissance, l'Agence danoise de l'énergie a lancé un programme de *« repowering »* incitant à remplacer ces turbines par d'autres plus récentes. Les subventions accordées dans le dernier volet de ce programme ont ainsi permis de remplacer, entre 2002 et 2003, 1 200 éoliennes anciennes par 300 de technologie moderne (IEA [2003d, 2004b]).

Dans le but d'améliorer l'adéquation du système de soutien aux ER avec le nouveau cadre concurrentiel, le parlement danois a ensuite décidé de remplacer en 1999 le système de tarif d'achat fixe par un système de certificats verts jugé plus flexible. Ce système permet de passer d'un pilotage par les prix à un pilotage par les quantités en imposant des quotas de production d'électricité renouvelable soit aux fournisseurs, soit aux producteurs d'électricité conventionnelle, soit aux consommateurs[411] (MORTHOST [2000], MENANTEAU *et al.* [2003a], PERCEBOIS [2004]). Théoriquement, il permet d'améliorer l'efficacité économique incitant à utiliser les technologies les plus performantes sur le plan économique. Toutefois, pour être efficient le cadre d'échange défini pour les certificats doit être transparent. La mise en place du système de certificats verts au Danemark, initialement prévue au 1er janvier 2003, a rencontré la réticence des associations de producteurs éoliens. Les incertitudes quant à la clarté de son fonctionnement ont obligé les autorités danoises de reporter son instauration (2005 ?). Pour l'heure un système de tarif d'achat garantis «transitoire » a été remis en place (Voir en ANNEXE).

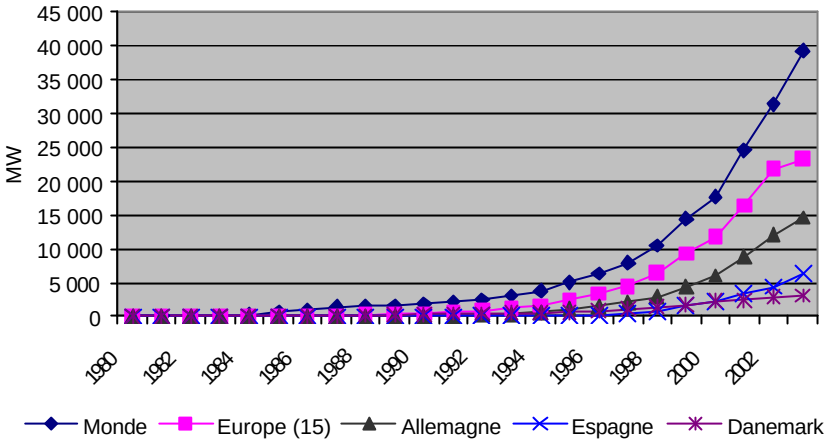
L'ensemble des instruments économiques et réglementaires mis en application au Danemark, en particulier les tarifs d'achat garantis, a favorisé l'élaboration d'un cadre assurant aux investisseurs une stabilité et une prévisibilité. Comme en Allemagne

[411] Les certificats verts sont doublement valorisés : par la vente de l'électricité sur le réseau, au prix du marché, et par la vente du certificat vert correspondant sur un marché créé à cet effet. Le produit de la vente du certificat représente la prime de la production d'électricité verte. L'effort demandé pour atteindre les quantités fixées est ainsi réparti sur l'ensemble des opérateurs en assurant une efficience allocative par égalisation des coûts marginaux de l'ensemble des producteurs (MENANTEAU *et al.* [2003a]).

et en Espagne ces instruments ont montré une grande efficacité en terme de puissance éolienne installée.

Figure 27. Evolution de la puissance éolienne cumulée

Sources : à partir de Systèmes Solaires [2000b, 2001b, 2002b, 2003b, 2004b]



A la fin de l'année 2003, la capacité éolienne mondiale installée s'élevait à 39 294 MW, l'Europe comptant pour un quart de ce total. L'Allemagne (14 609 MW), l'Espagne (6 411 MW) et le Danemark (3 110 MW) représentent à eux seuls 61,4% de la capacité mondiale et 84% de la capacité européenne.

Depuis sa constitution l'industrie éolienne danoise a dominé le marché mondial. En 2002, trois fabricants danois, Vestas, Neg-Micon et Bonus, totalisant 3179 MW vendus, se classaient parmi les six premiers mondiaux avec une part de marché de 42,3% (voir le Tableau 7). En outre, l'année 2003 a vu la constitution d'un « géant danois » avec la fusion de Vestas et Neg-Micon. Le groupe constitué, intégré sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la fabrication des composants à la livraison des parcs éoliens clés en main, contrôle désormais 35% de l'ensemble du marché mondial.

Tableau 7. Les dix premiers constructeurs éoliens mondiaux en 2002
Source : Systèmes Solaires [2004b]

Firmes	Nationalité	MW vendus	Parts de marché (en %)	Chiffre d'affaires (Millions €)	Effectifs
Vestas	Danoise	1 640	21,8	1 394	5 974
Enercon	Allemande	1 333	17,7	1 200	6 800
Neg-Micon	Danoise	1 030	13,7	842	2 180
Gamesa	Espagnole	924	12,3	583	1 398
GE Wind Energy	Américaine	638	8,5	/	1 700
Bonus	Danoise	509	6,8	279	800
Nordex	Allemande	504	6,7	445	791
Made	Espagnole	247	3,3	/	/
Repower	Allemande	223	3,0	251	390
Ecotecnia	Espagnole	120	1,6	/	350
Autres		371	4,9	/	/

* * *

Cette section avait pour objet d'étudier l'évolution du système technologique de l'énergie éolienne au Danemark. Nous avons vu dans un premier temps que les programmes de R&D menés par les pays industrialisés après les chocs pétroliers ont échoué dans le développement immédiat d'éoliennes de grande puissance pour remplacer des sources d'énergies fossiles. Dans ce contexte, le Danemark s'est distingué par l'adoption d'une trajectoire de développement de l'éolien spécifique qui s'est traduite par la constitution de deux sous-systèmes technologiques, l'un consacré aux grandes éoliennes, l'autre aux petits modèles. Le premier sous-système n'a pas permis de déboucher sur une phase industrielle, mais a contribué à établir un socle de connaissances scientifiques et techniques sur lequel s'appuiera la croissance future du marché. Le deuxième sous-système, organisé autour des activités de la station de test du laboratoire national Risoe, a montré le rôle des associations professionnelles et des propriétaires d'éoliennes dans l'initiation des apprentissages par interaction et des politiques publiques dans la constitution du marché des petites éoliennes. L'évolution incrémentale de la puissance des éoliennes a ensuite poussé les deux sous-systèmes à se rejoindre et s'enrichir mutuellement. Enfin, nous avons abordé plus en détail les instruments économiques et réglementaires mis en œuvre pour monter leur impact sur la croissance du secteur éolien danois ; ce dernier dominant aujourd'hui le marché mondial.

Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre a été l'occasion d'étudier la dynamique technologique et industrielle des énergies solaire PV et éolienne dans le cadre de l'analyse évolutionniste de l'innovation et du changement technologique.

La Section 1 nous a permis de voir que la technologie solaire PV, compétitive pour les applications hors réseau attire l'attention des pays industrialisés depuis quelques années pour les installations connectées au réseau. Les programmes de soutien menés notamment au Japon et en Allemagne permettent à cette énergie d'accéder à une diffusion de masse, bien que n'étant pas encore compétitive. Le solaire PV est marqué par un verrouillage technologique sur la trajectoire du silicium cristallin dont les effets d'apprentissages semblent diminuer. La technologie concurrente des couches minces est prometteuse en termes technico-économiques mais ne bénéficie pas pour l'instant de rendements croissants d'adoption. Dans une optique évolutionniste, cette incertitude doit conduire les politiques publiques à générer une variété technologique afin de choisir le *dominant design*.

Dans la Section 2, nous avons dans un premier temps présenté le cadre théorique des systèmes nationaux et technologiques d'innovation. Nous avons ensuite abordé l'analyse de l'évolution du système technologique de l'énergie solaire PV en Allemagne, en distinguant une première phase d'expérimentation et une deuxième de croissance mettant en évidence l'engagement dans un processus auto-entretenu. Les politiques publiques de R,D&D, influencées par les différents groupes de pression, ont initié un marché tout en orientant les recherches. En conséquence, de nombreux acteurs sont venus se positionner et structurer la filière en créant de nouvelles connaissances. Cette analyse nous a permis d'illustrer l'équilibre trouvé par les politiques publiques entre les mesures de formation d'un nouveau marché et celles de maintien de la diversité technologique.

La Section 3 a abordé le secteur de l'énergie éolienne à travers l'évolution du système technologique au Danemark. Nous avons montré l'originalité des politiques publiques de soutien à cette énergie conduisant à la création de deux sous-systèmes technologiques, respectivement pour le développement des grandes et des petites éoliennes. Alors que le premier n'a pas abouti sur une phase industrielle à grande échelle, le second organisé en réseaux d'apprentissages permettant de nombreuses interactions entre les groupes d'acteurs a conduit à développer un marché. Poussés par

les évolutions technologiques, ces sous-systèmes se sont ensuite rejoints, la complémentarité de leurs bases de connaissances soutenant dans la période récente un marché d'envergure mondiale.

CONCLUSION GENERALE

L'objet de notre thèse était d'abord d'étudier, d'un point de vue théorique, la constitution et le développement des technologies d'énergies renouvelables que nous avons définies, au regard des caractéristiques actuelles des systèmes énergétiques, comme des innovations radicales environnementales. Compte tenu des contraintes de plus en plus importantes que vont représenter l'épuisement des ressources fossiles et les atteintes environnementales globales les innovations technologiques apparaissent comme des variables d'action essentielles. Dans le but d'appréhender la dynamique technologique des filières des énergies renouvelables la revue de la littérature économique que nous avons réalisée nous a permis de choisir une conception évolutionniste de l'innovation.

De portée introductive, le Chapitre 1 a été pour nous l'occasion de rappeler les grandes manifestations du changement technique sur l'évolution des systèmes énergétiques et leur verrouillage par les technologies des sources fossiles, bien que des périodes de début de diversification, dues aux préoccupations environnementales, soient repérables.

Avec le Chapitre 2, nous avons examiné à la lumière de la théorie économique standard les incitations à innover en faveur de technologies environnementales radicales. Ces innovations, révélant un problème de double externalités positives, ont été abordées par les apports de l'économie de l'innovation et de l'environnement. Nous avons montré que si les politiques technologique et industrielle ne corrigent qu'une partie des défaillances, en complément, les instruments économiques des politiques de l'environnement induisaient des effets incitatifs pour l'adoption de technologies propres. Cependant, celles-ci se limitent dans la majorité des cas à des innovations incrémentales de «bout de chaîne ». Malgré ces apports nous n'avons pas choisi de retenir la conception de la technologie faite dans le champ théorique néo-classique.

Le Chapitre 3 a abordé l'analyse évolutionniste de l'innovation. De part les hypothèses fondamentales posées, ce courant se démarque très clairement de la théorie néo-classique. Au niveau micro-économique, il considère des firmes dotées de rationalité limitée, suivant des routines et étant capables d'apprentissages. La

conception de l'innovation, interactive, développée par l'analyse évolutionniste se veut réaliste, ce qui permet de donner un nouvel éclairage sur les externalités de connaissance. En pouvant décider d'émettre et d'absorber des connaissances, l'appropriabilité des innovations est renforcée et les firmes ont une incitation « naturelle » à innover importante. Nous avons ensuite présenté en glissant vers une dimension plus macro-économique les concepts de paradigmes et de trajectoires technologiques en tant que régularités de la dynamique technologique. Ce cadre théorique apparaissant pertinent pour étudier la dynamique des technologies des énergies renouvelables, nous avons cherché à dégager des principes de politiques technologiques et environnementales qui pouvaient favoriser l'émergence et le développement d'une technologie « verte ». La portée des modèles de compétition technologique avec rendements croissants d'adoption a d'abord permis d'expliquer les situations de *lock-in* technologiques. Enfin nous avons pu établir avec le modèle de LAFFOND *et al.* [2001] que le décideur public en contexte d'incertitude technologique doit développer la variété des options afin de dégager suffisamment d'informations pour choisir la technologie la plus efficiente.

Enfin, le Chapitre 4 nous a permis d'utiliser la théorie évolutionniste pour analyser la dynamique technologique des énergies solaires solaire PV et éolienne. Après une présentation des évolutions technico-économiques récentes du solaire PV dans le monde, nous avons cherché à expliquer le verrouillage de ce secteur sur la trajectoire des cellules au silicium cristallin. Les incertitudes concernant cette filière conduisent à s'interroger sur les apprentissages dont peut encore bénéficier le silicium cristallin et sur les rendements croissants d'adoption favorables aux technologies concurrentes en couches minces. A l'heure actuelle les politiques technologiques doivent chercher à développer encore la variété. Après un point théorique montrant l'intérêt que présentaient les approches par les systèmes technologiques d'innovation pour analyser le développement d'une filière industrielle, nous avons retracé l'évolution du système technologique du solaire PV en Allemagne. Ainsi l'environnement de sélection créé par les politiques publiques et les groupes d'acteurs ont permis au système technologique d'assurer avec succès un certain nombre de fonctions, comme la création de nouvelles connaissances et la création d'un marché. La même approche a été appliquée au système technologique danois, ce qui nous a permis de relever l'originalité de son évolution, avec une première phase où deux sous-systèmes ont co-existé avec des réussites

différentes, puis une deuxième phase qui a vu leur réunion et leur renforcement mutuel soutenant le fort développement de la filière éolienne actuellement.

Pistes de recherches futures

Les analyses que permettent les approches par les systèmes technologiques s'inscrivent bien dans une approche évolutionniste de l'innovation. En se situant au niveau d'une filière industrielle elles permettent de repérer les fonctions assurées par un systèmes technologique et ses points de défaillance. Dans la même démarche le recensement des différents acteurs d'un système technologique permet de situer les réseaux par lesquels circulent les connaissances et se développent les différents types d'apprentissages. Dans la poursuite de l'étude du développement des filières des énergies renouvelables cette analyse gagnerait à être complétée par une étude plus spécifique des stratégies des firmes par la construction d'une grille d'analyse combinant la théorie évolutionniste de la firme et l'approche par les compétences. En effet, il apparaît que les formes organisationnelles et les stratégies des principaux acteurs *résultent de* et *participent à* la constitution et à la structuration du secteur industriel et technologique dans lequel ils évoluent. Ainsi par exemple pour le secteur éolien, dont la chaîne de valeur est pleine structuration actuellement, il pourrait être possible de donner une illustration d'une co-évolution et d'une articulation des dimensions institutionnelles (par le système technologique) et organisationnelles (par les firmes) d'une innovation technologique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'INTRODUCTION GENERALE

ARROW K. [1962], « Economic welfare and the allocation of ressources for invention », *in* NELSON R., *The rate and direction of innovative activity : economic and social factors*, NBER, Princeton University Press. Réédition in ARROW K. [1985], *Collected essays, Vol. 5*, Production and capital, Blackwell, Oxford.

CE [2001], *Directive 2001/77/CE relative à la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité*, Journal Officiel des Communautés européennes n°L283-33 du 27/10/2001.

FAUCHEUX S., NOEL J.-F. [1995], *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Armand Colin

JAFFE A., NEWELL R., STAVINS R. [2003], « Technological change and the environment », *in* MALLER K.-G., VINCENT J.R., *Handbook of Environmental Economics, Chapter 11*, pp. 461-516, Elsevier Science, North-Holland.

NORDHAUS W. [1973], « The allocation of energy resources », *Brookings Paper on Economic Activity*, n°3, pp. 529-576.

UNRUH G. [2000], « Understanding carbon lock-in », *Energy Policy*, n°28, pp. 817-830.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1

ABERNATHY W., UTTERBACK J. [1978], « Patterns of industrial innovation », *Technology Review*, n°80, pp. 41-47.

AYOUB A. [1996], *Le pétrole. Economie et politique*, Economica.

BARLET C., DUGUET E., ENCAOUA D., PRADEL J. [1998], « The commercial success of innovations : an econometric analysis at the firm level in french manufacturing », *Annales d'Economie et Statistique*, n°49-50, pp.457-478.

BARSBERG B. [1987], « Patents and the measurement of technological change : a survey of the literature », *Research Policy*, Vol. 16, n°2-4, pp. 131-141.

BIROL F., KEPPLER J.H. [2000a], « Prices, technology development and the rebound effect », *Energy Policy*, n°28, pp. 457-469.

BIROL F., KEPPLER J.H. [2000b], « Technologie, prix et efficacité énergétique», *Revue STI*, n°25, OCDE, Paris.

BONAITI J.-P. [2000], « La combustion en lits fluidisés : émergence, auto-organisation et hybridation d'une nouvelle technologie », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 65-98.

BOURGEOIS B. [1994], « L'amélioration des carburants pétroliers et la contrainte environnementale », *Cahier de recherche*, Centre d'Etude en Administration International/Hautes Etudes Commerciales, Montréal.

BOURGEOIS B., FINON D., MARTIN J.-M. [2000], *Energie et changement technologique*, Economica.

BOURGEOIS B. [2000], « L'exploration/production pétrolière : discontinuités technologiques et fertilisation par les technologies de l'information et de la communication », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 369-394.

BOYER R., DIDIER M. [1998], « Innovation et croissance : relancer une dynamique de croissance durable par l'innovation », *in* Rapport du Conseil d'Analyse Economique, *Innovation et croissance*, La Documentation Française, Paris, pp. 11-132.

BP [2004], *Statistical review of world energy*, Beyond Petroleum.

BRUNTLAND G. [1987], *Our common future*, Oxford University Press, traduction française, *Notre avenir à tous*, Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement, Les Editions du Fleuve, Montréal, 1988.

CAE [2001], *Prix du pétrole*, Rapport, Conseil d'Analyse Economique La Documentation française.

CHEVALIER J.-M., BARBET P., BENZONI L. [1986], *Economie de l'énergie*, Dalloz.

COHEN W., LEVIN R. [1989], « Empirical studies of innovation and market structure », *in* SCHMALENSEE R., WILLIG R., *Handbook of industrial organization*, Vol. 2, North-Holland, pp. 1059-1107.

DALY H. [1991], *Steady states economics*, Island Press, Réédition, 1ère édition 1977.

DE ALMEIDA E.L. [1999], « Evolutionary pattern of innovation and product life cycle : empirical evidence from the electric motors technology », *Communication*, European Meeting on Applied Evolutionary Economics (EMAEE), IEPE/INRA, Grenoble.

DEBEIR J.-C., DELEAGE J.-P., DANIEL H. [1986], *Les servitudes de la puissance publique. Une histoire de l'énergie*, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion.

DESSUS B., PHARABOD F. [1996], *L'énergie solaire*, Collection Que sais-je ?, PUF.

EIA [2003], *International Energy Outlook*, Energy Information Administration, US Department of Energy, Washingthon.

FAUCHEUX S., NOEL J.-F. [1995], *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Armand Colin.

FAUCHEUX S., NICOLAI I. [1998], « Les firmes face au développement soutenable : changement technologique et gouvernance au sein de la dynamique industrielle », *Revue d'Economie Industrielle*, n°83, pp. 127-146.

FINON D. [1994], « De la sécurité énergétique à la préservation de l'environnement. Le mouvement de balancier des politiques énergétiques », *Revue de l'Energie*, n°458, pp. 254-264.

FINON D. [2000], « La technologie nucléaire enlisée : une capacité d'adaptation à un environnement de sélection évolutif », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 275-310.

FORAY D., GRÜBLER A. [1996], « Technology and the environment : an overview », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 3-13.

FORD FOUNDATION [1974], *A time to choose. America's energy future*, Energy Policy project of the Ford Foundation, Ballinger Publishing Co.

FREEMAN C. [1992], *The economics of hope : essays on technical change, economic growth and the environment*, Pinter Publishers.

GAFFARD J.-L. [1990], *Economie industrielle et de l'innovation*, Dalloz.

GONOD P. [1991], « Le système technologique », *in* ARENA R., BENZONI L., DE BANDT J., ROMANI P.-M., *Traité d'Economie Industrielle*, Economica, pp. 594-624.

GROUPE DE BELLEVUE [1978], *Projet Alter: étude d'un avenir énergétique pour la France axé sur le potentiel renouvelable*, Paris.

GRUBLER A., NAKICENOVIC N. [1996], « Decarbonizing the global energy system », *Technological Forecasting and Social Change*, n° 53, pp. 97-110.

GUILHON B. [1993], *Les dimensions actuelles du phénomène technologique*, L'Harmattan.

HERAUD J.-A. [1995], « Brevets et contexte institutionnel de la création technologique », *in* BASLE M. *et al.*, *Changement institutionnel et changement technologique*, CNRS Editions, pp. 91-117.

HICKS J. [1932], *The theory of wages*, MacMillan, London.

HOTELLING H. [1931], « The economics of exhaustible resources », *Journal of Political Economy*, n°39, pp. 137-175.

HOURCADE J.-C., LABROUSSE M. [1987], « L'économie des filières énergétiques », *Revue de l'Energie*, n°390, pp. 96-103.

IEA [2001], *Energy policies of IEA countries – 2001 Review*, International Energy Agency, Paris.

IEA [2002], *Key world energy statistics 2002*, International Energy Agency, Paris.

ISLAS J. [1999], « The gas turbine : a new technological paradigme in the electricity generation », *Technological Forecasting and Social Change*, n° 60, pp. 129-148.

LAPILLONNE B. [1997], « Le concept d'intensité énergétique comme indicateur des performances énergétiques de l'économie », *Liaison Energie-Francophonie*, n°34, pp. 4-7.

LOVINS A. [1977], *Soft energy paths : toward durable peace*, Penguin Books.

MAC KERRON G. [1996], « Innovation in energy supply : the case of electricity », *in* DODGSON M., ROTHWELL R., *The handbook of industrial innovation*, E. Elgar, pp. 182-190.

MANSFIELD E. [1984], « R&D and innovation : some empirical findings », *in* GRILICHES Z., *R&D, patents and productivity*, NBER, The University of Chicago Press, pp. 127-154.

MANSFIELD E. [1986], « Patents and innovation : an empirical study », *Management Science*, n°32, pp. 173-181.

MARTIN J.-M. [1992], *Economie et politique de l'énergie*, Collection Cursus, Armand Collin.

MARTIN J.-M. [1996], « Energy technologies : systemic aspects, technological trajectories and institutional frameworks », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 81-95.

MARTIN J.-M. [1998], « Energie et changement technologique », *Revue de l'Energie*, n°497, pp. 223-229.

MARTIN J.-M. [1999], « Rythme et directions des innovations énergétiques au cours des dernières décennies », *Revue de l'Energie*, n°508, pp. 364-372.

MARTIN J.-M. [2000], « Le changement des technologies de l'énergie : genèse, modalités et hypothèses explicatives », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 17-61.

MEADOWS D. [1972], *Halte à la croissance : rapport sur les limites de la croissance*, Editions Fayard.

METCALFE J., REEVE N. [1991], *« Les taxonomies technologiques »*, *in* DE BANDT J., FORAY D., *L'évaluation économique de la recherche et du changement technique*, Editions du CNRS, pp. 175-190.

MOWERY D., ROSENBERG N. [1989], *Technology and the pursuit of economic growth*, Cambridge University Press.

NAGATA Y. [1997], « The US/Japan comparison of energy intensity. Estimating the real gap », *Energy Policy*, n° 7-9, pp. 683-691.

NORDHAUS W. [1973], « The allocation of energy resources », *Brookings Paper on Economic Activity*, n°3, pp. 529-576.

OCDE/EUROSTAT [1997], *La mesure des activités scientifiques et technologiques : principes directeurs proposés pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation technologique*, Manuel d'Oslo, version révisée, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris.

OCDE [2001a], « Chapitre 6 - Technologie », *in Développement durable, les grandes questions*, pp. 171-186, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris.

OCDE [2001b], « Chapitre 1 - Evolution économique, sociale et environnementale », *in Développement durable, les grandes questions*, pp. 11-34, Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Paris.

PERCEBOIS J. [1979], « Le concept d'intensité énergétique est-il significatif », *Revue d'Economie Politique*, n°4, pp. 509-527.

PERCEBOIS J. [1989], *Economie de l'énergie*, Economica.

PERCEBOIS J. [1993], « Vers un développement économique à bas profil énergétique », *in* EQUER B., PERCEBOIS J., *Energie solaire photovoltaïque – Volume 2 – Aspects socio-économiques*, Editions Ellipses-UNESCO, p.7.

PERCEBOIS J. [2003], « The peaceful uses of nuclear energy : technologies of the front and back-ends of the fuel cycle », *Energy Policy*, n°31, 101-108.

PERRIN F. [1984], *La diversification énergétique des grandes compagnies pétrolières depuis la crise de 1973 : le cas de l'énergie solaire*, Thèse, Institut d'Economie et de Politique de l'Energie (IEPE), Université de Grenoble.

PERRIN J. [2001], *Concevoir l'innovation industrielle*, CNRS Editions.

PODOBNIK B. [1999], « Toward a sustainable energy regime : a long wave interpretation of global energy shifts », *Technological Forecasting and Social Change*, n°62, pp. 155-172.

PUTNAM P. [1953], *Energy in the future*, Baltimore.

RENNINGS K. [2000], « Redefining innovation – eco-innovation research and the contribution from ecological economics », *Ecological Economics*, n°32, pp. 319-332.

RENNINGS K., ZIEGLER A., ANKELE K., HOFFMAN E., NILL J. [2003], « The influence of the UE environmental management and auditing scheme on environmental innovations and competitiveness in Germany : an analysis on the basis of case studies and a large scale survey », *Discussion Paper*, n°03-14, Centre for European Economic Research.

RICHARD F. [1998], *Recherche invention et innovation*, Economica.

ROSENBLOOM R., CRISTENSEN C. [1998], «Technological discontinuities, organizational capabilities and strategic commitments », *in* DOSI G., TEECE D.J., CHYTRY J. (Eds), *Technology, Organization and Competitiveness*, Oxford University Press, pp. 215-245.

SAVIOTTI P.-P. [1991], « The role of variety in economic and technological development », *in* SAVIOTTI P.-P., METCALFE F., *Evolutionary theories of economic and technological change*, *Present status and futures prospects*, Harwood Academic Publishers, pp. 27-48.

SAVIOTTI P.-P. [1994], « Variety, economic and technological development », *in* SHIONOYA Y., PERLMAN M., *Innovation in technology, industries and institutions*, The Michigan University Press, pp. 27-48.

SCHUMPETER J. [1935], *Théorie de l'évolution économique*, traduction française de *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*, [1999], Dalloz.

SCHUMPETER J. [1942], *Capitalisme, Socialisme et Démocratie*, traduction française de *Capitalism, Socialism and Democracy*, [1990], Paris, Payot.

SINCLAIR-DESGAGNE B., GABEL H. [1993], « Managerial incentives and environmental compliance », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°24, pp. 229-240.

SINCLAIR-DESGAGNE B., GABEL H. [1997], « Environmental auditing in management systems and public policy », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°33, pp. 331-346.

STEINHART J. [1977], *A low energy scenario for the United-States 1975-2050*, Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin, Madison.

STOBAUGH R., YERGIN D. [1983], *L'énergie du futur*, Economica.

UNRUH G. [2000], « Understanding carbon lock-in », *Energy Policy*, n°28, pp. 817-830.

VERNIER J. [1997], *Les énergies renouvelables*, Collection Que sais-je ?, PUF.

VILLA P. [1998], « Evolution sur longue période de l'intensité énergétique », *Document de travail*, n°98-08, Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales (CEPII).

WEITZMAN M. [1992], « On diversity », *Quarterly Journal of Economics*, n°107, pp. 363-405.

WILLIAMS R., MARKUSSON N. [2002], « Knowledge and environmental innovations », *Communication*, First Blueprint Workshop "Environmental Innovation Systems", 23rd-24th January, Brussels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2

ADAMS J., JAFFE A. [1996], « Bounding the effect of R&D : an investigation using matched establishment-firm data », *Rand Journal of Economics*, Vol. 27, n°4, pp. 700-721.

AMENDOLA M., GAFFARD J.-L. [1988], *La dynamique économique de l'innovation*, Economica.

AMENC N., LE SOURD V. [2003], *Théorie du portefeuille et analyse de sa performance*, Economica.

ARROW K. [1962a], « Economic welfare and the allocation of ressources for invention », *in* NELSON R., *The rate and direction of innovative activity : economic and social factors*, NBER, Princeton University Press. Réédition in ARROW K. [1985], *Collected essays, Vol. 5*, Production and capital, Blackwell, Oxford.

ARROW K. [1962b], « The economic implications of learning by doing », *Review of Economics Studies*, Vol. 29. Réédition in ARROW K. [1985], *Collected essays, Vol. 5*, Production and capital, Blackwell, Oxford.

ARUNDEL A., KABLA I. [1998], « What percentage of innovations are patented ? Empirical estimates fir european firms », *Research Policy*, n°27, pp. 127-141.

BACH L., LHUILLERY S. [1999], « Recherche et externalités. Tradition économique et renouveau », *in* FORAY D., MAIRESSE J., *Innovations et performances, Approches interdisciplinaires*, Edition de l'EHESS, pp. 339-366.

BARDE J.-P. [1992], *Economie et politique de l'environnement*, PUF.

BARLET C., DUGUET E., ENCAOUA D., PRADEL J. [1998], « The commercial success of innovations : an econometric analysis at the firm level in French manufacturing », *Annales d'Economie et Statistique*, n°49-50, pp.457-478.

BAUMOL W. OATES W. [1971], « The use of standards and prices for the protection of the environment », *Swedish Journal of Economics*, n°73, pp. 42-54.

BONNIEUX F., DESAIGUES B. [1998], *Economie et politiques de l'environnement*, Dalloz.

BRANDER J., SPENCER B. [1983], « International R&D rivalry and industrial strategy », *Review of Economics Studies*, n°50, pp. 707-722.

BRESNAHAN T., TRAJTENBERG M. [1995], « General purpose technologies : engines of growth », *Journal of Econometrics*, n°60, pp. 83-108.

BROCAS I. [2003], « Les enjeux de la réglementation de la recherche et développement », *Revue d'Economie Politique*, n°113, pp. 125-148.

BROUSSEAU E. [1993], *L'économie des contrats, Technologies de l'information et coordination interentreprises*, PUF, Economie en liberté.

BUCHANAN J., STUBBLEBINE W. [1962], « Externality », *Economica* , Vol. 29, pp. 371-384.

BUCHANAN J. [1969], « External diseconomies, corrective taxes and market structure », *American Economic Review*, Vol. 59, pp. 174-176.

BURGENMEIER B., HARAYAMA Y., WALLART N. [1997], *Théorie et pratique des taxes environnementales*, Economica.

BUSH V. [1946], *Science : the endless frontier*, U.S. Congress, Joint Committee on Science Policy, Library of Congress, Washington.

CARRARO C., SINISCALCO D. [1994], « Environmental policy reconsidered : the role of technological innovation », *European Economic Review*, n°38, pp. 545-554.

CLEFF T., RENNINGS K. [1999], « Determinants of environmental innovation-empirical evidence from the Mannheim Innovation Panel and an additional telephone survey », *in* HEMMELSKAMP J., LEONE F., RENNINGS K. (Eds), *Innovation-oriented environmental regulation : theoretical approaches and empirical analysis*, Physica Verlag, Heidelberg, New York.

COASE R. [1937], « The nature of the firm », *Economica*, Vol. 4, pp. 386-405, traduction française « La nature de la firme », [1987], *Revue Française d'Economie*, Vol.2, n°1, pp. 133-163.

COASE R. [1960], « The problem of social cost », *Journal of Law and Economics*, n°3, pp. 1-44.

COASE R. [1997], *La firme, le marché et le droit*, traduction française, Paris, New York, Diderot.

COCKBURN I., HENDERSON M., STERN S. [2002], « Balancing incentives : the tension between basic and applied research », *Working Paper Series*, n°6882, NBER.

COHEN E., LORENZI J.-H. [2000], « Des politiques industrielles aux politiques de compétitivité en Europe » , *in* Conseil d'Analyse Economique, *Politiques industrielles pour l'Europe*, La Documentation Française, pp. 9-172.

COHEN W., NELSON R., WALSH J. [2000], « Protecting their intellectual assets : appropriability conditions and why U.S. manufacturing firms patent (or not) »,*Working Paper Series*, n°7552, NBER.

COHENDET P., GAFFARD J.-L. [1990], « Innovation et entreprises », *in* GREFFE X., *Encyclopédie économique*, Economica, pp. 935-977.

COHENDET P., HERAUD J.-A., ZUSCOVITCH E. [1992], « Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilité des innovations », *in* FORAY D., FREEMAN C., *Technologie et richesse des nations*, Economica, pp. 63-78.

COHENDET P. [2003], « Innovation et théorie de la firme », *in* MUSTAR P., PENAN H., *Encyclopédie de l'innovation*, Economica, pp. 383-403.

CORDES J.-J. [1989], « Tax incentives and R&D spending : a review of the evidence », *Research Policy*, n°18, pp. 119-133.

CORIAT B. [2000], « Entre politique de la concurrence et politique commerciale : quelles politiques industrielles pour l'Union européenne ? », *in* Conseil d'Analyse Economique, *Politiques industrielles pour l'Europe*, La Documentation Française, pp. 301-326.

COWAN R., FORAY D. [1998], « Economie de la codification et de la diffusion des connaissances », *in* PETIT P., *L'économie de l'information*, La Découverte, pp. 301-340.

COWAN R., DAVID P. FORAY D. [2000], « The explicit economics of knowledge codification and tacitness », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 9, pp. 211-253.

CRAMPES C., ENCAOUA D. [2003], « Micro-économie de l'innovation », *in* MUSTAR P., PENAN H., *Encyclopédie de l'innovation*, Economica, pp. 405-430.

DALES J. [1968], *Pollution, property and prices : an essay in policy making and economics*, University of Toronto Press.

DASGUPTA P., STIGLITZ J. [1980], « Industrial structure and the nature of innovative activity », *Economic Journal*, n°90, pp. 266-293.

DASGUPTA P. [1986], « The theory of technological competition », *in* STIGLITZ J.E., MATHEWSON G.F. (Ed.), *New developments in the analysis of market structure*, Macmillan Press, pp. 519-548.

DASGUPTA P., DAVID D. [1994], « Toward a new economics of science », *Research Policy*, n°23, pp. 487-521.

DASGUPTA P. [1987], « The economic theory of technology policy », *in* DASGUPTA P., STONEMAN P. (Eds.), *Economic policy and technology performance*, Cambridge University Press, pp. 7-23.

DAVID P., OLSEN T. [1992], « Technology adoption, learning spillovers and the optimal duration pf patent-based monopolies », *International Journal of Industrial Organization*, n°10, pp. 517-543.

DAVID P. [1998], « Les compromis du système d'organisation de la production intellectuelle », *Réseaux*, n°88/89.

DAVID P. [2001], « From keeping 'nature's secrets' to the institutionalization of 'open science' », *contribution to the University of Sienna Lectures* "Science as an institution and the institutions of science".

DAVID P., HALL B. [2000], « Heart of darkness: modeling public–private funding interactions inside the R&D black box », *Research* Policy, n°9, pp. 1165-1183.

DAVID P., HALL B., TOLLE A. [2000], « Is public R&D a complement or substitute for private R&D ? A review of the econometric evidence », *Research Policy*, n°29, pp. 497-529.

DE BANDT J. [1995], « Quelles conceptions des entreprises, des systèmes et des processus productifs inspirent quelles politiques publiques ? », *Revue d'Economie Industrielle*, n°71, pp. 123-141.

DEFFAINS B. [1997], « Progrès scientifique et analyse économique des droits de propriété intellectuelle », *Revue d'Economie Industrielle*, n°79, pp. 95-118.

DIXIT A., OLSON M. [2000], « Does volontary participation undermine the Coase theorem ? », *Journal of Public Economics*, n°76, pp.309-335.

EPAULARD A., POMMERET A. [1998], « Gestion et valorisation des ressources non renouvelables en incertitude », *in* SCHUBERT K., ZAGAME P., *L'environnement. Une nouvelle dimension de l'analyse économique*, Vuibert, pp. 269-314.

FAUCHEUX S., NOEL J.-F. [1995], *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Armand Colin.

FISCHER C., PARRY I., PIZER W. [2003], « Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous **»,** *Journal of Environmental Economics and Management*, n°45, pp. 523-545.

FORAY D. [1992], « Introduction », *in* FORAY D., FREEMAN C., *Technologie et richesse des nations*, Economica, pp. 1-38.

FORAY D. [1995], « Les brevets dans la nouvelle économie de l'innovation », *in* BASLE M., DUFOURT D., HERAUD J.-A., PERRIN J., *Changement institutionnel et changement technologique*, CNRS Editions, pp.119-149.

FORAY D. [2000], *L'économie de la connaissance*, La Découverte.

FREEMAN C. [1992], « Introduction de la Partie I. Science et technologie : les processus d'apprentissage », *in* FORAY D., MAIRESSE J., *Innovations et performances. Approches interdisciplinaires*, Edition de l'EHESS pp. 41-46.

FREEMAN C. [1994], « The economics of technical change : a critical survey », *Cambridge Journal of economics*, Vol.18, pp. 463-514.

FREEMAN C. [1996], « The greening of technology and models of innovation », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 27-39.

FUDENBERG D., GILBERT R., STIGLITZ J., TIROLE J. [1983], « Preemption, leapfrogging and competition in patent races », *European Economic Review*, n°22, pp. 3-31.

GAFFARD J.-L. [1989], « Marchés et organisations dans les stratégies technologiques des firmes industrielles », *Revue d'Economie Industrielle*, n°48, pp. 35-51.

GAFFARD J.-L. [1990a], « Innovations et changements structurels », *Revue d'Economie Politique*, n°3, pp. 325-382.

GAFFARD J.-L. [1990b], *Economie industrielle et de l'innovation*, Dalloz.

GALLINI N. [1992], « Patent policy and costly imitation », *Rand Journal of Economics*, n°23, pp. 52-63.

GAZON J. [1995], *Politique industrielle et industrie. Volume 1 : Controverses théoriques, aspects légaux et méthodologie*, De Boeck Université.

GILBERT R., NEWBERRY D. [1982], « Pre-emptive patenting and the persistences of monopoly », *American Economic Review*, n°72, pp. 514-526.

GILBERT R., SHAPIRO C. [1990], « Optimal patent length and breadth », *Rand Journal of Economics*, n°21, pp. 106-112.

GROSSMAN G., HELPMAN E. [1991], *Innovation and growth in the Global Economy*, MIT Press, Cambridge.

GUELLEC D. [1999], *Economie de l'innovation*, La Découverte.

GUESNERIE R., TIROLE J. [1985], « L'économie de la recherche-développement. Introduction à certains travaux théoriques », *Revue Economique*, n°5, pp. 843-871.

HAGGEDOORN J., SCHACKENRAAD J. [1990], « Inter-firm partnerships and cooperatives strategies in core technologies », *in* FREEMAN C., SOETE L. (Eds), *Nex explorations in the economics of technological change*, Pinter Publishers, New York, pp. 3-37.

HALL B., VAN REENEN J. [2000], « How effective are fiscal incentives for R&D ? A review of the evidence », *Research Policy*, n°29, pp. 449-470.

HARRIS C., VICKERS J. [1985], « Perfect equilibrium in a model of a race », *Review of Economic Studies*, n°52, pp. 193-209.

HERAUD J.-A. [1995], « Brevets et contexte institutionnel de la création technologique », *in* BASLE M. *et al.*, *Changement institutionnel et changement technologique*, CNRS Editions, pp. 91-117.

HOWELLS J. [1997], « Rethinking the market-technology relationship for innovation », *Research Policy*, n°25, pp. 1209-1219.

HOPPE H.C. [2000], « Second-mover advantages in the strategic adoption of new technology under uncertainty », *International Journal of Industrial Organization*, n°18, pp. 315-338.

HICKS J. [1932], *The theory of wages*, MacMillan, London.

JACQUEMIN A., D'ASPREMONT C. [1988], « Cooperative and non cooperative R&D in duopoly with spillovers », *American Economic Review*, December, pp. 17-25.

JACQUEMIN A. [1996], « Les enjeux de la compétitivité européenne et la politique industrielle communautaire en matière d'innovation », *Revue du Marché Commun et de l'Union Européenne*, n° Spécial « La politique industrielle européenne », mars, pp. 175-181.

JACQUIER-ROUX V. [1994], « De l'indivisibilité à la divisibilité de la R&D industrielle », *Revue d'Economie Industrielle*, n°68, pp. 43-59.

JAFFE A., NEWELL R., STAVINS R. [2003], « Technological change and the environment », *in* MALLER K.-G., VINCENT J.R., *Handbook of Environmental Economics, Chapter 11*, pp. 461-516, Elsevier Science, North-Holland.

JOKUNG-NGUENA O. [1998], *Micro-économie de l'incertain, risques et décisions*, Dunod.

JUNG C., KRUTILLA K., BOYD R. [1996], « Incentives for advanced pollution abatement technology t industry level : an evaluation of policies alternatives », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°30, pp. 95-111.

KAMIEN M., SCHWARTZ N. [1968], « Optimal induced technical change », *Econometrica*, n°36, pp. 1-17.

KATZ M., ORDOVER J. [1985], « R&D cooperation and competition », *Brookings Papers on Economic Activity*, n°2, pp. 137-202.

KLEMPERER P. [1990], « How broad should the scope of patent protection be ? », *Rand Journal of Economics*, n°21, pp. 113-130.

KLETTE T., MOEN J., GRILICHES Z. [2000], « Do subsidies to commercial R&D reduce market failures », *Research Policy*, n°29, pp. 471-496.

LA MANNA M. [1992], « Optimal patent life *vs.* Optimal patentability standards », *International Journal of Industrial Organization*, Vol. 10, pp. 81-89.

LAFFONT J.-J., TIROLE J. [1986], *« Using cost observation to regulate firms »*, Journal of Political Economy, *Vol. 94, pp. 614-641.*

LAFFONT J.-J., TIROLE J. [1993], *A theory of incentives in procurement and regulation*, MIT Press.

LANJOUW J., SCHANKERMAN M. [1997], « Stylized facts of patent litigation : value, scope and ownership », *Working Paper*, NBER, n°6297.

LAREDO P., MUSTAR P. [2003], « Politiques publiques de recherche et d'innovation », *in* MUSTAR P., PENAN H., *Encyclopédie de l'innovation*, Economica, pp. 613-626.

LEAHY D., NEARY J. [1997], « Public policy toward R&D in oligopolistic industries », *American Economic Review*, n°87, pp. 642-662.

LEE T., WILDE L. [1980], « Market structure and innovation : a reformulation », *Quarterly Journal of Economics*, n°94, pp. 429-436.

LEVEQUE F. [1998], *Economie de la réglementation*, La Découverte.

LEVIN R., KLEVORICK A., NELSON R., WINTER S. [1987], « Appropriating returns from industrial research and development »,*Brookings Papers on Economic Activity*, Vol. 3, pp. 783-820.

LOURY G. [1979], « Market structure and innovation », *Quarterly Journal of Economics*, n°93, pp. 395-410.

LYPSEY R., CARLAW K. [1998], « Une évaluation structuraliste des politiques technologiques – Pertinence du modèle schumpétérien », *Document de travail*, n°25, Programme des publications de recherche d'Industrie Canada.

MAGAT W. [1979], « The effects on environmental regulation on innovation », *Law and Contemporary Problems*, n°43, pp. 3-25.

MAHDJOUBI D. [1997], « The linear model of technological innovation », *Working Paper*, School of Information, University of Texas, http://www.gslis.utexas.edu/~darius/lnr_mdl/lnr_mdl.html.

MANSFIELD E., SCHWARTZ M., WAGNER S. [1981], « Imitation costs and patent : an empirical study », *Economic Journal*, n°91, pp. 907-918.

MANSFIELD E. [1985], « How rapidly does new industrial technology leak out ? », *Journal of Industrial Economics*, Vol. XXXIV, n°2.

MANSFIELD E. [1986], « Patents and innovations : an empirical study », *Management Science*, n°32, pp. 173-181.

MARIN A. [1991], « Firms incentives to promote technological change in pollution control : comment », *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 16, n°1, pp. 297-300.

MARSHALL A. [1925], *Principles of economics*, Mac Millan, London.

METCALFE J. [1994], « Evolutionary economics and technology policy », *The Economic Journal*, n°104, pp. 931-944.

MILLIMAN S., PRINCE R. [1989], « Firm incentives to promote technological change in pollution control », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°17, pp. 247-265.

MILLIMAN S., PRINCE R. [1992], « Firm incentives to promote technological change in pollution control : reply », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°22, pp. 292-296.

MIYAGIWA K., OHNO Y. [2002], « Uncertainty, spillovers and cooperative R&D », *International Journal of Industrial Organisation*, n°20, pp. 855-876.

MOHNEN P. [1996], « Externalités de la recherche et croissance de la productivité », *Revue Science, Technologie et Industrie*, n°18, OCDE, pp. 1-18.

MOHNEN P. [2000], « Tax incentives : issue and evidence », *in* NEVEN D., ROLLER L.-H. (Eds), *The political economy of industrial policy in Europe and the members states*, Berlin, Sigma Editions, pp. 183-199.

MORVAN Y. [1991], *Fondements d'Economie Industrielle*, Economica, 2ème Edition.

MOTTA M. [1992], « Cooperative R&D and vertical product differenciation », *International Journal of Industrial Organization*, n°10, pp. 643-641.

MOWERY D.C., ROSENBERG N. [1979], « The influence of market demand upon innovation : a critical review of some recent empirical studies », *Research Policy*, 8, pp. 102.153.

NADIRI, M. [1993], « Innovations and Technological Spillovers », *NBER Working Paper*, n°4423, National Bureau of Economic Research, Cambridge, Massachusetts.

NELSON R. [1959], « The simple economics of basic scientific research », *Journal of Political Economy*, n°67, pp. 297-306.

NORDHAUS W. [1969], *Invention, growth and welfare*, MIT Press.

O'DONOGHUE T., SCOTCHMER S., THISSE J.-F. [1998], « Patent Breadth, Patent Life, and the Pace of Technological Progress », *Journal of Economics & Management Strategy*, Vol.7, n°1, pp.1-32.

O'DONOGHUE T., ZWEIMULLER J. [1999], « Patents in a model of endogenous growth », *CEPR Discussion Paper*; n°1951.

OCDE [1993], *Méthodes types proposées pour les enquêtes sur la recherche et le développement expérimental, Manuel de Frascati*, 5ème Edition, Paris.

OLSEN T. [1993], « Regulation of multi-agent R&D », *Rand Journal of Economics*, Vol. 24, n°4, pp. 529-541.

PAVITT K. [1992], « Les entreprises et la recherche de base », *in* FORAY D., MAIRESSE J., *Innovations et performances. Approches interdisciplinaires*, Edition de l'EHESS pp. 47-62.

PENIN J. [2003], « Endogénéisation des externalités de recherche : le rôle de la capacité d'émission des connaissances », *Revue d'Economie Industrielle*, n°102, pp. 7-28.

PERRIN J. [2001], *Concevoir l'innovation industrielle*, CNRS Editions.

PEZZEY J. [1992], « The symmetry between controlling pollution by price and controlling it by quantity », *Canadian Journal of Economics*, Vol. 25, n°4, pp. 983-991.

PIGOU A. [1920], *The economics of welfare*, Londres, Mac Millan.

POYAGO-THEOTOKY [1995], « Equilibrium and optimal size of a research joint venture in an oligopoly with spillovers », *Journal of Industrial Economics*, june, pp. 209-226.

REQUATE T., UNOLD W. [2003], « On the incentives to adopt advanced abatement technology - Will the true ranking please stand up ? », *European Economic Review*, n°47, pp. 125-146.

REINGANUM J. [1989], « The timing of innovation : research, development and diffusion », *in* SCHMALENSEE R. et WILLIG R. (Eds.), *Handbook of industrial organization*, Vol. 1, Chap. 14, pp. 849-908.

REVUE D'ECONOMIE INDUSTRIELLE [1995], « Numéro Spécial : Renouveau des politiques industrielles dans le contexte des économies globales », n°74.

ROMER P. [1990], « Endogenous technological change », *Journal of Political Economy*, Vol. 28, pp. 71-102.

ROSENBERG N. [1974], « Science, innovation and economic growth », *Economic Journal*, n°84, pp.90-108.

ROSENBERG N. [1982], *Inside the black box*, Cambridge University Press.

ROTHWELL R. [1996], « Industrial innovation : success, strategy, trends », *in* DODGSON M., ROTHWELL R., *The Handbook of Industrial Innovation*, E. Elgar, pp. 33-53.

SCHERER F. [1972], « Nordhaus'theory of optimal patent life : a geometric reinterpretation », *American Economic Review*, n°62, pp. 422-427. cite

SCHERER F.M. [1982], « Demand pull and technological innovation revisited », *Journal of Industrial Economics*, n°30, pp. 215-218.

SCHMOOKLER J. [1966], *Invention and economic growth*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.

SCHUMPETER J. [1942], *Capitalisme, Socialisme et Démocratie*, traduction française de *Capitalism, Socialism and Democracy* [1990], Paris, Payot.

SCITOVSKY T. [1954], « Two concepts of external economies », *Journal of Political Economy*, n°62, pp. 143-151.

SCOTCHMER S. [1991], « Standing on the shoulders of giants : cumulative research and the patent law », *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 5, n°1, pp. 29-41.

SINCLAIR-DESGAGNE B., GABEL H. [1993], « Managerial incentives and environmental compliance », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°24, pp. 229-240.

SINCLAIR-DESGAGNE B., GABEL H. [1997], « Environmental auditing in management systems and public policy », *Journal of Environmental Economics and Management*, n°33, pp. 331-346.

STEINMUELLER W. [1996], « Basic research and industrial innovation », *in* DODGSON M., ROTHWELL R., *The Handbook of Industrial Innovation*, E. Elgar.

STENBACKA R., TOMBAK M., [1998], « Technology policy and the organization of R&D », *Journal of Economic Behavior and Organization*, n°36, pp. 503-520.

STIGLER G. [1966], *The theory of price*, Macmillan, New York.

STOKES D. [1994], « The impaired dialogue between science and government and what might be done about it », *in* A.H. TEICH, S.D. NELSON, C. Mc ENANEY, *AAAS Science and Technology Policy Yearbook 1994*, pp.123-145.

TEECE D. [1986], « Profiting from technological innovation : implication for integration, collaboration, licensing and public policy », *Research Policy*, n°15, pp. 185-219.

TIROLE J. [1995], *Théorie de l'Organisation Industrielle – Tome II*, Economica.

TOSHIMITSU T. [2003], « Optimal R&D policy and endogenous quality choice », *International Journal of Industrial Organization*, n°21, pp. 1159-1178.

TURVEY R. [1963], « On divergencies between social cost and private cost », *Economica*, n°30, pp. 309-313.

VAN DIJK T. [1994], « The Economic Theory of Patents : A Survey », *MERIT Research Memorandum*, n° 2/94-017, University of Maastricht.

VERSPAGEN B., KLEINKNECHT A. [1990], « Demand and innovation : SCHMOOKLER reexamined », *Research Policy*, 19, pp. 387-394.

VALSH V. [1984], « Invention and innovation in the chemical industry : demand pull or discovery push », *Research Policy*, Vol.19, pp. 387-394.

VINER J. [1931], « Cost curves and supply curves », *Zeitschift für National Ökonomie*, n°3, pp. 23-46.

VON NEUMANN J., MORGENSTERN O. [1947], *Theory of games and economic behavior*, Princeton University Press.

WEITZMAN M. [1974], « Prices versus quantities », Review of Economic Studies, Vol. 41, n°4, pp. 477-491.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 3

ABERNATHY W., UTTERBACK J. [1978], « Patterns of industrial innovation », *Technology Review*, Vol. 80, n°7, pp. 40-47.

ALCHIAN A. [1950], « Uncertainty, evolution and economic theory », *Journal of Political Economy*, LVIII, pp. 211-221.

AMBEC S., BARLA P. [2001], « Productivité et réglementation environnementale : une analyse de l'hypothèse de Porter », *Ressources Naturelles* Canada, Québec.

AMENDOLA M., GAFFARD J.-L. [1988], *La dynamique économique de l'innovation*, Economica.

ANDERSEN E. [1994], *Evolutionary Economics Post-Schumpeterian Contributions*, Pinter, London.

AOKI M. [1986], « Horizontal *versus* vertical information structure of the firm », *American Economic Review*, n°76, pp. 971-983.

AOKI M., ROSENBERG N. [1987], « The Japanese Firm as an Innovating Institution », *Working Paper*, n°106, Center for Economic Policy Research, Stanford University.

ARCHIBUGI D., CESARATTO S., SIRILLI G. [1991], **«** Sources of innovative activities and industrial organisation in Italy **»**, *Research Policy*, n°20, pp. 299–313.

ARENA R., DANGEL HAGNAUER C. [2002], *The Contribution of Schumpeter to Economics – Economic Developement and Institutionnal Change*, Routledge, London.

ARENA R., LAZARIC N. [2003], « La théorie du changement économique de NELSON et WINTER », *Revue Economique*, Vol.54, n°2, pp. 323-328.

ARROW K. [1962a], *« Economic welfare and the allocation of ressources for invention »,* in The rate and direction of innovative activity : economic and social factors, *NBER, Princeton University Press, NELSON R. Ed.,* Réédition in *ARROW K. [1985],* Collected essays, *Vol. 5, Production and capital, Blackwell, Oxford.*

ARROW K. [1962b], « The economic implications of learning by doing », *Review of Economics Studies*, vol. 29, Réédition in ARROW K. [1985], *Collected essays, vol. 5, Production and capital,* Blackwell, Oxford.

ARTHUR B. [1988], « Competing technologies : an overview », *in* DOSI *et alii* (Eds), *Technical change and economic theory*, London, New York, Pinter Publishers, pp.590-630.

ARTHUR B. [1989], « Competing technologies, increasing returns and lock-in », *Economic Journal*, n°99, pp. 116-131.

ATKINSON B., STIGLITZ J. [1969], « A new view of technological change », *Economic Journal*, n°79, pp. 609-632.

BASLE M., DELORME R., LE MOIGNE J.-L., PAULRE B. [1997], « Introduction générale. L'Evolutionnisme contemporain en économie. », *Economie Appliquée*, n°3, pp. 9-20.

BASLE M., DELORME R., LEMOIGNE J.-L., PAULRE B. [1999], *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie. Théories et analyses empiriques*, L'Harmattan.

BASSANINI A., DOSI G. [1999], « Competing technologies, international diffusion and the rate of convergence to a stable market structure », *Working Paper*, n°1999-03, Laboratory of Economics and Management, Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa.

BENHAIM J., SCHEMBRI P. [1995], « Environnement et orientations stratégiques du changement technique », *Economie Appliquée*, n°3, pp. 39-69.

BOYER R., DIDIER M. [1998], « Innovation et croissance : relancer une dynamique de croissance durable par l'innovation », *in Innovation et croissance*, Rapport du Conseil d'Analyse Economique, La Documentation Française, Paris, pp. 11-132.

BROUSSEAU E. [2000], « Processus évolutionnaires et institutions », *Revue Economique*, Vol. 51, n°5, pp. 1185-1213.

BURGENMEIER B., HARAYAMA Y., WALLART N. [1997], *Théorie et pratique des taxes environnementales*, Economica.

CARLSSON B. [1992], « Industrial dynamics : a framework for analysis of industrial transformation », *Revue d'Economie Industrielle*, n°61, pp. 7-32.

CHALMERS A. [1997], *Qu'est ce que la science ?*, 5ème Edition, La Découverte.

CHOU C., SHY O. [1990], « Network effects without network externalities », *International Journal of Industrial Organization*, Vol. 8, pp. 259-270.

CLARK N., JUMA C. [1988], « Evolutionary theories in economic development thought », *in* DOSI G., FREEMAN C., NELSON R., SILVERBERG G., SOETE L. (Eds), *Technical change and economic theory*, Pinter Publishers, pp. 197-218.

COHEN W., NELSON R., WALSH J. [2000], « Protecting their intellectual assets : appropriability conditions and why U.S. manufacturing firms patent (or not) », NBER Working Paper, n°7552.

COHEN W., LEVINTHAL D. [1989], « Innovation and learning : the two faces of R&D », *The Economic Journal*, Vol. 99, n°397, pp. 569-596.

COHEN W., LEVINTHAL D. [1990], « Absorptive capacity : a new perspective on learning and innovation », *Administrative Science Quarterly*, Vol. 35, pp. 128-152.

COHENDET P., HERAUD J.-A., ZUSCOVITCH E. [1992], « Apprentissage technologique, réseaux économiques et appropriabilité des innovations », *in* FORAY D., FREEMAN C., *Technologie et Richesse des Nations*, Economica, pp. 63-78.

COHENDET P., LLERENA P. [1999], « La conception de la firme comme processeur de connaissances », *Revue d'Economie Industrielle*, n°88, pp. 211-232.

COHENDET P., FORAY D., GUELLEC D., MAIRESSE J. [1999], « La gestion publique des externalités positives de recherche », *in* FORAY D., MAIRESSE J., *Innovations et performances. Approches interdisciplinaires*, Edition de l'EHESS, pp. 367-383.

COHENDET P., MEYER-KRAHMER F. [2001], *Technology and Infrastructures Policy In the Knowledge based Economy - The Impact of the Tendency towards Codification of Knowledge*, TIPIK final report.

CORIAT B., WEINSTEIN O. [1995], *Les nouvelles théories de l'entreprise*, Le Livre de Poche.

COWAN R. [1990], « Nuclear power reactors : a study in technological lock-in », *Journal of Economic History*, Vol.50, n°3, pp. 541-568.

COWAN R. [1991], « Rendements croissants d'adoption et politiques technologiques », *in* DE BANDT J. et FORAY D., *L'évaluation économique de la recherche et du changement technique* , Editions du CNRS, pp. 381-398.

COWAN R., HULTEN S. [1996], « Escaping lock-in : the case of the electric vehicle », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 61-79.

COWAN R., FORAY D. [1997], « The economics of codification and the diffusion of knowledge », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 6, pp. 595-620.

COWAN R., DAVID P. FORAY D. [2000], « The explicit economics of knowledge codification and tacitness », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 9, pp. 211-253.

CYERT R., MARCH J. [1963], *A behavioural theory of the firm*, Englewood Cliffs, Prentice Hall.

DALLE J.-M. [1995], « Dynamique d'adoption, coordination et diversité : la diffusion des standards technologiques », *Revue Economique*, Vol.46, n°4, pp. 1081-1098.

DALLE J.-M. [1997], « Heterogeneity vs. externalities in technological competition : a tale of possible technological landscapes », *Journal of Evolutionary Economics*, n°7, pp. 395-413.

DAVID P. [1985], « Clio and the economics of QWERTY », *American Economic Review*, n°75, pp. 332-337.

DAVID P. [1987], « Some new standards for the economics of standardization in the information age », *in* DASGUPTA P., STONEMAN P. (Eds.), *Economic policy and Technological Performance*, Cambridge University Press, pp. 206-239.

DAVID P. [1992], « Dépendance du chemin et prévisibilité des systèmes dynamiques avec externalités de réseau localisées : un paradigme pour l'économie historique », *in* FORAY D. et FREEMAN C., *Technologie et richesse des nations*, Economica, pp. 241-273.

DAVID P., FORAY D. [1994], « Dépendance du sentier et économie de l'innovation : un rapide tour d'horizon », *Revue d'Economie Industrielle*, numéro Hors Série « Economie industrielle : développements récents », pp. 27-52.

DE BANDT J. [1995], « Quelles conceptions des entreprises, des systèmes et des processus productifs inspirent quelles politiques publiques ? », *Revue d'Economie Industrielle*, n°71, pp. 123-141.

DE MARCHI M., NAPOLITANO G., TACCINI P. [1996], « Testing a model of technological trajectories », *Research Policy*, n°25, pp. 13–32.

DOSI G. [1982], « Technological paradigms and technological trajectories », *Research Policy*, n°11, pp. 147-162.

DOSI G. [1984], *Technical Change and Industrial Transformation*, MacMillan.

DOSI G. [1988a], « Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation », *Journal of Economic Literature*, Vol. XXVI, September, pp. 1120-1171.

DOSI G. [1988b], « The nature of the innovative process », *in* DOSI G., FREEMAN C., NELSON R., SILVERBERG G., SOETE L., *Technical change and economic theory*, Pinter Publishers, pp. 221-238.

DOSI G. [2002], « A very reasonable objective still beyond our reach : economics as an empirical disciplined social science », *Working Paper*, n°2002-03, Laboratory of Economics and Management, Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa.

DOSI G., FREEMAN C., NELSON R., SILVERBERG G., SOETE L. [1988], *Technical Change and Economic Theory*, Pinter Publishers.

DOSI G., TEECE D., WINTER S. [1990], « Les frontières des entreprises : vers une théorie de la cohérence de la grande entreprise », *Revue d'Economie Industrielle*, n°51, pp. 238-254.

DOSI G., NELSON R. [1994], « An introduction to evolutionary theories in economics », *Journal of Evolutionary Economics*, n°4, pp. 153-172.

DOSI G., ERMOLIEV Y., KANIOVSKI Y. [1994], « Generalized urn schemes and technological dynamics », *Journal of Mathematical Economics*, n°23, pp. 1-23.

EGE R. [1993], « LAMARK et l'analogie biologique en Economie », *Revue Internationale de Systémique*, n°7, pp. 471-486.

EGE R. [2002], « LAMARCK, innovation and biological analogy in economics », *Communication*, Conférence en mémoire de E. ZUSCOVITCH, Strasbourg, 26-28 mai.

FAGERBERG J. [2003], « SCHUMPETER and the revival of evolutionary economics : an appraisal of the literature », *Journal of Evolutionary Economics*, n°13, pp. 125-159.

FAUCHEUX S., NICOLAÏ I. [1998a], « Les firmes face au développement soutenable : changement technologique et gouvernance au sein de la dynamique industrielle », *Revue d'Economie Industrielle*, n°83, pp. 127-146.

FAUCHEUX S., NICOLAÏ I. [1998b], « Environmental technological change and governance in sustainable development policy », *Ecological Economics*, n°27, pp. 243-256.

FORAY D. [1989], « Les modèles de compétition technologique. Une revue de littérature. », *Revue d'Economie Industrielle*, n°48, pp. 16-34.

FORAY D. [1991], « Repères pour une économie des organisations de recherche-développement », *Revue d'Economie Politique*, n°101, pp. 780-807.

FORAY D. [1994], « Les nouveaux paradigmes de l'apprentissage technologique », *Revue d'Economie Industrielle*, n°69, pp. 93-104.

FORAY D. [2000], *L'économie de la connaissance*, La Découverte.

FORAY D. [2003], « Trois modèles d'innovation dans l'économie de la connaissance », *in* MUSTAR P., PENAN H., *Encyclopédie de l'innovation*, Economica, pp. 498-518.

FORAY D., MOWERY D. [1990], « L'intégration de la recherche industrielle : nouvelles perspectives d'analyse », *Revue Economique*, pp. 501-530.

FORAY D., GRÜBLER A. [1996], « Technology and the environment : an overview », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 3-13.

FREEMAN C. [1988], « Japan a new national system of innovation ? », *in* DOSI G. *et al.* (Eds), *Technical Change and Economics Theory*, London Pinter, pp. 330-348.

FREEMAN C. [1991], « Innovation, changes of techno-economic paradigm and biological analogies in economics », *Revue Economique*, n°2, pp. 211-231.

FREEMAN C. [1996], « The greening of technology and models of innovation », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 27-39.

FRIEDMAN M. [1953], *Essays in positive economics*, University of Chicago Press, Chicago.

GAFFARD J.-L. [1990a], *Economie industrielle et de l'innovation*, Dalloz.

GAFFARD J.-L. [1990b], « Innovations et changements structurels », *Revue d'Economie Politique*, n°3, pp. 325-382.

GERYBADZE A. [1992], « The implementation of industrial policy in an evolutionary perspective », *in* WITT U. (Ed.), *Explaining process and change : approaches to evolutionary economics*, The University of Michigan Press.

GODARD O. [2004], « Savoirs, risques globaux et développement durable », Cahier de Recherche, n°2004-003, Chaire développement durable EDF-Ecole Polytechnique.

GOLDSTEIN D. [2002], « Theoretical perspectives on strategic environmental management », *Journal of Evolutionary Economics*, n°12, pp. 495-524.

GORT M., KLEPPER S. [1982], « Time paths in the diffusion of product innovations », *The Eonomic Journal*, n°92, pp. 630-653.

GUESNERIE R., HAUTCOEUR P.-C. [2003], *La recherche au service du développement durable – Rapport intermédiaire*. Paris, Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies.

GUILHON B. [1995], « Le processus d'apprentissage de la firme J: contenu et limites », *Revue d'Economie Industrielle*, n°74, pp. 85-101.

HODGSON G. [1994], « Selection unit of evolutionary », *in* SAMUELS W., TOOL M. (Eds.), *The Edward Elgar Companion to Institutional and Evolutionary Economics*, Edward Elgar.

HODGSON G. [2002], « Darwinism in economics : from analogy to ontology », *Journal of Evolutionary Economics*, n°12, pp. 259-281.

ISLAS J. [1997], « Getting round the lock-in in electricity generating systems : the example of the gas turbine », *Research Policy*, n°26, pp. 49-66.

JACQUEMIN A., D'ASPREMONT C. [1988], « Cooperative and non cooperative R&D in duopoly with spillovers », *American Economic Review*, December, pp. 17-25.

JACQUIER-ROUX V. [1994], « De l'indivisibilité à la divisibilité de la R&D industrielle », *Revue d'Economie Industrielle*, n°68, pp. 43-59.

JOHNSON B., LUNDVALL B.Ä. [2001], « Why all this fuss about codified and tacit knowledge », *Communication*, DRUID Winter Conference, Aalborg University.

KAMIEN M., SCHWARTZ N. [1982], *Market structure and innovation*, Cambridge University Press.

KAMIEN M., ZANG I. [2000], « Meet me halfway: research joint ventures and absorptive capacity », *International Journal of Industrial Organization*, n°46, pp. 333-1012.

KATZ M., SHAPIRO C. [1985], « Network externalities, competition and compatibility », *American Economic Review*, n°75, pp. 424-440.

KEMP R. [2000], « Governance and the environment - Enhancing technical change », *MERIT Research Memorandum 20-013*, MERIT University of Maastricht.

KEMP R., SOETE L. [1992], « The greening of technological progress : an evolutionary perspective », *Futures*, Vol. 24, n°5, pp. 437-457.

KEMP R., RIP A., SCHOT J. [1997], « Constructing transition paths through the management of niches », *in* GARUD R., KARNOE (Eds), *Path creation and dependance*, Lawrence Erlbaum Associates Publischers, pp. 269-299.

KEMP R., SCHOT J., HOOGMA R. [1998], « Regime shifts to sustainability through processes of niche formation : the approach of strategic niche management », *Technology Analysis and Strategic Management*, Vol. 10, n°2, pp. 175-195.

KIRMAN A. [1991], « Information, communication et coordination », *Economie Appliquée*, tome XLIV, n°1, pp. 105-124.

KLEPPER S. [1996], « Entry, exit, growth and innovation over the product life cycle », *American Economic Review*, Vol. 86, n°3, pp. 562-583.

KLINE S., ROSENBERG N. [1986], « An overview of innovation », *in* LANDAU R., ROSENBERG N., *The positive sum strategy*, National Academy Press, Washingthon, pp. 275-305.

KNIGHT F. [1921], *Risk, Uncertainty and Profit*, The Riverside Press, Cambridge.

KUHN T. [1979], *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion.

LAFFOND G., LESOURNE J., MOREAU F. [2000], « Interaction between public policies and technological competition under environmental risks », in CANTNER U., HANUSCH H., KLEPPER S. (Eds.), *Economic Evolution, Learning and Complexity*, Heidelberg, Physica verlag.

LAZARIC N. [1999], « Routines et apprentissage dans la théorie évolutionniste: portées et limites des fondements cognitifs » *in* BASLE M. *et al.* , *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie. Théories et analyses empiriques*, L'Harmattan, pp. 165-187.

LE BAS C., ZUSCOVITCH E. [1993], « Apprentissage technologique et organisation. Une analyse des configurations micro-économiques. », *Economies et Sociétés*, Série *Dynamique technologique et organisation*, n°1/5, pp. 153-195.

LE DORTZ L. [1999], « Enigmes schumpétériennes et dynamique évolutionniste des industries » *in* BASLE M. *et al.*, *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie*, L'Harmattan, pp. 231-257.

LERNER J., TIROLE J. [2001], « The open source movement : key research questions », *European Economic Review*, Vol. 45, pp. 819-826.

LESOURNE J. [1991], *Economie de l'ordre et du désordre*, Economica.

LESOURNE J., ORLEAN A., WALLISER B. [2002], *Leçons de microéconomie évolutionniste*, Odile Jacob.

LEVIN R., KLEVORICK A., NELSON R., WINTER S. [1987], « Appropriating returns from industrial research and development », *Brookings Papers on Economic Activity*, pp. 783-820.

LIEBOWITZ S., MARGOLIS E. [1995], « Path dependence, lock-in and history », *Journal of Law, Economics and Organisation*, n°11, pp. 205-226.

LUNDVALL B.-A. [1988], « Innovation as an interactive process : from user-producer interaction to the national system of innovation », *in* DOSI *et al.*, *Technical Change and Economic Theory*, pp. 349-369.

LUNDVAL B.-A. [1992], *National Systems of Innovation*, Pinter Publishers.

LUNDVALL B.-A., JOHNSON B. [1994], « The learning economy », *Journal of Industries Studies*, Vol. 1, n°2, pp. 23-42..

LYPSEY R., CARLAW K., AKMAN D. [1998], « A structuralist assessment of technology policies – Taking Schumpeter seriously on policies », *Working Paper*, n°25, Industry Canada, Publication Program.

MAGNUSSON L. [1994], *Evolutionary and Neo Schumpeterian Approach to Economics*, Kluwer.

MALERBA F., ORSENIGO L. [1993], « Technological regimes and firm behaviour », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 2, pp. 45-74.

MALERBA F., ORSENIGO L. [1995], « Schumpeterian patterns of innovation », *Cambridge Journal of Economics*, n°19, pp. 47-65.

MALERBA F., ORSENIGO L. [1996a], « The dynamics and evolution of industry », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 5, pp. 51-87.

MALERBA F., ORSENIGO L. [1996b], « Schumpeterian patterns of innovation are technology specific », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 25, n°3 pp. 451-478.

MALERBA F., NELSON R., ORSENIGO L., WINTER S. [1999], « History friendly models of industry evolution : the case of computer industry », *Industrial and Corporate Change*, n°8, pp. 3-40.

MARENGO L. [1994], « Knowledge distribution and coordination in organizations : on some social aspects of the exploitation *versus* exploration trade-off », *Revue Internationale de Systémique*, Vol. 7, n°5, pp. 553-571.

MARSILI O., VERSPAGEN B. [2002], « Technology and the dynamics of industrial structures : an empirical mapping of Dutch manufacturing », *Industrial and Corporate Change*, n°11, pp. 791-815.

MASSARD N. [1997], « Externalités, apprentissage et dynamique technologique. Un retour sur la notion de réseau. » *in* B.GUILHON *et al.*, *Economie de la connaissance et des organisations. Entreprises, territoires, réseaux*, L'Harmattan, pp. 336-355.

MAZZOLENI R., NELSON R. [1998], « The benefits and costs of strong patent protection : a contribution to the current debate », *Research Policy*, Vol. 27, pp. 273-284.

METCALFE J. [1994], « Evolutionary economics and technology policy », *The Economic Journal*, n°104, pp. 931-944.

MILLER R. [1994], « Global R&D networks and large-scale innovations: the case of the automobile industry », *Research Policy*, n°1, pp. 27-46.

MOREAU F. [2000], « Environnement, long terme et choix industriel : maîtrise des risques et sélection de trajectoires technologiques », *in* THEYS J. (Ed.), *L'environnement au XXIème siècle : démocratie et politique à long terme*, tome III, Germes, Paris, pp. 505-528.

MOREAU F. [2004], « The role of the state in an evolutionary microeconomics », *Cambridge Journal of Economics*, à paraître.

MUNIER F. [1999], « L'entreprise fondée sur les compétences. Définition et axiomatique. », *in* BASLE M. *et al.*, *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie. Théories et analyses empiriques*, L'Harmattan, pp. 77-94.

NALEBUFF B., BRANDENBURGER A. [1996], *La co-opétition, une révolution dans la manière de jouer : concurrence et coopération*, Village mondial.

NELSON R. [1988], « Institutions supporting technical change in the United-States », *in* DOSI G. *et al.*, *Technical Change and Economic Theory*, London Pinter, pp. 312-329.

NELSON S., WINTER S. [1982], *An evolutionary theory of economic change*, The Belknap Press of Harvard University Press.

NIOSI J., BELLON B. [1995], « Une interprétation évolutionniste des politiques industrielles », *Revue d'Economie Industrielle*, n°71, pp. 213-226.

PALMER K., OATES W., PORTNEY P. [1995], « Tightening environmental standards : the benefit-cost or the no-cost paradigm », *Journal of Economic Perspectives*, n°9, pp. 119-131.

PAULRE B. [1997], « L'apport de l'évolutionnisme contemporain à l'analyse économique de l'innovation », *Economie Appliquée*, tome L, N°3, pp. 237-280.

PAULRE B. [1999], « La théorie évolutionniste de la firme comme programme de recherche », *in* BASLE M. *et al.*, *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie. Théories et analyses empiriques*, L'Harmattan., pp. XI-XLVII.

PAVITT K. [1984], « Sectoral patterns of technical change : towards a taxonomy and a theory», *Research Policy*, n°13, pp.343-373.

PAVITT K. [1992], « Les entreprises et la recherche de base », *in* FORAY D., MAIRESSE J., *Innovations et performances. Approches interdisciplinaires*, Edition de l'EHESS, pp. 47-62.

PENIN J. [2003], « Endogénéisation des externalités de recherche : le rôle de la capacité d'émission des connaissances », *Revue d'Economie Industrielle*, n°102, pp. 7-28.

PENROSE E. [1952], « Biological analogies in the theory of the firm », *American Economic Review*, Vol. 42, n°5, pp. 804-819.

PENROSE E. [1953], « Biological analogies in the theory of the firm :Rejoinder », *American Economic Review*, Vol. 43, n°4, pp. 603-609.

PERRIN J. [1991], « Analyse et évaluation des processus de production des techniques à partir des activités de conception », *in* DE BANDT J., FORAY D., *L'évaluation économique de la recherche et du changement technique*, Editions du CNRS, pp. 117-134.

PERRIN J. [2001], *Concevoir l'innovation industrielle*, CNRS Editions.

PORTER M., VAN DER LINDE C. [1995], « Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship », *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9, n°4, pp. 97-118.

RALLET A. [1999], « Ombres et lumières de la théorie évolutionniste », *in* BASLE M. *et al.*, *Approches évolutionnistes de la firme et de l'industrie. Théories et analyses empiriques*, L'Harmattan, pp. 27-43.

RAMMEL C., VAN DEN BERGH J. [2003], « Evolutionary policies for sustainable development : adaptive flexibility and risk minimising », *Ecological Economics*, n°47, pp. 121-133.

RING I. [1997], « Evolutionary strategies in environmental policies », *Ecological Economics*, n°23, pp. 237-239.

ROSENBERG N. [1976], *Perspectives on Technology*, Cambridge University Press.

ROSENBERG N. [1982], *Inside the black box*, Cambridge University Press.

SAHAL D. [1985], « Technology, guide-posts and innovation », *Research Policy*, n°14, pp. 61-82.

SAVIOTTI P. P. [1995], « Renouveau des politiques industrielles : le point de vue des théories évolutionnistes », *Revue d'Economie Industrielle*, n°71, pp. 199-212.

SIMON H. [1955], « A behavioural model of rational choice », *Quarterly Journal of Economics*, n°69, pp. 129-138.

SIMON H. [1959], « Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science », *American Economic Review*, n°3, pp. 253-283.

SIMON H. [1961], *Administrative Behavior*, 2ème edition (1ère edition 1947), New-York, Macmillan.

SIMON H. [1976], « From substantial to procedural rationality », *in* LATSIS S. (Eds), *Method and Appraisal in Economics*, Cambridge University Press, pp. 129-148.

SCHUMPETER J. [1935], *Théorie de l'évolution économique*, traduction française de *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*, [1999], Dalloz.

SCHUMPETER J. [1939], *Business Cycles, a Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, New-York, London, McGraw Hill Book Company**.**

SCHUMPETER J. [1942], *Capitalisme, Socialisme et Démocratie*, traduction française de *Capitalism, Socialism and Democracy* [1990], Paris, Payot**.**

STIGLITZ J. [1987], « Learning to learn, localized learning and technological progress », *in* DASGUPTA P., STONEMAN P. Eds., *Economic Policy and Economic Performance*, Cambridge University Press, pp. 125-153.

UNRUH G. [2000], « Understanding carbon lock-in », *Energy Policy*, n°28, pp. 817-830.

WEGNER G. [1997], « Economic policy from an evolutionary perspective : a new approach », *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, Vol. 8, n°1, pp. 45-66.

WILLINGER M., ZUSCOVITCH E. [1993], « Efficience, irréversibilités et constitution des technologies », *Revue d'Economie Industrielle*, n°65, pp. 7-22.

WINTER S. [1964], « Economic 'natural selection' and the theory of the firm », *Yale Economic Essays*, vol. 4, pp. 225-272.

WINTER S. [1971/1993], « Satisfacing, selection and the innovative remnant », *Quaterly Journal of Economics*, LXXXV, pp. 237—261, *in* WITT U., Eds., *Evolutionary Economics*, Edward Elgar, pp. 76-100.

WINTER S. [1984], « Schumpeterian competition in alternative technological regimes », *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 5, n°3-4 pp. 287-320.

WINTER S. [1995], « Four Rs of profitability: Rents, Resources, Routines and Replication » *in* MONTGOMERY C. (Ed.), *Resource-Based and Evolutionary Theories of the Firm : Towards a Synthesis*, Kluwer Academic Publishers, pp. 159-167.

WITT U. [1991], « Reflections on the Present State of Evolutionary Economic Theory », *in* HODGSON G., SCREPANTI E. (Eds.), *Rethinking Economics: Markets, Technology, and Economic Evolution*, Edward Elgar, pp. 83-102.

ZUSCOVITCH E. [1993], « L'analyse évolutionniste et l'hypothèse lamarkienne : vers une 'compétition sociale imparfaite' », *Revue Internationale de Systémique*, n°5, pp. 459-469.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 4

ABERNATHY W., UTTERBACK J. [1978], « Patterns of industrial innovation », *Technology Review*, Vol. 80, n°7, pp. 40-47.

ACKERMANN T., SODER L. [2000], « Wind energy technology and current status : a review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n°4, pp. 315-374.

ADEME [2002], *Elaboration d'un outil d'insertion sociale et territorial des éoliennes*, étude réalisée par Médiation et Environnement pour l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

ADEME-CLER [2002], *Des éoliennes dans votre environnement ? Eoliennes & contexte énergétique*, Fiche d'information, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Comité de Liaison des Energies Renouvelables.

ADEME [2003], *Perception et représentation de l'énergie photovoltaïque intégrée aux bâtiments et reliée au réseau*, étude réalisée par Louis Harris pour l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Paris.

AMABLE B. [2003], « Les systèmes d'innovation », *in* MUSTAR P., PENAN H., *Encyclopédie de l'innovation*.

ANDERSSEN P., LEMMING J. [1999], *Wind power in Denmark. Technology, policies and results, Report*, The Ministry of energy, Copenhagen.

ANDERSSON B., JACOBSSON S. [2000], « Monitoring and assessing technology choice : the case of solar cells », *Energy Policy*, n°28, pp.1037-1049.

ARROW K. [1962b], « The economic implications of learning by doing », *Review of Economics Studies*, vol. 29, Réédition *in* ARROW K. [1985], *Collected essays, vol. 5, Production and capital*, Blackwell, Oxford.

ARTHUR B. [1988], « Competing technologies : an overview », in DOSI *et al.* (Eds), *Technical change and economic theory*, London, New York, Pinter Publishers, pp.590-630.

ARTHUR B. [1989], « Competing technologies, increasing returns and lock-in », *Economic Journal*, n°99, pp. 116-131.

BASLE M., DUFOURT D., HERAUD J.-A., PERRIN J. [1995], *Changement institutionnel et changement technologique*, CNRS Editions.

BCG [1968], *Perspectives on experience*, Boston Consulting Group, Boston MA.

BECHBERGER M., REICHE D. [2004], « Renewable energy policy in Germany : pioneering and exemplary regulations », *Energy for Sustainable Development*, Vol. VIII, n°1, pp. 47-57.

BIRD L., WUSTENAHGEN R., AABAKKEN J. [2002], « A review of international green power markets : recent experience, trends, and markets drivers », *Energy Policy*, n°6, pp. 513-536.

BIRRAUX C., LE DEAUT J.-Y. [2001], *Rapport sur l'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Assemblée Nationale.

BOURGEOIS B., FINON D., MARTIN J.-M. [2000], *Energie et changement technologique*, Economica.

BREMONT M., LOISEAU H. [1986], « Evolution des marchés et des méthodes de développement des aérogénérateurs », *Revue de l'Energie*, n°385, pp. 769-776.

BULLETIN SCARABEE [2004], « Recherche : une troisième génération de cellules », *Bulletin du réseau SCARABEE*, n°13, Fondation Energies pour le Monde.

CALLON M. [1993], *Recherche et innovation en France*, Rapport, Commissariat Général du Plan.

CARLSSON B. [1997], « On and off the beaten path : the evolution of four technological systems in Sweden », *International Journal of Industrial Organization*, n°15, pp. 775-799.

CARLSSON B., STANKIEWICZ R. [1991], « On the nature, function and composition of technological systems », *Journal of Evolutionary Economics*, n°1, pp. 93-118.

CEA [2001], « Les modules solaires photovoltaïques : du silicium cristallin aux couches minces », *CLEFS CEA*, n°44, Commissariat à l'Energie Atomique, pp. 29-34.

CEA [2004], « L'énergie solaire un important potentiel à concrétiser », *CLEFS CEA*, Commissariat à l'Energie Atomique, n°49, pp. 101-105.

CE [1996], *Directive 1996/92/CE relative aux règles communes pour le marché intérieur de l'électricité*, Journal Officiel des Communautés européennes n°L027-33 du 30/01/1997.

CE [1997], *Energie pour l'avenir : les sources d'énergies renouvelables – Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires*, COM(97) 599, Commission européenne.

CE [2001], *Directive 2001/77/CE relative à la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité*, Journal Officiel des Communautés européennes n°L283-33 du 27/10/2001.

CHABOT B. [2000], *« Allemagne : des mesures sans précédent »*, Systèmes Solaires, *n°139, pp. 7-15*.

CHABOT B. [2001], « La nouvelle tarification de l'énergie éolienne : genèse, description et première analyse », *Revue de l'Energie*, n°528, pp. 390-396.

CLAVERIE A. [2001], « Electricité solaire photovoltaïque, Etat de l'art », *Edition 2001-03*, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), document communiqué par l'auteur.

CLSA [2004], *Solar power sector outlook*, CLSA Asia-Pacific markets.

COHEN W., LEVINTHAL D. [1989], « Innovation and learning : the two faces of R&D », *The Economic Journal*, Vol. 99, n°397, pp. 569-596.

COWAN R. [1990], « Nuclear power reactors : a study in technological lock-in », *Journal of Economic History*, Vol.50, n°3, pp. 541-568.

COWAN R. [1991], « Rendements croissants d'adoption et politiques technologiques », in DE BANDT J., FORAY D., *L'évaluation économique de la recherche et du changement technique*, Editions du CNRS, pp. 381-398.

COWAN R., HULTEN S. [1996], « Escaping lock-in : the case of the electric vehicle », *Technological Forecasting and Social Change*, n°53, pp. 61-79.

DAHMEN E. [1988], « 'Developing blocks' in industrial economics », *Scandinavian Economic History Review*, n°1, pp. 3-14.

DAVID P. [1987], « Some new standards for the economics of standardization in the information age », *in* DASGUPTA P., STONEMAN P. (Eds.), *Economic policy and Technological Performance*, Cambridge University Press, pp. 206-239.

DAVID P., FORAY D. [1994], « Dépendance du sentier et économie de l'innovation : un rapide tour d'horizon », *Revue d'Economie Industrielle*, numéro Hors Série *Economie industrielle : développements récents*, pp. 27-52.

DEA [2003], *Renewable energy - Danish solutions*, report, Danish Energy Authority.

DOSI G., FREEMAN C., NELSON R., SILVERBERG G., SOETE L. [1988], *Technical Change and Economic Theory*, Pinter Publishers.

DWIA [2004], *Annual report*, Danish Wind Energy Association.

DWIA [2003], *Annual report*, Danish Wind Energy Association.

DWIA [2002], *Annual report*, Danish Wind Energy Association.

DWIA [2001], *Annual report*, Danish Wind Energy Association.

EC [2003], *PV Status Report 2003*, DG JRC, Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit, European Commission.

EC [2004], *A vision for photovoltaic technology for 2030 and beyond, Preliminary report*, Photovoltaic technology research advisory council (PV-TRAC), European Commission.

EDQUIST C., JOHNSON B. [1997], « Institutions and organisations in systems of innovation », *in* EDQUIST C. (Ed.), *Systems of innovation : technologies, institutions and organizations*, Pinter, London, pp. 41-63.

EDQUIST C. [2001], « The system of innovation approach and innovation policy : an account of the state of the art », *Communication*, DRUID Conference "National systems of innovation, Institutions and public policies", Aalborg, Danemark, June 12-15.

EPIA [1995], *Photovoltaic in 2010*, European Photovoltaic Industry Association, European Commission, Directorate General for Energy, Brussels.

EPIA [2004], *EPIA Roadmap*, European Photovoltaic Industry Association.

ERGE T., HOFFMAN V.U., KIEFER K. [2001], « The german experience with grid-connected PV-systems », *Solar Energy*, Vol.70, n°6, pp. 479-487.

EWEA [2003], *Wind energy : the facts – Analysis of wind energy in the EU 25*, European Wind Energy Association, Brussels.

EXTERNE [1995], *ExternE : externalities of energies*, ExternE program, published by European Commission, DG XII, Science research and development, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. http://externe.jrc.es

EXTERNE [1998], *ExternE : externalities of energies*, ExternE program, published by European Commission, DG XII, Science research and development, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. http://externe.jrc.es

FINON D. [2001], « L'intégration des marchés électriques européens : de la juxtaposition de marchés nationaux à l'établissement d'un marché régional», *Economie et Sociétés*, Série « Economie de l'énergie », n°8, pp. 55-87.

FINON D., PEREZ Y. [2004], « The transactional efficiency and the public promotion of the renewable energies in the electric industry: the choice between structures of hybrid governance », *Working Paper*, n°2004-20, Groupe Réseau Jean Monnet, ADIS, Université Paris Sud.

FORAY D. [1989], « Les modèles de compétition technologique. Une revue de littérature. », *Revue d'Economie Industrielle*, n°48, pp. 16-34.

FREEMAN C. [1987], *Technology policy and economic performance : lessons from Japan*, London Pinter.

FREEMAN C. [1988], « Japan a new national system of innovation ? », *in* DOSI G. *et al.* (Eds), *Technical Change and Economics Theory*, London Pinter, pp. 330-348.

FREEMAN C. [1995], « The 'national system of innovation' in historical perspective », *Cambridge Journal of economics*, Vol.19, n°1, pp. 5-24.

FTHENAKIS V. [2000], « End-of-life management and recycling of PV modules », *Energy Policy*, n°28, pp. 1051-1058.

GARROUSTE P., KIRAT T. [1995], « Des systèmes nationaux d'innovation aux formes institutionnelles de la politiques technologique», *in* BASLE M. *et al.*, *Changement institutionnel et changement technologique*, CNRS Editions, pp. 215-235.

GEELS F. [2002], « Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes : a multi-level perspective and a case study », *Research Policy*, n°81, pp. 1257-1274.

GIPE P. [1991], « Wind energy comes of age. California and Denmark. », *Energy Policy*, Vol.19, n°8, pp. 756-767.

GIPE P. [1995], *Wind energy comes of age*, John Willey & Sons.

GORT M., KLEPPER S. [1982], « Time paths in the diffusion of product innovations », *The Eonomic Journal*, n°92, pp. 630-653.

GREEN M. [2000], « Photovoltaics : technology overview », *Energy Policy*, n°28, pp. 989-998.

HARMON C. [2000], « Experience curves of photovoltaic technology », *Interim report*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

HAAS R. [2004], « Progress in markets for grid-connected PV systems in the built environment », *Progress in photovoltaics : research and applications*, n°12, pp. 427-440.

HEYMANN M. [1995], « Signs of hubris. The shaping of wind technology style in Germany, Denmark and the Unisted-Sates, 1940-1990 », *Technology and Culture*, n°36, pp. 641-670.

IEA [1997], *Photovoltaic annual report*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [1999a], *Photovoltaic annual report*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [1999b], *Wind energy annual report 1998*, International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

IEA [2000a], Experience curves for energy technology policy, *International Energy Agency, Paris.*

IEA [2000b], *Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 1999*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [2000c], *Wind energy annual report 1999*, International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

IEA [2001a], *Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2000*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [2001b], *Wind energy annual report 2000*, International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

IEA [2002a], *Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2001*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [2002b], *Wind energy annual report 2001*, International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

IEA [2003a], *National survey report of PV power applications in Germany*, Photovoltaic Power Systems Programme, Task 1 'Exchange and dissemination of information on PV power systems', International Energy Agency.

IEA [2003b], *Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2002*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [2003c], *National survey report of PV power applications in Japan*, Photovoltaic Power Systems Programme, Task 1 'Exchange and dissemination of information on PV power systems', International Energy Agency.

IEA [2003d], *Wind energy annual report 2002* International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

IEA [2004a], *Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2003*, Photovoltaic Power Systems Programme, International Energy Agency.

IEA [2004b], *IEA wind energy annual report 2003*, International Energy Agency, Executive Committee for the implementing agreement for cooperation in the research and development of wind turbines systems.

ISLAS J. [1997], « Getting round the lock-in in electricity generating systems : the example of the gas turbine », *Research Policy*, n°26, pp. 49-66.

JACOBSSON S., JOHNSON A. [2000], *« The diffusion of renewable energy technology : an analytical framework and key issues for research »*, Energy Policy *n°28, pp. 625-640.*

JACOBSSON S., ANDERSSON B.-A., BANGENS L., [2002], *« Transforming the energy system – the evolution of the German technological system for solar cells »*, Electronic Working Paper Series, *n°84, SPRU, University of Sussex.*

JACOBSSON S., BERGEK A., [2004], *« Transforming the energy system : the evolution of technological systems in renewable energy technology »*, Industrial and Corporate Change, *n°13, pp. 815-849.*

JAGER-WALDAU A. [2004], « Status of thin film solar cells in research, production and the market », *Solar Energy*, n°77, pp. 667-678.

JENSEN S.G., LEMMING J., MORTHORST P.E., OLSEN O.J., SKYTTE K. [2002], « Experience curves, renewable energy technologies and energy policy in Denmark », *Communication*, International Association Energy Economics (IAEE) Conference, Aberdeen.

JESTER T. [2002], « Crystalline silicon manufacturing progress », *Progress in photovoltaics : research and applications*, n°10, pp. 99-106.

JOHANSON T., KELLY H., REDDY A., WILLIAMS R. [1993], *Renewable Energy. Sources for fuels and electricity*, Island Press.

JOHNSON B., LUNDVALL B.Ä. [1992], « Closing the institutionnal gap ? », *Revue d'Economie Industrielle*, n°59, pp. 11-123.

JOHNSON A. [2001], « Function in innovation system approaches », *Communication*, NELSON and WINTER Conference, DRUID, Aalborg; 12-15 june.

JOHNSON A., JACOBSSON S. [2003], « The emergence of a growth industry – the case of the wind turbine industry in Sweden, Germany and the Netherlands », *in* METCALFE S., CANTNER U., *Transformation and development: schumpeterian perspectives*, Physica/Springer, Heidelberg.

JOSKOW P., ROSE N. [1985], « The effect of technological change, experience, and environmental regulation on the construction cost of coal-burning generating units », *Rand Journal of Economics*, Vol.16, n° 1, pp. 3-27.

JOURDE P. [2001], « Le photovoltaïque: les filières, les marches, les perspectives », *Communication*, Ecole d'été de physique 'L'énergie sous toutes ces formes : données, contraintes, enjeux', 27-31 Août, Caen.

KAMP L., SMITS R., ANDRIESSE C. [2004], « Notions on learning applied to wind turbine development in the Netherlands and Denmark », *Energy Policy*, n°32, pp. 1625-1637.

KARNOE P. [1993], « Approaches to innovation in modern wind energy technology : technology policies, science, engineers and craft traditions », *Policy Paper*, n°334, Centre for Economic Policy Research, Stanford University.

KAZMERSKI L. [1997], « Photovoltaics : a review of cells and modules technologies », *Renewable and Sustainable Energy Review*, n°1, pp. 71-170.

KEMP R., SCHOT J., HOOGMA R. [1998], « Regime shifts to sustainability through processes of niche formation : the approach of strategic niche management », *Technology Analysis and Strategic Management*, Vol. 10, n°2, pp. 175-195.

KLEPPER S. [1996], « Entry, exit, growth and innovation over the product life cycle », *American Economic Review*, Vol. 86, n°3, pp. 562-583.

KROHN S. [2000], « The wind turbine market in Denmark », *Danish Wind Industry Association*, Publié sur le site www.windpower.org.

KROHN S. [2002a], « Danish wind turbines : an industrial success story », *Article Danish Wind Industry Association*, www.windpower.org.

KROHN S. [2002b], « Wind energy policy in Denmark : 25 years of success – What now ? », *Danish Wind Industry Association*, Publié sur le site www.windpower.org.

KROHN S. [2002c], « Wind energy policy in Denmark – Status 2002 », *Danish Wind Industry Association*, Publié sur le site www.windpower.org.

LUNDVALL B.-A. [1988], « Innovation as an interactive process : from user-producer interaction to the national system of innovation », *in* DOSI *et al.*, *Technical Change and Economic Theory*, pp. 349-369.

LUNDVALL B.-A. [1992], *National Systems of Innovation*, Pinter Publishers.

MC DONALD A., SCHRATTENHOLZER L. [2001], « Learning rates for energy technologies », *Energy Policy*, n°29, pp. 255-261.

MARGOLIS R. [2002], « Experience curves and photovoltaic technology policy », *Communication*, Human Dimensions of Global Change Seminar, Carnegie Mellon University, October 16.

MAYCOCK P. [2004], « Photovoltaic market update», *Renewable Energy World*, Vol. 7, n°4.

MENANTEAU P. [1999], « L'énergie éolienne : réussite d'une dynamique d'innovations incrémentales », *Revue de l'Energie*, n°504, pp. 101-104.

MENANTEAU P. [2000a], « Learning from variety and competition between technological options for generating photovoltaics electricity », *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.63, n°1, pp. 63-80.

MENANTEAU P. [2000b], « Processus d'apprentissage et dépendance du sentier dans la constitution des technologies de production d'électricité photovoltaïque », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 99-124.

MENANTEAU P. [2000c], «L'énergie éolienne : la réussite d'une dynamique d'innovations incrémentales », *in* BOURGEOIS B. *et al.*, *Energie et changement technologique*, Economica, pp. 221-247.

MENANTEAU P., FINON D., LAMY M.-L. [2003a], « Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy », *Energy Policy*, Vol. 31, n°8, pp. 799-812.

MENANTEAU P., FINON D., LAMY M.-L. [2003b], « Integrating intermittent energy sources in liberalised electricity markets : from technical costs to economic penalties as a result of market rules », *Communication Poster Session*, 26th IAEE Annual Conference, "New challenges for energy decision makers", Prague, june 4-7.

MEYER N. [2004], « Renewable energy policy in Denmark », *Energy for Sustainable Development*, Vol. VIII, n°1, pp. 25-35.

MIRABEL F., POUDOU J.-C. [2004], « Mechanisms of funding for universal Services Obligations : the electricity case », *Energy Economics*, n°26, pp. 801-823.

MORTHORST P. [2000], « The development of a green certificate market », *Energy Policy*, n°28, pp. 1085-1094.

MULLER J.-C., DESSERRIERES R. [2001], « Conversion photovoltaïque », *Lettre des Clubs CRIN*, n°43.

NREL [2003], *Solar electric power – The US photovoltaic industry roadmap*, National Renewable Energy Laboratory, US Department of energy.

NEIJ L. [1997], *« Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology »*, Energy Policy, *Vol.23, n°13, pp.1099-1107.*

NEIJ L., DANNEMAND P., DURSTEWITZ M., HELBY P., HOPPE-KILPPER M., MORTHORST P.E. [2003], Experience curves a tool for energy policy programmes assessment, *Final report of EXTOOL, IMES/EESS report n°40.*

NELSON R. [1988], « Institutions supporting technical change in the United-States », in DOSI G. *et al.*, *Technical Change and Economic Theory*, London Pinter, pp. 312-329.

NELSON R. [1993], *National innovations systems – A comparative analysis*, Oxford University Press, New York.

NIELSEN K. [2002], *« Translating wind power policies »*, Communication, *International Summer School on the Politics and Economics of Renewable Energy, july 13-27, University of Salzburg, Austria.*

NIOSI J., BELLON B., SAVIOTTI P., CROW M. [1992], *« Les systèmes nationaux d'innovation : à la recherche d'un concept utilisable »*, Revue Française d'Economie, *Vol. 7, n°1, pp. 215-250.*

NORBERG-BOHM V. [2000], *« Creating incentives for environmentally enhancing technological change : lessons from 30 years of U.S. energy technology policy »,* Technological Forecasting and Social Change*, n°65, pp. 125-148.*

NORTH D. [1990], *Institutions, institutional change and economic performance*, Cambridge University Press.

OLIVER M., JACKSON T. [1999], « The market for solar photovoltaics », *Energy Policy*, n°27, pp. 371-385.

PENIN J. [2003], « Endogénéisation des externalités de recherche : le rôle de la capacité d'émission des connaissances », *Revue d'Economie Industrielle*, n°102, pp. 7-28.

PERCEBOIS J. [1991], *« Les aspects macro-économiques de la production d'électricité décentralisée »,* Revue de l'Energie*, n°430.*

PERCEBOIS J. [2004], « La promotion des énergies renouvelables: prix garantis ou marché de certificats verts ? », *Cahier de Recherche*, n°04.10.50, CREDEN, Université Montpellier 1.

PORTER M. [1990], *The competitive advantage of nations*, Free Press, New York.

RABL A. [2001], « The importance of external costs for the competitiveness of renewable energies », *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 15, n°1/2, pp. 49-58.

RABL A., SPADARO J. [2001], « Les coûts externes de l'électricité », *Revue de l'Energie*, n°525, pp. 151-163.

REICHE D., BECHBERGER M. [2004], « Policy differences in the promotion of renewable energies in the UE members states », *Energy Policy*, n°32, pp. 843-849.

RICAUD A. [1997], *Photopiles solaires*, Presses polytechniques et universitaires romandes.

ROSENBERG N. [1982], *Inside the black box*, Cambridge University Press.

SAVIOTTI P. P. [1995], « Renouveau des politiques industrielles : le point de vue des théories évolutionnistes », *Revue d'Economie Industrielle*, n°71, pp. 199-212.

SCHEER H. [2001], *Le solaire et l'économie mondiale*, Broché.

SMITH K. [2000], « Innovation as a systemic phenomenon: rethinking the role of policy », *Enterprise & Innovation Management Studies*, Vol. 1, n°1, pp. 73-102.

STREET P., MILES I. [1996], « Transition to alternative energy supply technologies. The case of wind power », *Energy Policy*, Vol.24, n°5, pp. 413-425.

SYSTEMES SOLAIRES [1999], n°134, Observatoire des Energies Renouvelables.

SYSTEMES SOLAIRES [2000a], « Le baromètre du solaire photovoltaïque », n°136, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2000b], « Le baromètre de l'éolien », n°135, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2001a], « Le baromètre du solaire photovoltaïque », n°142, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2001b], « Le baromètre de l'éolien », n°136, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2002a], « Le baromètre du solaire photovoltaïque », n°149, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2002b], « Le baromètre de l'éolien », n°148, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2003a], « Le baromètre du solaire photovoltaïque », n°154, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2003b], « Le baromètre de l'éolien », n°153, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2004a], « Le baromètre du solaire photovoltaïque », n°160, EurObserv'ER.

SYSTEMES SOLAIRES [2004b], « Le baromètre de l'éolien », n°159, EurObserv'ER.

TRANAES F. [2003], « Danish wind energy cooperatives – Part 1 &2 », *Danish Wind Industry Association*, Publié sur le site www.windpower.org.

TSOUTSOS T., FRANTZESKAKI N., GEKAS V. [2005], « Environmental impacts from the solar energy technologies », *Energy Policy*, n°33, pp. 289-296.

UNDP [2004], *Solar photovoltaics in Africa*, Global Environment Facility, United Nations Development Program.

UNRUH G. [2000], « Understanding carbon lock-in », *Energy Policy*, n°28, pp. 817-830.

UNRUH G. [2002], « Escaping carbon lock-in », *Energy Policy*, n°30, pp. 317-325.

VAN DER ZWAAN B., RABL A. [2004], *« The learning potential of photovoltaics : implications for energy policy »*, Energy Policy, *n°32, pp. 1545-1554.*

VAN EST R. [1999], *Winds of change. A comparative study of the politics of wind energy innovation in California and Denmark*, Academisch Proefschrift.

WATSON J. [2004], *« Selection environments, flexibility and the success of the gas turbine »*, Research Policy, *n°33, pp. 1065-1080.*

WEITZMAN M. [1974], *« Prices* versus *quantities »*, Review of Economic Studies, *Vol. 41, n°4, pp. 477-491.*

WISER R., PICKLE S., GOLDMAN G. [1998], « Renewable energy policy and electricity restructuring : a California case study », *Energy Policy*, Vol. 26, n°6, pp. 465-475.

WRIGHT T. [1936], « Factors affecting the costs of airplanes », *Journal of the Aeronautical Sciences*, n°3, pp. 122-128.

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1. Evolution de l'intensité énergétique (1970-2001, projections 2025) ..... p. 19

Figure 2. Evolution de la part des ressources dans la production d'énergie primaire ..... p. 23

Figure 3. Evolution des dépenses de R&D consacrées à l'énergie dans les pays de l'OCDE (1974-2001) ..... p. 42

CHAPITRE 2

Figure 1. L'internalisation par la taxe et la production optimale p.121

Figure 2. Comparaison de la taxe et de la subvention au niveau de la firme et de la branche ..... p. 123

Figure 3. Comparaison de la taxe et d'un système de permis d'émission en situation d'incertitude ..... p. 130

Figure 4. Les trois étapes du cycle d'innovation ..... p. 136

Figure 5. Comparaison de l'incitation à innover dans le cas d'une norme et d'une taxe ..... p. 136

CHAPITRE 3

Figure 1. Le modèle de la chaîne interconnectée ..... p. 187

Figure 2. Représentation d'une situation de verrouillage technologique…… ….p. 244

Figure 3. Compétition technologique avec intervention publique ..... p. 253
Figure 4. Impact de la date de l'intervention publique sur la survie du produit « vert » ..... p. 258
Figure 5. Le rôle de l'interaction entre les seuils d'intervention publique et le taux d'ajustement des évaluations du risque sur la survie du produit « vert » ..... p. 260

CHAPITRE 4

Figure 1. Evolution du marché mondial du solaire PV par types d'applications ..... p. 273
Figure 2. Evolution du marché mondial du solaire PV par types d'applications ..... p. 274
Figure 3. Puissance solaire PV installée cumulée (pays AIE) ..... p. 276
Figure 4. Projections à moyen et long termes de la puissance solaire PV installée cumulée ..... p. 277
Figure 5. Evolution de la production mondiale de cellules PV par technologie (en %) ..... p. 280
Figure 6. Progression des rendements maxima en laboratoire par technologie PV p. 286
Figure 7. Localisation et production annuelle de cellules PV ..... p. 288
Figure 8. Répartition de la production mondiale de cellules PV en 2003 ..... p. 289
Figure 9. Courbe d'expérience prix/quantités et diffusion du produit ..... p. 292
Figure 10. Evolution du prix moyen et des quantités de modules PV (1976-2003) p. 294
Figure 11. Courbe d'apprentissage (log-log) des modules PV (1976-2003) ..... p. 295
Figure 12. Evolution du prix des systèmes PV raccordés au réseau (gauche) et des composants (hors module PV) (droite) ..... p. 298
Figure 13. Dates d'atteinte du seuil de 1 $/Wc selon trois scénarii de croissance annuelle de la production de modules PV ..... p. 301

Figure 14. Evolution des dépenses publiques de R&D pour le solaire PV (pays AIE) .....p. 303
Figure 15. Evolution des parts relatives des dépenses publiques de R&D, de démonstration et de soutien du marché solaire PV (pays AIE) .....p. 304
Figure 16. Parts de marché des fabricants de cellules PV en 2003 .....p. 312
Figure 17. Evolution de la production et de la capacité de production de cellules PV .....p. 314
Figure 18. Evolution des dépenses de R&D pour le solaire PV et du total des dépenses de R&D en Allemagne .....p. 328
Figure 19. La phase d'expérimentation du système technologique allemand de l'énergie solaire PV (fin des années 1960-1989) .....p. 330
Figure 20. La phase d'élargissement et de croissance du système technologique allemand de l'énergie solaire PV (1989-2003) .....p. 339
Figure 21. Evolution des dépenses de R&D consacrées à l'énergie éolienne .....p. 343
Figure 22. Le sous-système technologique danois des grandes éoliennes (1976-1986) .....p. 349
Figure 23. Le sous-système technologique danois des petites éoliennes (1978-1986) .....p. 354
Figure 24. Evolution de la puissance moyenne des éoliennes installées au Danemark (kW) .....p. 356
Figure 25. Evolution des installations annuelles par nombre d'éoliennes (gauche) et par puissance (droite) en fonction du type de propriétaires .....p. 358
Figure 26. Evolution des installations annuelles par nombre d'éoliennes (gauche) et par puissance (droite) en fonction du type de propriétaires .....p. 360
Figure 27. Evolution de la puissance éolienne cumulée .....p. 364

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

Tableau 1. Part de chaque ressource dans la fourniture d'énergie primaire mondiale en 1973 et en 2000 (% et total en millions de tep) ..... p. 25

Tableau 2. Brevets relatifs aux technologies de l'énergie ..... p. 46

CHAPITRE 2

Tableau 1. Les moyens de protection contre l'imitation..... p. 108

Tableau 2. Déterminants des incitations à innover selon les instruments de politique environnementale..... p. 134

Tableau 3. Classement des instruments selon les gains pour l'innovateur..... p. 138

CHAPITRE 3

Tableau 1. Valeurs des paramètres choisis pour la simulation..... p. 257

Tableau 2. Distributions des probabilités de tirage de chacun des niveaux de risques pour les trois catégories de biens lors de la recherche publique ..... p. 258

CHAPITRE 4

Tableau 1. Rendements de conversion des différentes technologies de cellules PV en 2002 ..... p. 287

Tableau 2. Coûts d'investissement et coûts de production de l'électricité pour un système PV connecté au réseau ..... p. 298

Tableau 3. Production (MWc) et rang des 10 premiers producteurs mondiaux de cellules PV ..... p. 311

Tableau 4. Résultats du programme « 100 000 toits solaires » ..... p. 336

Tableau 5. Subventions à l'investissement pour l'éolien accordées de 1979 à 1989 ..... p. 357

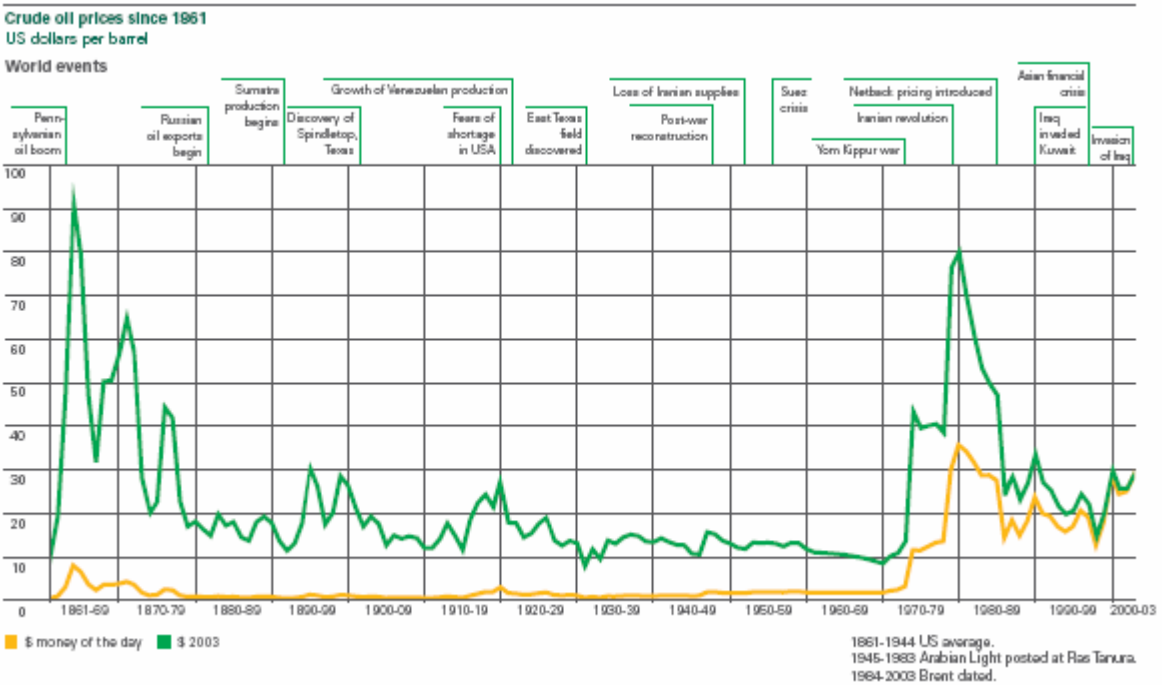
Tableau 6. Parcs éoliens offshore installés au Danemark ..... p. 362

Tableau 7. Les dix premiers constructeurs éoliens mondiaux en 2002 ..... p. 365

ANNEXE 1. EVOLUTION DU PRIX DE BARIL DE PETROLE BRUT DEPUIS 1861

(US $ / BARIL, PRIX COURANTS DEFLATE IPC, BASE $ 2003)

Source : BP [2004]



ANNEXE 2. EVOLUTION DE L'INTENSITE ENERGETIQUE

(TEP/PIB, 1000 $ DE 1999)

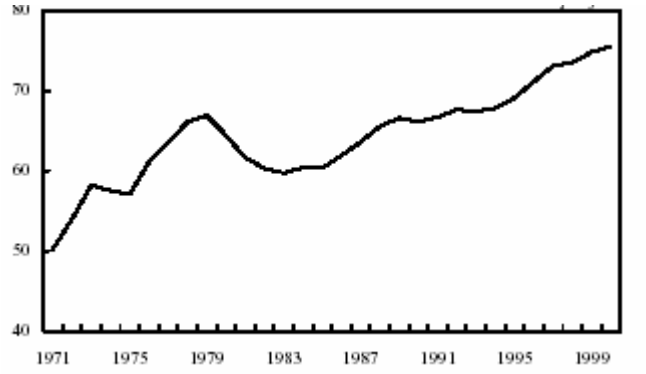
Source : CAE [2001]

	1973	1979	1986	1998
OCDE-Amérique du Nord	0,40	0,37	0,30	0,27
OCDE-Pacifique	0,14	0,13	0,11	0,12
OCDE-Europe	0,24	0,23	0,20	0,17
dont France	0,18	0,17	0,16	0,15
Asie	0,25	0,26	0,24	0,26

ANNEXE 3. EVOLUTION DE LA DEMANDE MONDIALE DE PETROLE

(MILLIONS DE BARILS / JOUR)

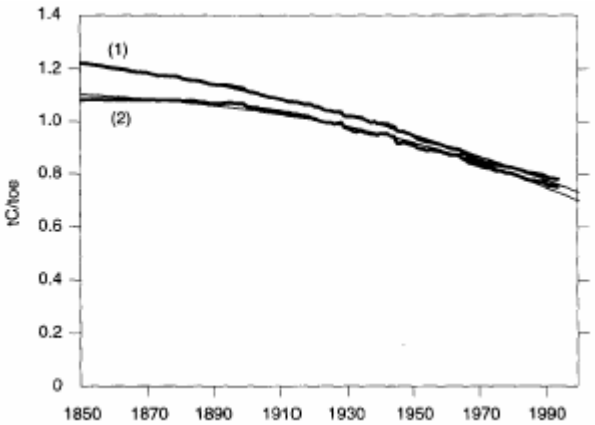
Source : CAE [2001]



ANNEXE 4. INTENSITE DU CARBONE DANS LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE

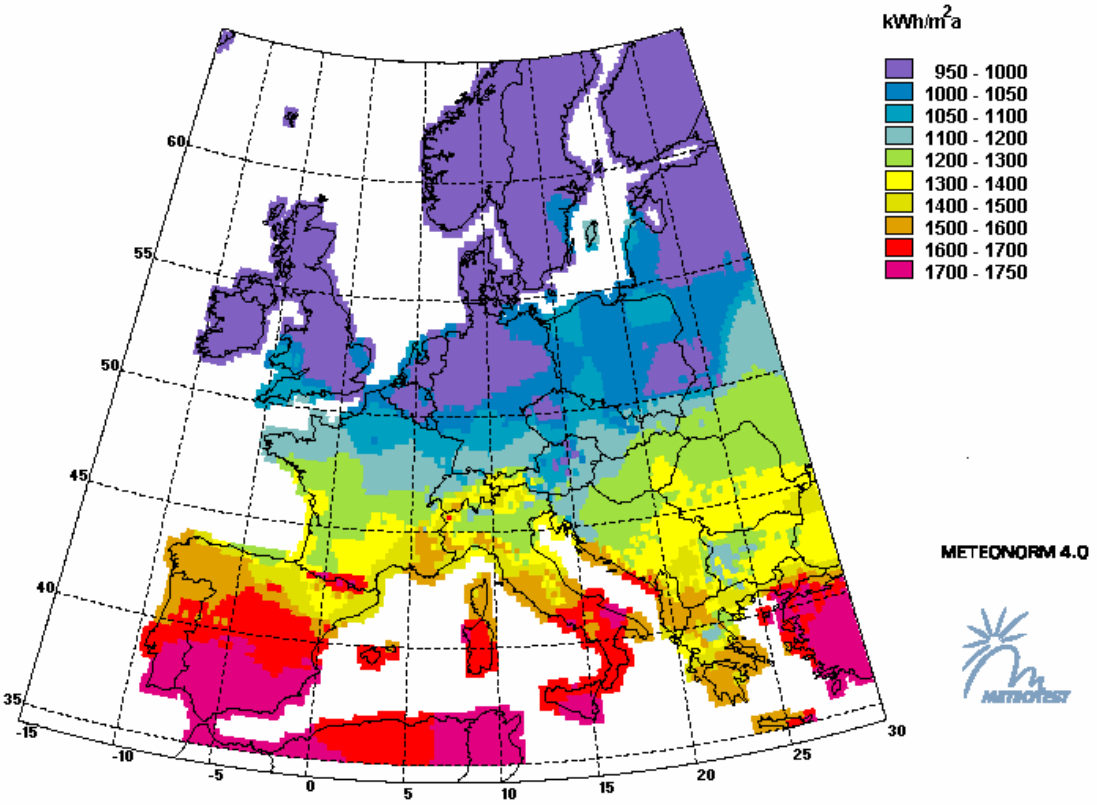
(1) L'INTENSITE « BRUTE » CONSIDERE TOUTES LES FORMES D'ENERGIES (2) L'INTENSITE « NETTE » EXCLUE LA BIOMASSE

Source : GRUBLER, NAKICENOVIC [1996]



ANNEXE 5. ATLAS DU RAYONNEMENT SOLAIRE ANNUEL EN EUROPE

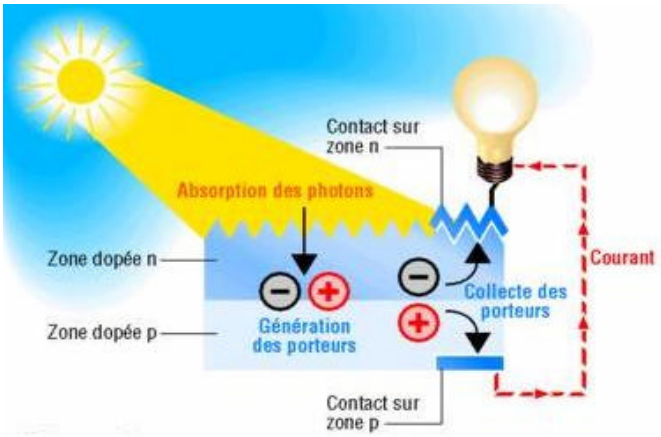
Source : www.energie-atlas.ch/so-1.htm



Entre le nord et le sud de l'Europe le rayonnement solaire n'augmente que d'un facteur variant entre 1,5 à 1,8 fois. Par conséquent, la production d'électricité par des cellules photovoltaïques accroîtra également seulement dans les mêmes proportions environ. C'est au sud de l'Italie, dans la partie centrale et sud de l'Espagne et du Portugal, sur la plupart des îles situées au sud de la latitude 42°, dans les Pyrénées ainsi que dans quelques autres régions isolées que ces installations seront les plus productives.

ANNEXE 6. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AU SILICIUM

Sources : RICAUD [1997], CEA [2004]



On peut résumer le principe PV de la manière suivante (RICAUD [1997], CEA [2004]). Le silicium, utilisé dans la plupart des cellules, est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique. Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un des électrons ne participe pas aux liaisons et peut se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron et le semi-conducteur est dit *« dopé de type n»*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, ce qu'un électron peut venir combler. On dit qu'il y a conduction par un trou, et le semi-conducteur est dit *« dopé de type p »*. Lorsque un semi-conducteur de type *n* est mis en contact avec un semi-conducteur de type *p*, les électrons en excès dans le matériau *n* se diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* devient chargée négativement. Il se crée un champ électrique entre les zones *n* et *p*, qui tend à repousser les électrons dans la zone *n*, et un équilibre s'établit. Une jonction a été créée, et, en ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, on obtient une diode. Quand cette diode est éclairée, les photons sont absorbés par le matériau et chaque photon donne naissance à un électron et à un trou. La jonction de la diode sépare les électrons et les trous, donnant naissance à une différence de potentiel entre les contacts *n* et *p*, et un courant I circule si une résistance est placée entre les contacts de la diode.

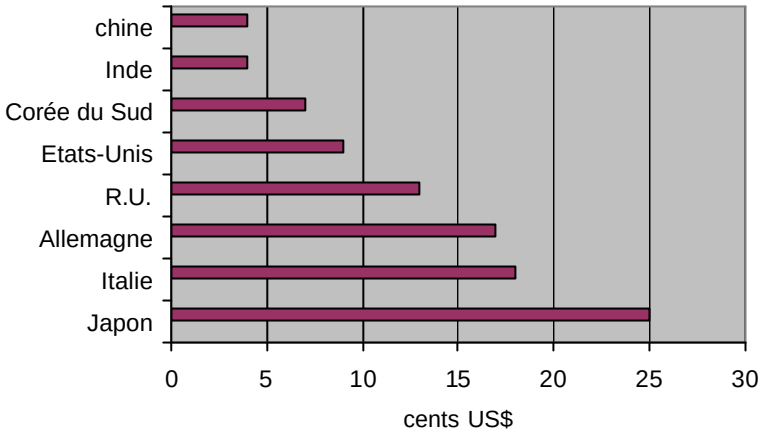
ANNEXE 7. EVOLUTION DE LA PRODUCTION MONDIALE DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

Sources : MARGOLIS [2002], HAAS [2004], MAYCOCK [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004]

Années	Production annuelle(MW)	Production cumulée (MW)	Prix ($/1996)
1976	0,42	0,4	53,35
1977	0,45	0,9	39,53
1978	0,96	1,8	35,53
1979	1,46	3,3	31,49
1980	3,30	6,6	25,49
1981	5,40	12,0	21,53
1982	8,40	20,4	16,50
1983	21,70	42,1	13,97
1984	25,00	67,1	11,50
1985	22,80	89,9	10,35
1986	26,00	115,9	8,52
1987	29,20	145,1	7,85
1988	33,60	178,7	7,33
1989	40,20	218,9	7,09
1990	46,50	265,4	7,17
1991	55,40	320,8	7,06
1992	57,90	378,7	6,71
1993	60,09	438,8	6,18
1994	69,44	508,2	5,75
1995	77,60	585,8	5,41
1996	88,60	674,4	5,17
1997	125,80	800,2	4,99
1998	154,90	955,1	4,54
1999	201,30	1 156,4	4,40
2000	287,65	1 418,0	4,30
2001	390,54	1 819,0	4,20
2002	561,77	2 377,0	4,00
2003	744,08	3 140,0	3,90

ANNEXE 8. PRIX MOYENS DE L'ELECTRICITE POUR LE SECTEUR RESIDENTIEL (CENTS US$/KWH)

Source : CLSA [2004]



ANNEXE 9. ESTIMATIONS DES COUTS DES DOMMAGES ENVIRONNEMENTAUX DES FILIERES FOSSILES ET RENOUVELABLES POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE (CENTS €/KWH)

Sources : EXTERNE [1998], BIRRAUX et LE DEAUT [2001], RABL et SPADARO [2001]

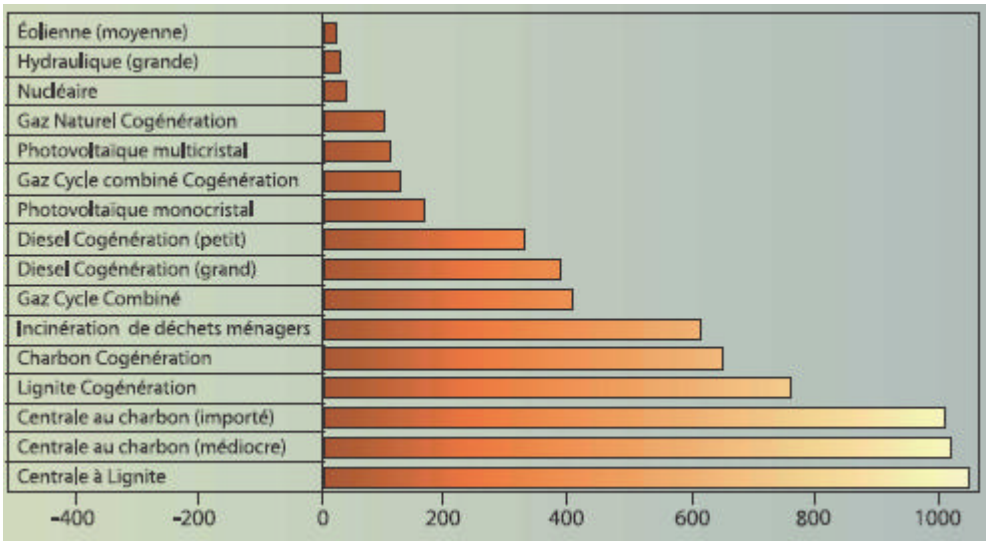
Polluants	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire
Gaz à effet de serre	27,3	18	12,5	0
Particules	2,7	0,3	0	-
SO_2	8,4	8,4	0	-
NO_x	27,6	12,8	9	-
Autres	-	-	-	2,52
Total	**64**	**39,5**	**21,5**	**2,52**

	Production de l'électricité			Etapes amont et aval			Total
	Aménité	Impacts écologiques	Santé	Santé	Effet de serre	Autre	
Hydro	0 – 0,2 var.	0 – 0,4 var.	accident var.	0,001 – 0,1	0,04	var.	0,04 – 0,7 var.
Eolien	0,5 var.	nég.		0,06	0,02		0,13 var.
PV	nég.	nég.		0,12	0,16		0,28
Biomasse			0,54 var.	0,22	0,05	bénéf. var.	0,81 var.

Pays	Charbon	Tourbe	Pétrole	Gaz	Nucléaire	Biomasse	Hydro	PV	Eolien
Autriche				1-3		2-3	0,1		
Belgique	4 -15			1-2	0.5				
Allemagne	3 - 6		5-8	1-2	0,2	3		0,6	0,5
Danemark	4 - 7			2-3		1			0,1
Espagne	5 – 8			1-2		3-5			0,2
Finlande	2 -4	2 – 5				1			
France	7-10		8-11	2-4	0,3	1	1		
Grèce	5-8		3-5	1		0-0,8	1		0,25
Irlande	6-8	3-4							
Italie			3-6	2-3			0,3		
Pays-Bas	3-4			1-2	0,7	0,5			
Norvège				1-2		0,2	0,2		0-0,25
Portugal	4-7			1-2		1-2	0,03		
Suède	2-4					0,3	0-0,7		
R.-U.	4-7		3-5	1-2	0,25	1			0,15

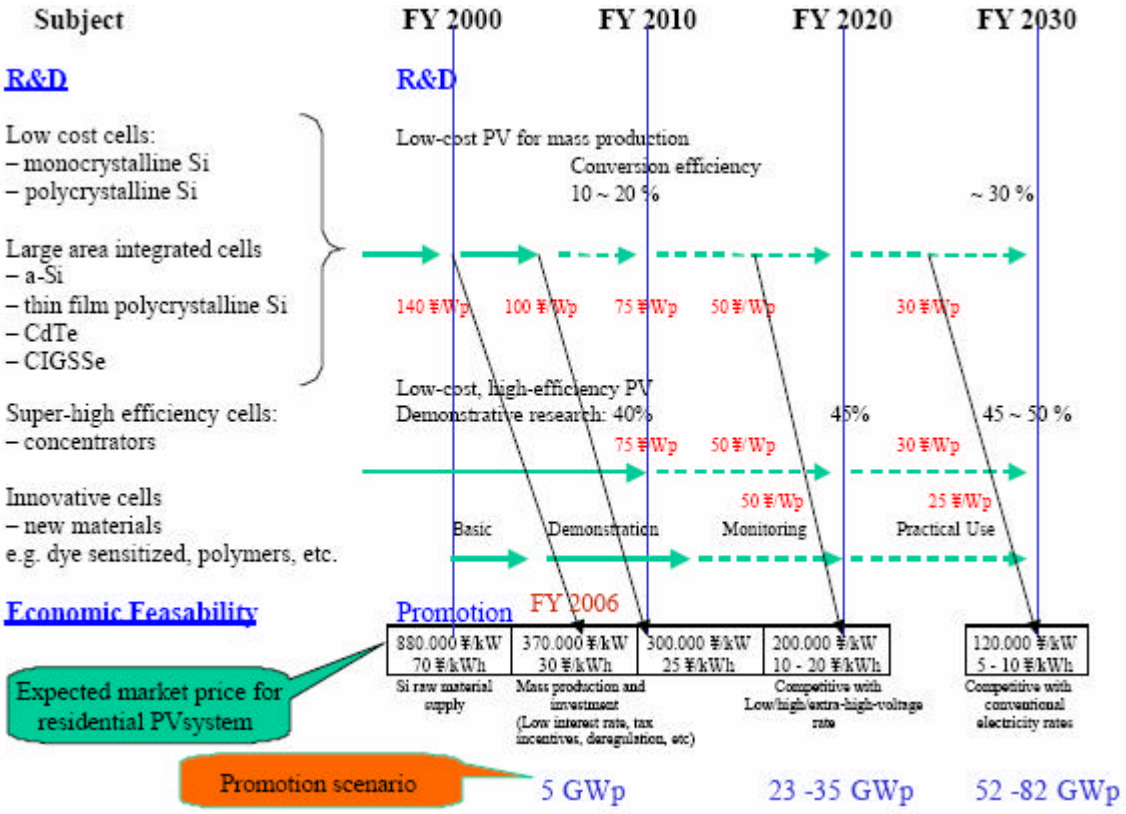
Classement des technologies énergétiques par émissions de CO2 (en g/kWh)

Source : ADEME-CLER [2002]



ANNEXE 10. PROGRAMME DE R&D JAPONAIS POUR LE SOLAIRE PV JUSQU'EN 2030

Sources : EC [2004]



ANNEXE 11. INSTRUMENTS ECONOMIQUES ET REGLEMENTAIRES DE SPUTIEN POUR LE SOLAIRE PV ET L'EOLIEN DANS L'UNION EUROPEENNE DES 25

Sources : IEA [2004], SYSTEMES SOLAIRES [2004], EWEA [2003]

Pays	Instruments	
Autriche	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis sur vingt ans pour le PV (puissance maximale reliée au réseau 15 MWc) pour les systèmes installés en 2003 et 2004 : 60 c€/kWh < 20 kWc ; 47 c€/kWh > 20 kWc
Belgique	**Certificats verts + garantie de rachat**	Tarifs d'achat garantis pour le PV : 15 c€/kWh. Certificats verts gérés par les régions : Wallonie quotas progressifs pour les distributeurs électriques de 3% en 2003 à 12% en 2010 ; Flandres quotas progressifs pour les distributeurs électriques de 3% en 2004 à 6% en 2010 ; Bruxelles : pas de système défini.
Chypre	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV : 12-26 c€/kWh ; Subventions à l'investissement : 55% pour les particuliers, 40% pour les entreprises
Rép. Tchèque	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV : 20 c€/kWh ; Réduction de TVA et subventions (jusqu'à 2 kWc pour les particuliers et 20 kWc pour les entreprises)
Danemark	**Exemptions fiscales + appels d'offres**	Programme « SOL1000 » visant à installer 1000 kWc de toits solaires ; Offre de tarification verte de la compagnie électrique de Copenhague. Eolien : tarif de rachat fixes « transitoires » avant un système de certificats verts : prix du marché + prime de 1,35 c€/kWh, avec un *price cap* de 4,85 c€/kWh entraînant une réduction de la prime. *Offshore* : appels d'offres.
Estonie	**Portefeuille d'ER**	Pas de programme spécifique au solaire PV, Portefeuille de ressources renouvelables (Renewable portfolio standard)
Finlande	**Subvention à l'investissement**	Subvention à l'investissement de 40% ; Développement de compagnies de services énergétiques (ESCO) pour soutenir les investissements sur le solaire PV.
France	**Tarifs d'achat garantis Exemptions fiscales**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV (dégressivité annuelle de 5%) : 15 c€/kWh pendant 20 ans pour les systèmes < 1 MWc en métropole, 30 c€/kWh dans les Dom et en Corse ; TVA à 5,5% pour les investissements dans les bâtiments existants ; crédit d'impôt de 40% pour les particuliers. Tarifs d'achat garantis pour les 1 500 premiers MW d'éolien pendant 15 ans : de 5,4 à 8,4 c€/kWh en fonction de la durée de fonctionnement ; appels d'offres pour les installations > 12 MW (*offshore*).
Allemagne	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV pendant 20 ans (décroissance de 5% à partir de 2005 pour les systèmes installés sur les bâtiments et murs anti-bruit; décroissance de 6,5% pour le non bâti) : 57,4 c€/kWh pour les toits et 62,4 c€/kWh pour les façades < 30 kWc ; 54,6 c€/kWh pour les toits et 59,6 c€/kWh pour les façades entre 30 et 100 kWc ; 54 c€/kWh pour les toits et 59 c€/kWh pour les façades > 100 kWc ; 45,7 c€/kWh pour les installations non intégrées au bâti. Tarifs d'achat garantis pour l'éolien pendant 20 ans : 8,9 c€/kWh pour les 5 premières années et entre 6 et 8,9 c€/kWh pour les années suivantes.
Grèce	**Tarifs d'achat garantis + Subvention à l'investissement**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV : 7,8 c€/kWh pour les îles, 7 c€/kWh sur le continent ; Prêts à taux bonifiés de 40-50% pour les applications commerciales. Tarifs d'achat garantis pour l'éolien pendant 10 ans : entre 70 et 90% du prix au consommateur + subventions à l'investissement jusqu'à 40% selon les sites.
Hongrie	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis non spécifiques : 10 c€/kWh ; subventions pour les projets d'installations d'énergies renouvelables.
Irlande	**Appels d'offres**	Appels d'offres, pas d'objectifs pour le solaire PV, avec *price cap* pour l'éolien.
Italie	**Certificats verts**	Tarif de rachat garanti en cours de définition (2005) pour le solaire PV + subventions à l'investissement. Eolien : quotas obligatoires de 2% croissant annuellement pour les distributeurs d'électricité.

Lettonie	**Tarifs d'achat garantis**	Tarif d'achat garanti : double du prix moyen de l'électricité (14,6 c€/kWh actuellement) pendant huit ans, puis réduction au prix du marché.
Lituanie	**Tarifs d'achat garantis**	Tarif d'achat garanti : 5,6 c€/kWh
Luxembourg	**Tarifs d'achat garantis**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV pendant 20 ans, avec quota (1% de la consommation totale d'énergie) : pour les systèmes < 50 kWc 25 c€/kWh pour les municipalités et 45 c€/kWh pour les investisseurs privés ; Subventions jusqu'à 40% du coût des installations. Tarifs d'achat garantis pour l'éolien pendant 10 ans : 2,5 c€/kWh
Malte	**Exemptions fiscales**	Pas de programme spécifique au solaire PV, mais TVA sur les installations réduite à 5 % au lieu de 15%
Pays-Bas	**Tarifs d'achat garantis + Exemptions fiscales**	Tarification verte ; Exemptions fiscales 2,9 c€/kWh ; Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV et l'éolien : 6,8 c€/kWh
Pologne	**Exemptions fiscales**	Réduction de TVA (7%) pour les systèmes solaire PV complet, mais TVA de 22% pour les modules et les composants ; Prêts à taux bonifiés ; Tarif de rachat fixe en cours d'élaboration.
Portugal	**Tarifs d'achat garantis + Subventions à l'investissement**	Tarifs d'achat garantis pour le solaire PV : 41 c€/kWh pour les installations < 5 kWc, 22,4 c€/kWh pour les installations > 5 kWc ; Subventions à l'investissement et déductions fiscales. Tarifs d'achat garantis pour l'éolien : 4,3 c€/kWh.
Slovaquie	**Exemptions fiscales**	Pas de programme spécifique ; Réduction de l'impôt sur le revenu.
Espagne	**Tarifs d'achat garantis + Exemptions fiscales**	Les producteurs d'ER ont le choix entre un tarif d'achat fixe ou une prime s'ajoutant au prix de marché de l'électricité. Pour le solaire PV : subvention : 19% du coût de l'installation ; Prêt bonifié pour 70% du montant de l'installation ; Tarif de rachat fixe : 39,6 c€/kWh pour les installations < 5 kWc, 21,6 c€/kWh pour les installations > 5 kWc. Eolien (< 50 MW) : prime de 2,9 c€/kWh + exemptions fiscales selon les régions.
Suède	**Certificats verts**	Pas de programme spécifique au solaire PV ; Exemptions fiscales. Certificats verts pour l'éolien : quota progressifs pour les consommateurs de 7,4% en 2003 à 16,9% en 2010. Subventions à l'investissement de 15% et « bonus environnemental » de 1,9 c€/kWh.
Royaume-Uni	**Certificats verts + Subventions à l'investissement**	Pour le solaire PV : subventions l'investissement et réduction de TVA dans le cadre des 3 programmes : Major Demonstration Program, Large Scale Building Integrated Photovoltaic Program et Domestic Field Trial. Pour l'éolien : certificats verts, quotas de 3% en 2003 à 10,4% en 2010.

ANNEXE 12. BREVETS CONCERNANT LES CELLULES PV DEPOSES PAR LES PRINCIPAUX FABRICANTS ENTRE 1990 ET 1998 AUX ETATS-UNIS ET AU JAPON

Source : ANDERSSON et JACOBSSON [2000]

Firmes	Pays	Nbre de brevets déposés	Technologies concernées
Canon	Japon	139	a-Si
Siemens	Allemagne et Etats-Unis	46	c-Si, CIS
Sanyo	Japon	39	a-Si, c-Si
Mitsubishi	Japon	38	c-Si, GaAs
United Solar Technologies	Etats-Unis	31	a-Si
Sharp	Japon	24	a-Si
ASE	Etats-Unis	22	Silicium en rubans
BP Solar	Etats-Unis	19	c-Si
Matsushita	Japon	17	CIS
Fuji	Japon	16	a-Si
Semiconductor Energy Lab.	Japon	16	a-Si
Texas Instruments	Etats-Unis	15	Silicium en sphères
Kanegafuchi	Japon	12	a-Si

ANNEXE 13. EVOLUTION DE LA PUISSANCE SOLAIRE PV INSTALLEE ANNUELLEMENT ET CUMULEE EN ALLEMAGNE

Source : IEA [2003a], IEA [2004]

Années	Installations annuelles (MWc/an)	Puissance cumulée (MWc)
1983	0,30	0,30
1984	0,00	0,30
1985	0,00	0,30
1986	0,00	0,30
1987	0,00	0,30
1988	0,66	1,00
1989	0,00	1,00
1990	0,59	1,50
1991	1,01	2,50
1992	3,10	5,6
1993	3,30	8,9
1994	3,50	12,4
1995	5,40	17,8
1996	10,10	27,9
1997	14,00	41,9
1998	12,00	53,9
1999	15,60	69,5
2000	44,30	113,8
2001	80,90	194,7
2002	82,60	277,3
2003	133,00	410,3

ANNEXE 14. LE CONTROLE DE LA PUISSANCE D'UNE EOLIENNE

Source : Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne, Association danoise de l'énergie éolienne, www.windpower.org

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximalisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes. En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance. Il y a deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance d'une éolienne moderne.

Le contrôle à calage variable de pale

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment. Le mécanisme de calage est normalement opéré par un système hydraulique.

Régulation par décrochage aérodynamique

Sur une éolienne à régulation (passive) par décrochage aérodynamique (appelée aussi une éolienne à pas fixe), les pales sont fixées au moyeu de façon rigide. Cependant, la géométrie de la pale a été conçue de façon à mettre à profit, en cas de vitesses de vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent (voir la page précédente). Ce décrochage empêche la portance d'agir sur le rotor.

Lorsque la vitesse du vent augmente, l'angle d'attaque des pales augmentera également jusqu'à arriver au point de décrochage.

La pale d'une éolienne à pas fixe est légèrement vrillée autour de son axe longitudinal. En concevant la pale ainsi, on assure que le décrochage a lieu graduellement lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur critique.

La régulation par décrochage aérodynamique a avant tout l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor même, ainsi qu'un système de contrôle très complexe.

L'inconvénient est qu'une telle régulation ne pose pas seulement de grands défis à la conception aérodynamique des pales, mais également à la conception de l'éolienne entière afin d'éviter l'apparition de vibrations par le décrochage. Environ deux tiers des éoliennes qui sont installées actuellement dans le monde sont à pas fixe.

Régulation active par décrochage aérodynamique

Un nombre croissant des grandes éoliennes (1 MW et plus) sont conçues avec un mécanisme dit de régulation active par décrochage aérodynamique.

Du point de vue technique, ayant des pales mobiles, ces machines ressemblent à celles contrôlées à calage variable. Afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles, ces éoliennes sont normalement programmées pour pivoter leurs pales de la même façon que les éoliennes à pas variable. (Souvent on utilise seulement un nombre limité de pas fixes, dépendant de la vitesse du vent).

Cependant, lorsque l'éolienne atteint sa puissance nominale, une grande différence par rapport aux éoliennes à pas variable est à noter : si la génératrice est sur le point d'être surchargée, l'éolienne pivotera ses pales dans la direction opposée à celle dans laquelle une éolienne à pas variable l'aurait fait. En d'autres mots, au lieu de le réduire, elle augmentera l'angle d'attaque des pales du rotor pour faire décrocher les pales encore plus, perdant ainsi l'excès d'énergie du vent.

Un des atouts d'un tel système de régulation est qu'il est possible de contrôler la puissance de sortir de façon plus précise que par la régulation passive par décrochage aérodynamique, ce qui permet d'éviter une surévaluation de la puissance nominale de l'éolienne au début d'une rafale. Un autre avantage est le fait que l'éolienne peut fonctionner presque exactement à sa puissance nominale à toutes les vitesses du vent. Une éolienne à pas fixe normale, par contre, enregistre une chute de la production de puissance électrique à des vitesses de vent élevées, au fur et à mesure que les pales décrochent de plus en plus.

Le mécanisme de calage est normalement opéré à l'aide de systèmes hydrauliques ou de moteurs électriques pas à pas.

Tout comme c'est le cas pour les éoliennes contrôlées à calage variable, c'est avant tout une question financière d'évaluer s'il vaut la peine de payer pour la plus grande complexité de l'éolienne qui résulte de l'installation du dispositif de calage des pales.

ANNEXE 15. EVOLUTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE DES EOLIENNES

Source : EWEA [2003]

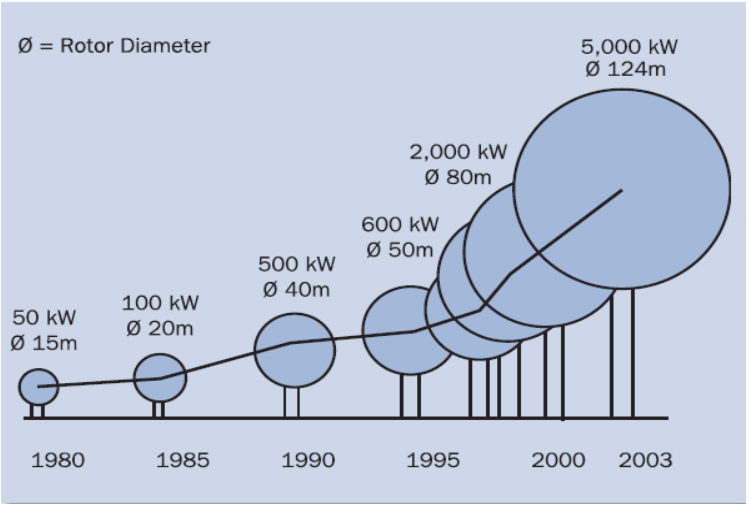


Table des Matières

Introduction Générale p.1

CHAPITRE 1. Les technologies de l'Energie : Aspects Systémiques, Innovations et Enjeux Environnementaux p.6

Section 1. Le système énergétique : évolutions de longues périodes et enjeux technologiques p.9
1.1. Définition du système énergétique et manifestations du changement technique p.9
1.1.1. La définition du système énergétique p.9
1.1.2. Les manifestations du changement technique sur les systèmes énergétiques .. p.14
1.1.2.1. L'accroissement de la variété technologique des systèmes énergétiques p.14
1.1.2.2. L'accroissement de l'efficacité des systèmes énergétiques p.15
1.2. L'intensité énergétique et ses tendances de longue période p.17
1.2.1. Les déterminants temporels de l'intensité énergétique p.18
1.2.2. Les déterminants géographiques de l'intensité énergétique et les choix technologiques p.20
1.3. Les évolutions de longue période du système énergétique dans les pays industrialisés p.22
1.3.1. Les grands régimes énergétiques : repères historiques p.22
1.3.2. Des prémices d'une diversification des technologies de l'énergie à la consolidation de l'industrie pétrolière p.25
1.3.2.1. Un contexte technologique et institutionnel porteur de nouveaux signaux .. p.26
1.3.2.2. Les manifestations de nouvelles orientations technologiques p.29
1.3.2.3. La réactivation technologique et la réorganisation de l'industrie pétrolière p.33
1.3.2.3.1. Les améliorations de l'efficacité énergétique p.34
1.3.2.3.2. Les nouvelles technologies de production de l'électricité p.35
1.3.2.3.3. Le recentrage technologique des compagnies pétrolières sur les activités « amont » p.36

Section 2. Mesure et définitions des innovations énergétiques et environnementales p.40
2.1. La mesure des innovations énergétiques p.40
2.1.1. Les dépenses de R&D dans le secteur énergétique p.40
2.1.2. Le nombre de brevets p.43
2.2. Nature et modalités des innovations technologiques de l'énergie p.47
2.2.1. La dimension technique de l'invention p.47
2.2.2. Les différentes catégories d'innovations p.48
2.2.2.1. Les définitions « conventionnelles » des innovations p.48
2.2.2.2. Les définitions des innovations environnementales p.52

Conclusion du Chapitre 1 ..... p.57

CHAPITRE 2. Théorie Economique Standard et Innovations Technologiques Environnementales p.58

Section 1. Le schéma linéaire de l'innovation : une simplification excessive d'un processus complexe p.61
1.1. Les activités de R&D, relais entre l'invention et l'innovation p.62
1.2. Le modèle linéaire et le débat « technology push » versus « demand pull » p.65
1.2.1. L'innovation poussée par la technologie et les opportunités technologiques .. p.66
1.2.2. L'innovation tirée par la demande p.67

Section 2. La technologie assimilée à de l'information : conséquences en termes d'incitations privées et justification des interventions publiques p.70
2.1. Quelle représentation de la technologie dans le modèle néo-classique ? p.70
2.2. Le modèle fondateur de Arrow [1962a] : la technologie assimilée à de l'information p.72
2.2.1. L'incertitude des activités de R&D p.73
2.2.2. L'indivisibilité des activités de R&D p.76
2.2.3. Les problèmes liés à l'appropriabilité des externalités de R&D p.77
2.2.3.1. Les propriétés de la technologie en tant qu'information codifiée et bien public p.78
2.2.3.2. La R&D induit des externalités technologiques spécifiques p.80
2.2.4. La justification des interventions de l'Etat en matière de R&D p.82
2.3. Les développements à partir de l'analyse d'Arrow : les comportements stratégiques pour innover p.84
2.3.1. La compétition technologique « continue » : les modèles déterministes d'enchères p.85
2.3.2. Les modèles stochastiques de course au brevet p.87

2.3.3. L'innovation et la concurrence sur le marché des produits p.88
2.3.3.1. L'effet de remplacement p.88
2.3.3.2. L'effet d'efficacité p.89
2.3.3.3. La question de la persistance du monopole p.90

Section 3. Des mécanismes de correction des externalités pointés sur les « *market failures* » p.92
3.1. Quelle place pour les politiques d'innovation et industrielle dans la théorie standard ? p.92
3.2. Les politiques de soutien : le dilemme entre les incitations à innover et la diffusion optimale p.96
3.2.1. Les mesures *ex ante* p.97
3.2.1.1. La coopération en R&D permet-elle de surmonter les défauts d'incitation ? p.97
3.2.1.2. L'intervention publique par les crédits d'impôt et les subventions à la R&D p.100
3.2.1.2.1. Les formes des politiques publiques de soutien à l'innovation p.100
3.2.1.2.2. Les difficultés engendrées par les asymétries d'information p.102
3.2.1.2.3. Les dépenses de R&D publiques : complément ou substitut de la R&D privée ? p.104
3.2.2. Les mesures *ex post* : les brevets p.106
3.2.2.1. La réglementation des brevets : le choix du dimensionnement p.109
3.2.2.1.1. La dimension temporelle du brevet p.109
3.2.2.1.2. L'étendue du brevet : la largeur p.111
3.2.2.2. La dimension optimale des brevets p.112

3.2.2.3. Avantages et inconvénients des brevets : dans tous les cas une solution imparfaite p.114

Section 4. Fondements et portée des incitations à innover des instruments de politique environnementale p.117
4.1. L'internalisation par la voie réglementaire p.117
4.2 L'internalisation via les instruments économiques p.120
4.2.1.La taxe pigouvienne p.120
4.2.2. Comparaison de la taxe et de la subvention p.123
4.2.3. Les systèmes de permis d'émission négociables p.124
4.2.3.1. Le « théorème » de COASE p.125
4.2.3.2. La création d'un système de permis d'émissions négociables (PEN) p.127
4.2.4. Approche par les prix *versus* approche par les quantités : le rôle de l'incertitude p.129
4.2.5. Les instruments de politique environnementale : quel impact sur l'innovation technologique ? p.131
4.2.5.1. L'impact des instruments de politique environnementale sur l'invention p.131
4.2.5.2. L'impact des instruments de politique environnementale sur l'adoption et la diffusion des innovations p.135
4.2.5.3. Extensions et commentaires p.139

Conclusion du Chapitre 2 ..... p.142

CHAPITRE 3. Analyse économique évolutionniste et innovations technologiques environnementales p.144

Section 1. Les fondements de l'analyse évolutionniste de l'innovation et ses hypothèses p.147
1.1. La critique des « fondations de l'orthodoxie contemporaine » p.147
1.1.1. L'appréhension des problèmes économiques p.148
1.1.2. L'absence d'un équilibre unique p.148
1.1.3. L'hypothèse de la non maximisation du profit p.149
1.1.4. La remise en question méthodologique de la fonction de production p.151
1.2. Les inspirations positives p.152
1.2.1. L'inspiration schumpétérienne du courant évolutionniste : filiation et démarcations p.152
1.2.1.1. Le changement économique p.153
1.2.1.2. L'innovation p.153
1.2.1.3. Les comportements des agents p.155
1.2.1.4. L'hypothèse schumpétérienne p.156
1.2.1.5. Une inspiration réductrice p.156
1.2.2. L'inspiration des modèles biologiques p.157
1.2.2.1. Le modèle de sélection d'ALCHIAN [1950] p.157
1.2.2.2. Le débat théorique sur le processus de la sélection naturelle p.159
1.2.2.3. La référence biologique chez NELSON et WINTER [1982] p.162
1.2.2.4. Les critiques liées à l'utilisation des métaphores biologiques p.163
1.3. Les principes de l'approche évolutionniste p.166
1.3.1. Une approche principalement micro-économique p.166
1.3.1.1. Les firmes au centre de l'analyse évolutionniste p.166
1.3.1.2. L'hétérogénéité des comportements des agents p.167

1.3.2. Des agents économiques dotés d'une rationalité limitée p.168
1.3.3. Le rôle des routines.....p.170
1.3.3.1. Les compétences individuelles des agents p.171
1.3.3.2. Les routines organisationnelles p.172
1.3.3.3. L'évolution des routines, l'innovation et l'apprentissage p.173
1.4. Le modèle schumpétérien de compétition technologique de NELSON et WINTER [1982].....p.175
1.4.1. Les hypothèses du modèle p.176
1.4.2. Les séquences des niveaux de productivité, d'investissement et d'évolution de l'industrie p.177
1.4.3. Les simulations p.179
1.4.3.1. L'évolution des structures de marché p.180
1.4.3.2. La sélection des comportements d'innovation.....p.181
1.4.4. Commentaires p.181

Section 2. La conception évolutionniste de l'innovation.....p.184
2.1. Quel changement de modèle d'innovation ?.....p.184
2.2. Le modèle interactif de l'innovation de KLINE et ROSENBERG [1986] : la conception au centre du processus d'innovation.....p.185
2.2.1. La reconnaissance des activités de conception.....p.186
2.2.2. Le modèle de la chaîne interconnectée de KLINE et ROSENBERG [1986] p.187
2.2.3. Commentaires et développements : de la R&D à la R, D&E p.189
2.3. Les faits stylisés de l'innovation technologique dans l'optique évolutionniste..p.190
2.3.1. L'innovation : une activité de résolution de problèmes p.191
2.3.2. Le caractère local et cumulatif du processus d'innovation.....p.193
2.4. Une nouvelle approche des externalités de connaissances et ses implications...p.195
2.4.1. Le rôle dual de la R&D interne : la capacité d'innovation et la capacité d'absorption p.195
2.4.1.1. La complémentarité entre la R&D interne et la R&D externe p.196
2.4.1.2. Le modèle de COHEN et LEVINTHAL [1989] : la capacité d'absorption.....p.197
2.4.1.3. Commentaires p.199
2.4.2. La capacité d'émission des connaissances.....p.201
2.4.2.1. Les vecteurs d'émission universelle des connaissances p.202
2.4.2.2. Les incitations à diffuser universellement les connaissances p.203
2.5. Les régularités du changement technique p.206
2.5.1. L'innovation inscrite dans des paradigmes et des trajectoires technologiques p.206
2.5.1.1. Les paradigmes technologiques p.207
2.5.1.2. Les trajectoires technologiques p.209
2.5.1.3. Le rôle de l'incertitude dans le potentiel technologique p.210
2.5.2. La typologie des trajectoires technologiques de PAVITT [1984].....p.210
2.5.3. La typologie des industries à partir des « régimes technologiques ».....p.213
2.5.3.1. Les industries et les régimes technologiques p.213
2.5.3.2. Les cadres stratégiques.....p.215
2.5.3.3. Les régimes technologiques : le régime « entrepreneurial » versus le régime « routinier ».....p.216
2.5.4. Le cycle de vie d'une industrie et l'émergence d'un *dominant design*.....p.217
Section 3. Une reformulation des politiques technologiques et environnementales dans le cadre évolutionniste p.221
3.1. L'intervention de l'Etat dans l'analyse évolutionniste p.221

3.1.1. Le rôle de l'Etat dans l'analyse évolutionniste : quelles hypothèses et quels principes généraux ?....p.222
3.1.1.1. L'Etat : un ensemble d'organisations en concurrence p.222
3.1.1.2. L'incertitude liée aux interventions publiques....p.224
3.1.1.3. Quelles règles normatives pour diriger l'action de l'Etat ? p.225
3.1.2. Les politiques technologiques et industrielles dans le cadre évolutionniste....p.226
3.1.2.1. Le modèle interactif de l'innovation et la politique technologique p.227
3.1.2.2. Une reconsidération des principes d'intervention des politiques technologiques et industrielles p.228
3.1.2.2.1. Les nouvelles hypothèses sur les externalités de connaissance p.228
3.1.2.2.2. Les conséquences sur les types de difficultés à aborder par les politiques publiques p.229
3.2. L'intervention publique pour sélectionner une technologie environnementale..p.232
3.2.1. Les conditions de développement d'une technologie environnementale dans l'optique évolutionniste....p.232
3.2.1.1. Un rappel des difficultés rencontrées par l'analyse standard pour analyser l'émergence d'innovations environnementales radicales p.233
3.2.1.2. La problématique environnementale dans l'analyse évolutionniste p.234
3.2.1.2.1. L'enjeu : le développement d'un paradigme et de trajectoires technologiques « verts »....p.234
3.2.1.2.2. L'analyse évolutionniste et l'hypothèse de PORTER p.235
3.2.1.2.3. Le rôle de l'environnement de sélection....p.237
3.2.2. Compétition technologique et rôle de l'intervention publique en faveur d'une technologie environnementale p.238
3.2.2.1. Compétition technologique et lock-in sur un standard sous-optimal....p.239
3.2.2.1.1. Le modèle de compétition technologique d'ARTHUR [1988, 1989]....p.239
3.2.2.1.2. Commentaires et critiques....p.246
3.2.2.2. Les difficultés de la politique technologique en présence de RCA p.249
3.2.2.3. Le modèle de LAFFOND et al. [2000] p.251
3.2.2.3.1. L'intervention de l'Etat dans la compétition technologique en situation d'information parfaite p.251
3.2.2.3.2. L'intervention de l'Etat en situation d'information imparfaite....p.255
3.2.2.3. Commentaires sur les décisions publiques en matière de choix technologiques p.261
3.2.2.3.1. Les contraintes pesant sur le choix technologique du décideur public....p.261
3.2.2.3.2. Le maintien et/ou la création de la diversité technologique en situation d'incertitude p.263

Conclusion du Chapitre 3....p.266

CHAPITRE 4. La Dynamique Technologique et Industrielle des Energies Renouvelables : les Exemples du Solaire Photovoltaïque et de l'Eolien....p.268

Section 1. L'évolution technologique de l'énergie solaire photovoltaïque p.270
1.1.La croissance du marché mondial du solaire PV p.270
1.1.1. Quelles applications pour le solaire PV ? p.271
1.1.1.1. Les différents segments du marché du solaire PV p.272
1.1.1.2. Les grandes phases de la diffusion du solaire PV....p.273
1.1.1.3. Les tendances récentes du marché mondial du solaire PV installé....p.274

1.1.1.3.1. Le marché du solaire PV par types d'applications p.274
1.1.1.3.2. La répartition actuelle et les prévisions de puissances PV installées p.276
1.2. La compétition technologique dans le secteur solaire PV p.278
1.2.1. Le principe de l'effet PV p.278
1.2.2. La répartition des technologies PV dans la production de cellules p.279
1.2.3. Le *lock-in* technologique de la filière « silicium cristallin » p.280
1.2.3.1. Les cellules au silicium monocristallin : un procédé long et coûteux p.281
1.2.3.2. Les cellules au silicium multicristallin : la recherche d'une diminution des coûts p.282
1.2.3.3. La technologie concurrente : les cellules PV en couches minces p.283
1.2.4. L'évolution des performances p.285
1.3. La dynamique technologique et industrielle de l'industrie solaire PV p.288
1.3.1. La localisation et l'évolution de la production annuelle de cellules PV p.288
1.3.2. Evolution des apprentissages et de la compétitivité du solaire PV p.289
1.3.2.1. La courbe d'apprentissage : aspects méthodologiques p.290
1.3.2.2. Courbe d'apprentissage du solaire PV : analyse rétrospective p.293
1.3.2.3. Evolution du prix des systèmes et de l'électricité solaire PV p.297
1.3.2.4. Courbe d'apprentissage du solaire PV : analyse prospective p.300
1.3.3. Les politiques publiques et les stratégies de acteurs : vers la variété technologique ? p.301
1.3.3.1. Les politiques publiques de soutien p.301
1.3.3.1.1. Les politiques technologiques p.301
1.3.3.1.2. Les instruments économiques de soutien à l'installation et la production p.305
1.3.3.2. Les positionnements technologiques et stratégiques des firmes du secteur solaire PV p.307
1.3.3.2.1. Le secteur « amont » de l'industrie PV p.307
1.3.3.2.2. Le secteur « aval » de l'industrie PV p.310

Section 2. Les systèmes techonologiques : l'exemple du développement de l'énergie solaire photovoltaïque en Allemagne p.317
2.1. Les systèmes d'innovation p.317
2.2. Les systèmes nationaux d'innovation p.318
2.2.1. Les spécificités nationales en matière d'innovation p.319
2.2.2. Les différentes conceptions des SNI p.320
2.3. Les systèmes technologiques p.323
2.3.1. Les composantes d'un système technologique p.323
2.3.1.1. Les organisations : des acteurs et leurs compétences p.323
2.3.1.2. Les réseaux : les canaux de circulation des connaissances p.324
2.3.1.3. Le rôle des institutions dans le changement technique p.325
2.3.2. Les fonctions d'un système technologique p.326
2.4. Le système technologique allemand de l'énergie solaire PV p.327
2.4.1. La phase d'expérimentation (fin des années 1960-1989) : le rôle crucial de la politique de R,D&D p.328
2.4.2. L'enclenchement d'une dynamique de croissance (1990-2003) p.332
2.4.2.1. Le succès du premier programme de R,D&D et les difficultés des industriels p.332
2.4.2.2. Le programme « 100 000 toits solaires » et la loi EEG de 2000 : l'élargissement du système technologique p.335

Section 3. Le système technologique de l'éolien au Danemark p.342
3.1. Les politiques de R&D pour l'éolien : évolution internationale et au Danemark p.342
3.1.1. L'inefficacité des politiques de « technology push » p.342
3.1.2. La politique de R&D au Danemark p.344
3.2. Le Programme éolien danois : deux sous-systèmes technologiques p.345
3.2.1. Le sous-système technologique des grandes éoliennes (1976-1986) p.346
3.2.1.1. Le développement des grandes éoliennes p.347
3.2.1.2. Les études d'implantation des grandes éoliennes p.348
3.2.1.3. Les études sur l'intégration de l'électricité d'origine éolienne dans le réseau électrique p.349
3.2.2. Le sous-système technologique des petites éoliennes (1978-1986) p.351
3.2.2.1. Le rôle déterminant de la station de test du Laboratoire Risoe p.351
3.2.2.2. Les fabricants de petites éoliennes et l'évolution du marché p.352
3.2.3. La réunion des deux sous-systèmes technologiques p.356
3.3. Les instruments économiques et réglementaires de soutien à l'éolien p.357
3.3.1. Les subventions à l'investissement p.357
3.3.2. Les accords entre le gouvernement danois et les *utilities* p.361
3.3.3. L'efficacité des tarifs d'achat garantis p.363

Conclusion du chapitre 4 ..... p.366

Conclusion générale p.368
Références bibliographiques p.371
Table des figures p.406
Liste des tableaux p.409
Annexe 1. ..... p.411
Annexes 2. 3. 4. ..... p.412
Annexe 5 ..... p.413
Annexe 6. ..... p.414
Annexe 7. ..... p.415
Annexes 8. 9. ..... p.416
Annexe 10. ..... p.418
Annexe 11. ..... p.419
Annexe 12. 13. ..... p.421
Annexe 14. ..... p.422
Annexe 15. ..... p.424
Table des matières p.425