

Clément BONNET

L'innovation dans les technologies de l'énergie bas-
carbone :
analyses théoriques et évaluations empiriques

Thèse présentée et soutenue publiquement le 14 décembre 2016
en vue de l'obtention du doctorat de Sciences économiques
de l'Université Paris Ovest Nanterre La Défense

sous la direction de M./Mme Jean-Marc BAUDRY

Jury :

Rapporteur:	Monsieur Julien PENIN	Professeur des Universités, Université de Strasbourg
Rapporteur:	Monsieur Gaétan DE RASSENFOSSE	Professeur assistant, École polytechnique fédérale de Lausanne
Membre du jury:	Monsieur Pierre-André JOUVET	Professeur des Universités, Université Paris Nanterre
Membre du jury:	Monsieur Pierre MOHNEN	Professeur des Universités, Université de Maastricht

L'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone: analyses théoriques et évaluations empiriques

Résumé long

Auteur : Clément Bonnet

Affiliation : Laboratoire EconomiX- UMR CNRS 7235

Directeur de thèse : Marc Baudry

Date de soutenance : 14 décembre 2016

1. Introduction

L'influence des activités humaines sur le réchauffement climatique

Publié en 1972, le rapport 'The limits To Growth' commandé par le Club de Rome et réalisé par une équipe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology propose une modélisation prospective de l'évolution de cinq tendances : industrialisation accélérée, croissance de population rapide, malnutrition, épuisement des ressources non renouvelables et environnement détérioré. Ses conclusions interpellent la communauté internationale sur les limites écologiques de la croissance économique dans un monde à ressources finies. Quelques années plus tard, le risque du réchauffement climatique est pointé à nouveau par le GIEC (Groupe d'experts Internationaux sur l'Evolution du Climat), un corps international d'environ 2000 chercheurs mandaté par les gouvernements pour synthétiser les études sur le changement climatique ayant fait l'objet d'une évaluation par les pairs. Le premier rapport de synthèse paraît en 1990 et confirme l'influence des activités humaines sur le réchauffement climatique observé, tout en prédisant un réchauffement moyen de la température du globe d'environ 3°C par rapport au niveau préindustriel à horizon 2100; ce dans un scénario où aucune mesure de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ne serait prise. Les conséquences à venir sont désastreuses puisqu'elles impliquent, entre autres, une augmentation du niveau de la mer de 65 cm à horizon 2100, une réduction massive de la biodiversité, une diminution des ressources en eau et en biomasse disponibles et une prolifération des maladies.

En réponse à cette alerte, la communauté internationale se rassemble en 1992 durant le Sommet de la Terre qui réunit 196 Etats. Ce sommet reconnaît la nécessité de prendre des

mesures pour limiter le réchauffement climatique et met en place la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCCC). Cette dernière pose les fondements de la négociation climatique telle qu'elle s'amorce avec la première Conférence des Parties (COP) qui a lieu en 1995 à Berlin. Sans faire état des ratés et des succès de la négociation climatique qui se poursuit depuis plus de vingt ans, nous pouvons affirmer que sa plus grande réussite visible a été de faire prendre aux pays des engagements chiffrés de réduction de leurs émissions de GES. Le 12 décembre 2015 à Paris, les 196 pays signataires de l'UNFCCC prennent l'engagement de réduire leurs émissions de manière à contenir le réchauffement moyen de l'atmosphère entre 1,5°C et 2°C d'ici à 2100, sur la base de leurs contributions nationales à l'effort global de réduction des émissions de GES. En parallèle à la négociation climatique, le niveau des émissions de GES en 2012 augmentera de 42,07% par rapport à son niveau de 1990 et le GIEC, intégrant les données nouvelles et renforçant son expertise, reverra à la hausse ses prévisions sur l'évolution de la température moyenne du globe.

Le défi technologique d'une énergie bas-carbone

L'International Energy Agency estime qu'en 2010, 68% de l'ensemble des émissions de GES d'origine anthropique proviennent de l'utilisation de l'énergie (IEA, 2015). Le reste des émissions se répartit entre les procédés industriels (7%), l'agriculture (11%) et des sources additionnelles d'émissions tels que l'usage de solvant ou les déchets (9%). Une décomposition par secteur permet de souligner le poids de la production d'énergie en elle-même. Le secteur de l'approvisionnement en énergie convertit une part de l'énergie primaire totale disponible sous forme d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon), d'énergie fissile (uranium) ou d'énergie renouvelable (éolien, hydro, géothermie, solaire, bioénergie) en différentes formes secondaires d'énergies (e.g. électricité, essence, gasoil, hydrogène) et d'énergies finales telles que le transport ou la chaleur. En 2010, ce secteur représente 34,6% des émissions de GES d'origine anthropique (IPCC, 2014). Les secteurs dits consommateurs, qui produisent des biens et des services en utilisant de l'énergie finale, se répartissent le reste des émissions : le transport (14%), le bâtiment (6,4%), l'industrie (21%) et l'agriculture et la forêt (24%).

En raison de son poids dans les émissions totales et de la place de plus en plus importante qu'il est appelé à prendre dans l'économie mondiale¹, l'un des chantiers de la lutte contre le réchauffement climatique est la décarbonation du secteur d'approvisionnement en énergie. Plus particulièrement, l'activité de génération d'électricité bas-carbone de ce secteur offre une opportunité de réduction rapide des émissions de GES, en comparaison des secteurs du bâtiment, de l'industrie et du transport (IPCC, 2014). En vue de stabiliser les émissions de GES à des niveaux suffisamment faibles pour limiter le réchauffement climatique à 2 degrés à horizon 2100, le GIEC estime que la part d'électricité bas-carbone dans la quantité totale d'électricité générée doit passer d'environ 30% en 2010 à 80% en 2050.

¹ Les scénarios de projection de la tendance actuelle du Cinquième rapport du GIEC anticipent un doublement, voir un triplement, des émissions directes de CO₂ du secteur de l'approvisionnement en l'énergie en 2050, en comparaison des niveaux d'émissions de 2014 (IPCC, 2014).

Les options technologiques bas-carbone connues du secteur de l’approvisionnement en énergie sont les technologies des énergies renouvelables (TERs), de l’énergie nucléaire, du Captage et du Stockage du Carbone (CCS) et de l’efficacité énergétique dans la transmission et la distribution de l’énergie qui ne visent pas, en soi, à décarboner la production mais à la réduire. Ces options technologiques présentent des degrés de maturité² très différents. Tandis que le nucléaire est une technologie mature qui, après avoir connu une période faste, se heurte désormais à de nouvelles limites en termes de coûts et de sécurité, les technologies du CCS ne présentent que de trop rares exemples opérationnels pour générer l’expérience nécessaire à leurs déploiements à grande échelle (IEA, 2011). Ainsi ce sont les TERs qui font l’objet de la plus grande attention de la part des pouvoirs publics. La Commission Européenne a par exemple choisi d’ajouter aux objectifs de réduction des émissions de GES un objectif de déploiement des TERs. En 2014, l’objectif que se fixe la Commission est que 27% de la consommation brute d’énergie finale en 2030 soit d’origine renouvelable, contre 16% alors. L’analyse économique identifie deux défaillances de marché que les pouvoirs publics peuvent corriger pour encourager l’innovation bas-carbone. Nous les détaillons ci-dessous avant de revenir sur l’histoire particulière des politiques de soutien aux TERs qui les dote d’une certaine inertie dans leurs modalités de conception dont nous esquissons les contours.

L’innovation bas-carbone entravée par une double externalité

L’analyse économique distingue deux défaillances de marché qui entravent l’innovation bas-carbone. C’est l’idée de double externalité (Rennings, 2000 ; Jaffe et al., 2005). D’une part, les activités émettrices de GES génèrent des dommages environnementaux qui ne sont pas pris en compte par les agents économiques. Ces coûts environnementaux sont externalisés dans le sens où ils seront subis par les générations futures, et non par celles d’aujourd’hui. Pour pallier à cette défaillance de marché les pouvoirs publics peuvent intervenir en mettant en place, par exemple, des systèmes de taxe ou des marchés de permis d’émissions visant à faire porter aux agents responsables des décisions de production/consommation polluantes les coûts externalisés. Cette idée suit le principe du pollueur-payeur, qui consiste à corriger le prix des marchandises de l’emploi de ressources naturelles non-tarifées (Godard, 2004). D’autre part, la littérature économique identifie des défaillances de marché sur la création de connaissance qui freinent le phénomène d’innovation. Il en résulte qu’un marché dérégulé induit un sous-investissement dans la création de connaissance par rapport au niveau socialement optimal³. Pour réduire le coût social des défaillances de marché sur la connaissance, les pouvoirs publics peuvent intervenir à différents stades de la chaîne du changement technique en vue de promouvoir sa création et sa diffusion. C’est par exemple le rôle des subventions à la recherche fondamentale, aux projets démonstrateurs et à la diffusion d’une innovation.

² Le développement d’une technologie traverse plusieurs étapes, de la recherche basique à la diffusion en passant par la recherche appliquée, la démonstration, la pré-commercialisation et la commercialisation. Le degré de maturité croît quand la technologie se rapproche de sa diffusion.

³ La situation socialement optimale est celle où le prix de la connaissance est nul, puisqu’égal à son coût de reproduction. Autrement dit, c’est la situation dans laquelle la connaissance est la plus largement diffusée dans la société (Arrow, 1962).

La décarbonation du secteur de l'énergie passe par ces deux types d'intervention. Une politique environnementale ambitieuse permet : (1) de révéler certaines options technologiques déjà existantes dont la rentabilité est entravée par l'absence d'un signal prix rémunérant leurs avantages environnementaux ; (2) de contribuer à réorienter les investissements des agents vers des technologies bas-carbone. En parallèle, les pouvoirs publics peuvent renforcer le deuxième effet via des politiques de soutien à l'innovation.

L'histoire des politiques de soutien à l'innovation dans les TERs : entre volonté d'indépendance énergétique et lutte contre le réchauffement climatique

La double externalité et ses implications en termes de politiques publiques s'appliquent tout particulièrement au problème climatique. Pour autant, ce n'est pas la prise de conscience des enjeux climatiques qui a initié le soutien à l'innovation dans les TERs tel qu'il a été implémenté, mais la volonté d'indépendance énergétique des Etats ; le réchauffement climatique vient par la suite renforcer l'attention qu'accorderont les pouvoirs publics aux TERs.

Le premier choc pétrolier de 1973 agit comme un catalyseur du soutien aux énergies renouvelables. Certains pays ambitionnent alors de créer des industries nationales et pour cela mettent en place dès la fin des années soixante-dix des programmes de R&D destinés aux secteurs des TERs. C'est le cas de l'Allemagne, du Danemark, des USA et des Pays-Bas (Lewis, Wiser, 2007). Ces politiques de soutien s'inscrivent dans une démarche dite supply-push en renforçant les compétences de R&D du secteur. Elles sont très tôt complétées par des politiques de soutien par la demande, dites demand-pull, visant à stimuler le déploiement de la technologie⁴. Par exemple en 1980, la Californie implémente un système de tarif garanti (FIT) pour l'électricité d'origine renouvelable et 16000 turbines éoliennes sont installées durant la décennie pour une puissance cumulée de 1700 MW (Kaldellis, Zafirakis, 2011). Si l'arrivée du président Ronald Reagan freine cette dynamique, d'autres pays continueront sur leurs lancées. L'Allemagne par exemple, qui dès 1974 avait commencé à soutenir la création d'un tissu industriel dans la technologie éolienne, renforce son soutien après deux événements majeurs : l'accident de Tchernobyl qui lui fait prendre le chemin de l'abandon du nucléaire et l'arrêt des subventions publiques à l'utilisation du charbon, déclarées illégales par la Commission Européenne. Plusieurs programmes soutiennent l'industrie allemande des renouvelables comme le programme 100MW/250MW qui amorce la diffusion de la technologie éolienne et offre ainsi un marché aux équipementiers nationaux (deux tiers des éoliennes construites dans le cadre de ce programme sont de conception allemande ; Laird et Stefes ; 2009).

⁴ Le principe des politiques demand-pull est de garantir aux producteurs d'énergies renouvelables un paiement au-dessus du prix de marché pendant une durée prédéfinie en vue d'assurer la rentabilité de leurs investissements.

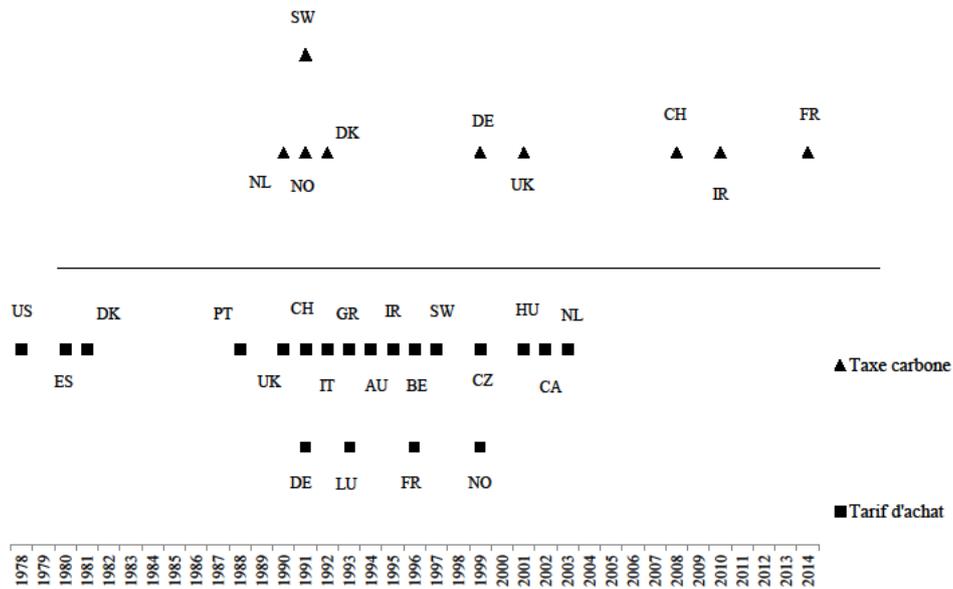


Figure 1: Dates d'introduction des tarifs d'achat à l'électricité renouvelable et des taxes carbone pour 20 pays de l'OCDE. Noms des pays au format ISO 3166-1 Alpha-2.

Les préoccupations environnementales ont amplifié la volonté des Etats de développer les énergies renouvelables. Face aux difficultés de mettre en place une taxe carbone risquant d'entraver la compétitivité des secteurs économiques énergivores (Fischer, 2009), le soutien demand-pull à l'innovation s'est vu de facto attribuer la tâche supplémentaire de réduire les émissions de GES. Comme le montre la Figure 1, l'introduction d'une taxe carbone, quand elle a lieu, se fait généralement après la mise en place des tarifs d'achat⁵. Les rares exceptions étant la Norvège, les Pays-Bas et la Suède. Encore maintenant, la Commission Européenne reconnaît que la faiblesse du prix carbone peut être compensée par un soutien demand-pull plus avantageux aux énergies renouvelables (Guidelines, 2014). Or, ces politiques de soutien sont de plus en plus critiquées pour, d'une part, le coût croissant qu'elles font porter à la collectivité sans pouvoir remplacer efficacement une taxe carbone et, d'autre part, l'ampleur du soutien demand-pull à l'innovation au détriment de celui supply-push puisque ce déséquilibre questionne l'efficacité du soutien à l'innovation (Zachmann et al., 2014 ; Sagar et van der Zwaan, 2006).

Questions de recherche

Dans l'optique d'une transition vers l'introduction d'une taxation du carbone incitative, la question de recherche de cette thèse est d'établir les conditions d'un soutien efficace à l'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone. Pour y répondre l'analyse est divisée en deux parties. La partie empirique propose l'évaluation des politiques de soutien mises en place jusqu'à présent pour en déduire plusieurs implications en termes de politiques publiques. La seconde partie pose les bases théoriques de l'interaction entre les deux types de

⁵ Les informations produites sur la figure proviennent de l'IEA (2004).

défaillances de marché qui entrave l'innovation bas-carbone et détaille ses implications dans le cadre d'une politique de propriété intellectuelle, en l'occurrence de brevet.

2. Structure de la thèse et résumé des chapitres

Cette thèse se compose de quatre chapitres. Les trois derniers chapitres sont des articles de recherche dans lesquels sont développées des analyses pouvant être considérées indépendamment les unes des autres. Le chapitre 1 rappelle le contexte dans lequel s'inscrivent ces trois chapitres et définit plusieurs notions au cœur de l'analyse développée qui constituent le liant des trois derniers chapitres.

Le premier chapitre contextualise les questions de recherches abordées à la fois sur le plan théorique et sur le plan empirique. Le point de départ est l'identification de quatre modèles théoriques qui visent à guider l'intervention publique dans son soutien à l'innovation dans les technologies de l'énergie renouvelable (TERs). Ces modèles diffèrent par leur traitement de la double externalité. Le premier est nommé par Nordhaus le 'price fundamentalism' et plaide en faveur d'un traitement séparé des deux externalités. Ainsi le rôle du prix du carbone est fondamental puisqu'il donne un signal de marché aux dommages environnementaux. En parallèle, une politique de soutien à l'innovation doit être mise en place à destination des nouvelles technologies sans discriminer les technologies bas-carbone des autres types de technologies. Ce modèle repose sur deux hypothèses centrales : (1) l'absence de contraintes imposées aux pouvoirs publics sur la mise en place de la politique environnementale, impliquant la possibilité d'une politique de tarification du carbone de premier rang ; (2) l'inaptitude du régulateur à distinguer les conséquences sociales d'une innovation selon son secteur d'application impliquant qu'il considère les secteurs comme identiques sur le plan de la technologie. Le second modèle, plus pragmatique, relâche la première hypothèse et déduit qu'une internalisation imparfaite des dommages environnementaux doit être compensée par une politique de soutien à l'innovation plus avantageuse aux technologies environnementales. Le troisième modèle, plus optimiste quant aux informations accessibles au régulateur, relâche la seconde hypothèse et explore les possibilités qui s'offrent au régulateur de prendre en compte les particularités sectorielles des TERs via des politiques de soutien à l'innovation qui leurs sont dédiées. Finalement, le quatrième modèle explore une piste de recherche en questionnant l'influence de l'interaction entre le caractère partiellement appropriable de la connaissance et l'internalisation des dommages environnementaux sur les politiques de soutien à l'innovation environnementale. Les deuxième et troisième modèles constituent les bases théoriques des politiques de soutien à l'innovation dans les TERs telles qu'elles ont été mises en place. Leurs principales limites sont donc détaillées. Finalement, une revue des instruments économiques dont dispose le régulateur est proposée et met en exergue la prédominance du soutien par la demande dans les politiques de soutien à l'innovation aux TERs (approche dite demand-pull), aux dépens d'un soutien par l'offre (approche dite supply-push).

Le second chapitre est un article de recherche qui évalue l'effet des instruments de soutien demand-pull sur la diffusion de la technologie éolienne⁶. Pour mener cet exercice d'évaluation, l'analyse est construite en deux temps. Dans un premier temps, les diffusions observées de la technologie éolienne dans six pays européens sont répliquées. A cet effet, un modèle micro-fondé de diffusion est construit pour intégrer: (1) l'influence des politiques demand-pull sur la rentabilité des projets éoliens ; (2) les effets des apprentissages nationaux et européens qui ont contribué à faire décroître le coût de la technologie avec l'expérience accumulée dans sa fabrication; c'est l'hypothèse de learning-by-doing ; (3) des facteurs exogènes ayant joué sur la rentabilité des projets éoliens (e.g. prix des métaux, conditions météorologiques). Dans un second temps, plusieurs scénarios sont simulés en vue de conduire une analyse contrefactuelle. Sont testés les effets des suppressions unilatérales des politiques demand-pull par chacun des six pays de l'échantillon; à savoir l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, la France, l'Italie et le Portugal. Est également testé l'effet sur les diffusions de l'éolien dans ces pays d'une suppression commune de leurs politiques demand-pull. Plusieurs conclusions sont tirées de l'analyse de ces scénarios. Premièrement, les politiques demand-pull ont fortement contribué à accroître la diffusion de l'éolien puisque supprimer le soutien demand-pull dans un pays aurait réduit de 32% à 95% les capacités éoliennes cumulées installées en 2012, selon les pays. Deuxièmement, l'Espagne, l'Allemagne et le Danemark ont bénéficié d'un avantage de first-mover lié à l'antériorité de la diffusion de la technologie éolienne dans leurs parcs électriques. En comparaison des trois autres pays, cet avantage se traduit par une diffusion de la technologie nettement moins dépendante, d'une part, à la politique nationale et, d'autre part, aux politiques étrangères. La diffusion de l'éolien dans ces pays est dite partiellement auto-entretenu. Ces deux constats impliquent que différer la mise en place d'un soutien demand-pull dans l'espérance de profiter de l'apprentissage stimulé par les politiques étrangères s'avère préjudiciable à la diffusion de la technologie éolienne.

Le troisième chapitre est un article de recherche publié en tant que document de travail EconomiX. Son but est de mesurer la connaissance accumulée par sept pays dans quinze technologies de l'énergie bas-carbone entre 1980 et 2010. Pour mesurer la création de connaissance, et non ses tentatives, les données de brevets sont privilégiées aux données de dépenses de R&D. De nombreux travaux démontrent le risque lié à la distribution fortement asymétrique de la qualité des inventions brevetées d'utiliser un simple compte de brevets pour mesurer la connaissance. Pour pallier à ce risque un modèle à facteur latent commun est estimé. Pour chaque invention, il permet d'expliquer simultanément les valeurs prises par les différentes métriques d'un brevet par la qualité de l'invention protégée, celle-ci étant non observée mais estimée comme facteur latent commun. Le choix des métriques se fonde sur une vaste littérature empirique qui démontre les liens entre la qualité d'une invention et les métriques d'un document de brevet. En l'occurrence, celles incluses dans la modélisation proposée sont la largeur du scope technologique d'une invention, le nombre de brevets la protégeant, le nombre de citations faites à d'autres inventions et le nombre de citations reçues. L'estimation d'un indice de qualité est corrigée des effets d'office, de cohorte et de technologie pour autoriser la comparaison de la qualité des inventions considérées. Le stock

⁶ Article actuellement en seconde relecture dans le journal Energy Policy.

de connaissance accumulée dans 15 technologies de l'énergie bas-carbone est calculé en pondérant le compte des inventions par leur indice de qualité. Des effets importants de substitution sont constatés: les technologies de l'énergie nucléaire, géothermique et solaire thermique sont progressivement délaissées et remplacées par de nouvelles technologies aux premiers rangs desquelles celles de l'énergie solaire photovoltaïque, de l'énergie éolienne et du stockage d'énergie. Ces substitutions s'expliquent d'une part par le nombre d'inventions et d'autre part par l'évolution de la qualité moyenne de ces inventions. La qualité moyenne des inventions dans les technologies les plus anciennes stagne dans le temps, voir diminue. Au contraire, de nouvelles technologies disposent d'un stock de connaissance croissant et se bâtissent sur des inventions qui, en moyenne, gagnent en qualité au fil du temps. L'analyse de l'évolution temporelle de la distribution de la qualité des inventions brevetées dans le nucléaire et l'éolien suggère que dans le premier cas, le potentiel pour des inventions de haute qualité s'est épuisé au fil du temps, tandis que l'inverse est observé dans le second cas. Des analyses complémentaires des avantages technologiques des pays étudiés sont finalement proposées.

Le quatrième chapitre est un article publié sous forme de document de travail EconomiX. Il revisite l'arbitrage auquel fait face le régulateur quand il met en place un système de brevet destiné aux technologies environnementales. Ce travail propose une formalisation du quatrième modèle présenté dans le premier chapitre de cette thèse en explorant l'interaction entre l'appropriation de la connaissance et la tarification d'une externalité environnementale. Un système de brevet concède l'appropriation partielle d'une invention par son inventeur en vue de garantir une rente incitative qui stimule les investissements en R&D. L'arbitrage auquel fait face le régulateur est le suivant : d'une part il promeut la création de connaissance pour ses effets positifs sur le bien-être social, d'autre part il garantit à l'inventeur une rente incitative mais socialement coûteuse durant la durée du brevet puisque celui-ci prive temporairement la société d'un usage libre de la connaissance protégée. A cet arbitrage s'ajoute une dimension supplémentaire à l'ensemble de choix du régulateur qui est celle de la tarification des dommages environnementaux. Il est démontré dans un premier temps que la politique optimale de brevet interagit avec la taxation environnementale optimale imposée à l'inventeur. Le premier cas de figure est celui d'une tarification environnementale qui annihile la perte sèche de bien-être social résultant du pouvoir de marché concédé par le système de brevet. Le second cas de figure est celui où la perte sèche demeure, mais peut être réduite via une taxation environnementale plus favorable à l'inventeur que celle de premier rang. Finalement, deux applications sont proposées pour illustrer les deux cas de figure évoqués.

3. Analyse globale des résultats

Pour situer le rôle de l'innovation dans le changement technique il est utile de décomposer ce dernier en trois stades: l'invention (la génération de nouvelles idées), l'innovation (la conversion des inventions en produits ou techniques commercialisable) et la diffusion (la propagation de l'innovation dans la société).

Cette décomposition du changement technique, proposée en 1942 par Schumpeter, implique que chaque étape soit conditionnée par la réalisation de la précédente. Le changement technique amorcé grâce aux technologies de l'énergie bas-carbone ne répond cependant pas nécessairement à cette logique, et ce pour deux raisons :

- Premièrement, le signal de marché informant les agents des bénéfices environnementaux de ces technologies est faible, voire inexistant, ce qui fait d'une partie des inventions des innovations latentes, car en attente d'un signal de marché leur assurant des débouchés commerciaux.
- Deuxièmement, les politiques publiques telles qu'elles ont été mises en place ont pu contribuer à promouvoir la diffusion d'une technologie bas-carbone, sans garantie qu'elle soit fondée sur l'innovation.

De fait, la diffusion des nouvelles technologies de l'énergie bas-carbone offre un indicateur biaisé du changement technique vers un système énergétique décarboné. Il convient donc dans un premier temps de disséquer la diffusion de ces technologies telle qu'elle s'est amorcée, en vue d'isoler le rôle des politiques de soutien demand-pull.

La diffusion de la technologie éolienne

Puisque la production d'électricité d'origine éolienne est désormais considérée comme proche de la parité réseau⁷ (IEA, 2015) et que la diffusion de cette technologie bas-carbone constitue l'une des premières, avec celle du solaire photovoltaïque (PV), à avoir bénéficié d'un important soutien demand-pull, l'étude proposée dans le chapitre 2 peut servir de référence à l'analyse du soutien au déploiement des TERs.

Cette étude s'inscrit dans un contexte particulier de politique de soutien à l'innovation. Ces dernières peuvent être scindées en deux catégories : le soutien à l'innovation demand-pull et le soutien à l'innovation supply-push. Or en Europe, la répartition entre les deux approches est pour le moins inégale, et ce déséquilibre critiqué pour le coût croissant qu'il fait porter à la collectivité (e.g. Nemet, 2009 ; Albrecht et al., 2015 ; Peters et al., 2012). Une quantification de ce déséquilibre est proposée par Zachmann et al. (2014) dont l'étude révèle que dans les cinq plus grands pays Européens, ainsi qu'en République Tchèque, le coût du déploiement de l'éolien et du solaire PV a atteint pour la seule année 2010 la somme de 48 298 millions d'euros, tandis que les dépenses publiques de R&D destinées à ces deux technologies étaient de 315 millions d'euros.

L'impact des instruments demand-pull sur la diffusion de la technologie éolienne est quantifié pour six pays, choisis de manière à isoler deux profils :

- Les pays producteurs & consommateurs d'équipements que sont l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne.
- Les pays consommateurs d'équipements que sont la France, l'Italie et le Portugal.

Le soutien demand-pull à la diffusion de l'éolien dans les pays producteurs & consommateurs a commencé plus tôt, relativement aux pays consommateurs⁸. Il a été accompagné par la création de filières industrielles nationales dans la technologie éolienne ayant bénéficié d'un

⁷ La parité réseau correspond à la situation où le coût moyen de génération de l'électricité d'origine renouvelable est égal au prix de marché de l'électricité.

⁸ Les premières formes de soutien demand-pull à l'éolien sont mises en place en 1980 en Espagne, en 1981 au Danemark, en 1991 en Allemagne puis en 1992 en Italie et en 1996 en France (Johnstone et al., 2010 ; IEA, 2004). Au Portugal c'est en 1988 que le premier soutien à la demande d'énergie renouvelable voit le jour, mais il se limite initialement aux petites installations hydro avant d'être étendu à l'éolien en 1995.

soutien supply-push important de la part des pouvoirs publics, comme l'illustrent les différences de dépenses publiques de RD&D rapportées⁹ dans la Figure 2.

	Allemagne	Danemark	Espagne	Italie	France	Portugal
Dépenses de R&D cumulées (1993-2011)	468,15	247,7	138,5	68,35	33,5	1,6

Figure 2: Dépenses de RD&D dédiées à la technologie éolienne (en millions d'euro constant de 2014)

Dans une première étape, le couplage des approches demand-pull et supply-push aura permis dans un premier temps aux industries nationales d'avoir accès à un marché domestique en pleine expansion assurant les débouchés de la filière¹⁰. Dans un second temps, ces industries bénéficieront des opportunités de marché offertes par leurs voisins européens. En 2008, sept firmes d'origines allemandes, danoises et espagnoles se partageaient 94% de la puissance éolienne installée cumulée en Italie et 93% au Portugal¹¹.

Comment l'existence d'une filière industrielle se traduit-elle dans les dynamiques de diffusion de l'éolien?

Les diffusions de l'éolien dans les pays producteurs & consommateurs se distinguent par un caractère partiellement auto-entretenu. La diffusion est dite partiellement auto-entretenu quand elle résiste de manière significative à la suppression des politiques demand-pull, aussi bien nationales qu'étrangères.

En dépit du surplus de profitabilité induit par les instruments de soutien demand-pull, les simulations menées dans le chapitre 2 indiquent que la suppression unilatérale¹² par un pays producteur & consommateur aurait certes impacté à la baisse la diffusion de l'éolien, mais qu'une partie significative de la diffusion aurait pu avoir lieu en l'absence d'une subvention s'ajoutant au prix de marché; et ce avec pour seule garantie de la part de l'Etat celle d'une priorité d'accès au réseau de l'électricité éolienne. Si l'Allemagne avait supprimé unilatéralement son soutien demand-pull en 2001, la capacité cumulée installée en 2012 aurait été réduite de 32,4%. Pour le Danemark et l'Espagne des ordres de grandeurs similaires sont trouvés puisque la réduction aurait été de respectivement 34,6% et 43,3%. Le soutien demand-pull a donc agi dans ces pays comme un accélérateur de la diffusion.

⁹ La source des données est IEA Energy Technology RD&D, 2015. Le choix des années est conditionné par la disponibilité des données.

¹⁰ Prenant l'année 2000 comme année de référence, on observe que respectivement 58%, 65% et 92% de la puissance éolienne nouvellement installée en Allemagne, au Danemark et en Espagne, sont des turbines produites par des firmes nationales. Celles produites à l'étranger provenaient généralement des deux autres pays. Tous les calculs de parts de marché sont réalisés avec les données disponibles dans les rapports annuels de l'IEA Wind, sauf dans le cas du Danemark où les données sont produites par la base Master data on Register wind turbines. A notre connaissance, les données pour la France ne sont pas disponibles.

¹¹ Ces firmes sont Enercon, REpower, Gamesa, Vestas, Ecotechia, Nordex et Siemens.

¹² La suppression unilatérale par un pays est la suppression de l'instrument demand-pull dans un contexte où les autres pays, au contraire, maintiennent leurs politiques de soutien demand-pull.

Les dynamiques de diffusion au sein des pays consommateurs, au contraire, ne présentent pas ce caractère partiellement auto-entretenu puisqu'elles s'avèrent être presque exclusivement expliquées par l'existence des politiques de soutien demand-pull. Dans ces pays, la diffusion est fortement imputable aux politiques demand-pull puisque sa suppression unilatérale en 2001 aurait réduit la capacité éolienne installée cumulée en 2012 de 95,3% en France, de 71,5% au Portugal et de 84,5% en Italie.

Intuitivement, on pourrait penser que la diffusion observée dans les pays producteurs & consommateurs s'explique par l'apprentissage acquis via les ventes réalisées chez leurs voisins européens. Nos conclusions ne vont pas ce sens puisque la diffusion de la technologie éolienne dans ces pays n'est que partiellement expliquée par les politiques mises en place dans les autres pays. En effet, les suppressions jointes dans les six pays des politiques demand-pull en 2001 auraient respectivement réduit d'environ 41%, 41% et de 54% la capacité cumulée installée en 2012 en Allemagne, au Danemark et en Espagne. Les impacts sur les diffusions sont donc certes plus forts que ceux résultants des suppressions unilatérales, mais il demeure qu'une partie substantielle de la diffusion résiste aux suppressions jointes des politiques demand-pull¹³. Le caractère auto-entretenu de la diffusion s'explique par : (1) l'avantage de first mover que confère l'antériorité du début de la diffusion, par rapport aux pays consommateurs, qui se traduit par une plus forte baisse des coûts en début de diffusion permettant d'amorcer un cercle vertueux d'apprentissage; (2) la sensibilité de la diffusion à l'apprentissage technologique dont profite le pays, relativement plus forte au learning-by-doing national que régional (i.e. européen). En effet, le modèle utilisé intègre une distinction entre les deux échelles d'apprentissage et les dynamiques de diffusion de l'éolien dans les pays producteurs & consommateurs sont d'avantage dictées par l'apprentissage national, relativement à l'apprentissage régional, que ne le sont les pays consommateurs¹⁴.

Les avantages de fonder la diffusion d'une technologie sur un secteur de l'offre performant

Sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que l'existence d'une filière industrielle sur laquelle fonder la politique de soutien demand-pull présente deux avantages. Premièrement, elle permet d'accélérer la diffusion de la technologie soutenue. Deuxièmement, elle permet de garantir son déploiement, au moins partiel, aux conditions de marché avec pour seule forme de soutien la priorité d'accès au réseau de l'électricité d'origine renouvelable. Ce deuxième avantage suggère qu'un prix carbone aurait pu se substituer aux soutiens demand-pull sans pour autant réduire drastiquement la diffusion de l'éolien ; a fortiori si celle-ci est fondée sur l'existence d'une filière industrielle.

Ce constat soulève la question de la répartition des compétences techniques entre les pays et des performances des technologies de l'énergie bas-carbone en termes d'innovation. D'une part, la localisation géographique des compétences techniques produit une information sur laquelle construire une politique de soutien à l'innovation. D'autre part, les pouvoirs publics peuvent ajuster leur soutien selon la performance d'une technologie en termes d'innovation. La méthode développée dans le chapitre 3 de cette thèse répond à cette question.

¹³ En 2001, les six pays analysés représentaient 89,43% de la puissance installée éolienne en Europe (EU-28). Cette part a diminué progressivement pour atteindre 74% de la capacité installée éolienne en 2012 (parts calculées d'après les données de l'EWEA). Ces six pays cumulaient donc la majeure partie de l'apprentissage européen.

¹⁴ Concernant la globalisation de l'apprentissage dans l'éolien et son augmentation avec la maturité de la technologie, voir Langniss et Neij, (2004).

La distribution de la connaissance selon les pays et les technologies

L'accumulation de connaissance technique dans les technologies de l'énergie bas-carbone n'est pas un phénomène récent. Comme en témoigne la Figure 3, le niveau de connaissance produite pendant l'année 1981 par les sept pays et dans les 15 technologies de l'énergie bas-carbone analysées ne sera pas atteint de nouveau avant 2008. La production annuelle de connaissance technique, mesurée par le flux annuel d'inventions pondérées par leur qualité, est représentée par la courbe en trait plein sur la Figure 3. La courbe en pointillés représente l'évolution du prix déflaté du pétrole et souligne ainsi la corrélation avec la connaissance produite dans les technologies de l'énergie bas-carbone. Cette corrélation soutient l'hypothèse de changement technique induit selon laquelle ce dernier est dirigé par les prix relatifs des facteurs de production (Hicks, 1932, pp.124-125).

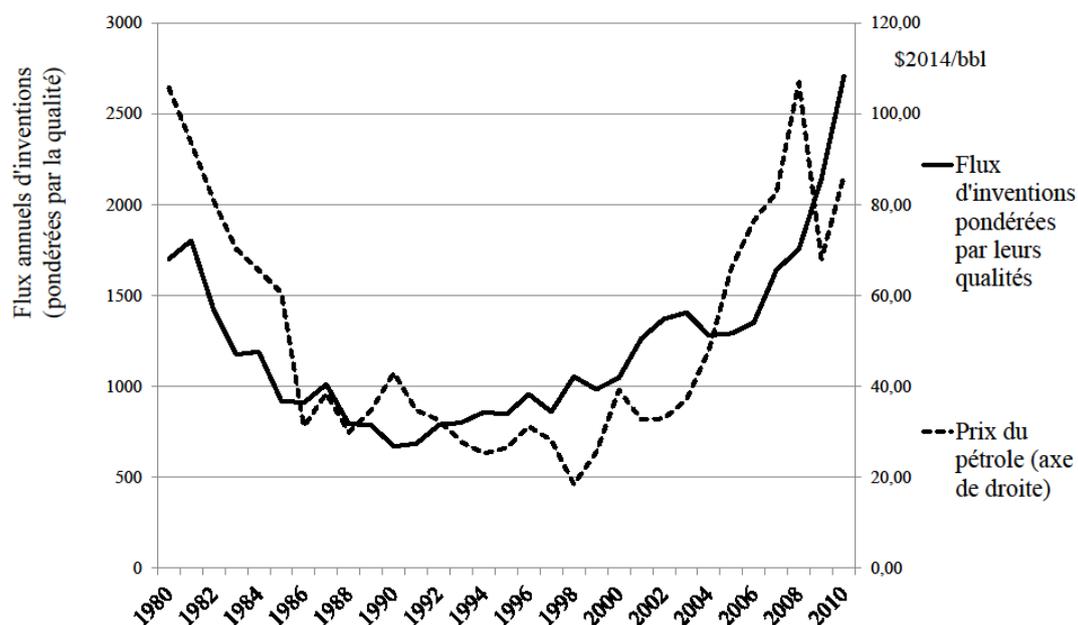


Figure 3: Flux annuels d'inventions pondérées par leur qualité, dans les sept pays et les quinze technologies.

La majeure partie du stock de connaissance accumulée entre 1980 et 2010 dans les technologies de l'énergie bas-carbone est détenue par les USA (50,67%), l'Allemagne (18,42%) et la France (13,67%). La composition des stocks de connaissance de ces pays fait état d'une forte diversification technologique. Il en ressort cependant que les technologies ayant le plus de poids dans leurs stocks de connaissance sont le stockage de l'énergie, le solaire PV, l'éolien et le nucléaire.

Pour compenser leur plus faible niveau de production de connaissance, une stratégie adoptée par certains petits pays a été de se spécialiser dans un nombre plus restreint de technologies. L'exemple le plus évident est celui du Danemark dont le stock de connaissance est constitué à 78% de technologie éolienne. L'Espagne et les Pays-Bas ont également choisi de se spécialiser respectivement dans l'éolien et le solaire thermique (57% du stock de connaissance en 2010), et dans l'éolien, le solaire photovoltaïque et le stockage d'énergie (61% du stock de connaissance en 2010).

Ces chiffres illustrent la production de connaissance mesurée en incluant la totalité des inventions de notre base de données. L'indice de qualité développé permet de resserrer notre analyse sur les inventions de haute qualité, candidates favorites à un succès commercial qui traduit l'accès au statut d'innovation. Pour identifier les technologies sur lesquelles les efforts d'innovation se concentrent dans ces pays, nous ne retenons que les 10% d'inventions de plus haute qualité pour chaque pays. Les résultats sont résumés dans la Figure 4 et reflètent les compétences technologiques des sept pays étudiés. Les poids des technologies dans les 10% de meilleures inventions sont rapportés entre parenthèses.

Pays	Compétences techniques
Allemagne	Eolien (19%), Solaire PV (15%), Nucléaire (14,86%), Solaire thermique (11,7%), Stockage d'énergie (10,4%)
Danemark	Eolien (44,4%), Bio-carburants (18,5%), Energie des mers (14,8%)
Espagne	Solaire thermique (29,8%), Eolien (29,8%)
France	Nucléaire (33,4%), Stockage d'énergie (13,9%)
Grande-Bretagne	Solaire PV (16,13%), Eolien (14,5%), Stockage d'énergie (10,5%)
Pays-Bas	Solaire thermique (22%), Solaire PV (20,6%), Eolien (16,17%), Bio-carburants (13,2%)
USA	Stockage d'énergie (21,23%), Solaire PV (18,4%)

Figure 4: Compétences techniques des pays, en pourcentage des meilleures inventions nationales

La spécialisation dans un champ technologique peut être couteuse car mener à des situations de verrous technologiques (Arthur, 1989). Les verrous technologiques se forment quand des événements historiques, a priori insignifiants, vont accorder un gain d'apprentissage à une technologie qui l'emportera sur d'autres en dépit de sa plus faible efficacité de long-terme, i.e. une fois que la technologie est déployée et sortie de sa phase d'apprentissage. Ainsi la performance d'un pays dans un secteur dépend du profil de la technologie. Sur ce point, l'indice de qualité des inventions brevetées permet de distinguer les technologies selon la performance des inventions en termes de connaissance. L'identification d'une compétence relativement meilleure dans un champ technologique ne constitue donc pas en soi un élément suffisant sur lequel construire une politique de soutien à l'innovation puisque les activités de R&D dans les technologies, selon leurs stades de maturité entre autre, vont être plus ou moins performantes.

Evolution de la performance des inventions en termes de connaissance

L'originalité de la démarche proposée dans le chapitre 3 est d'introduire la notion de qualité dans la mesure de la connaissance. Le cumul d'un grand nombre d'invention n'indique pas en soi l'existence d'une connaissance féconde à l'innovation. Ce passage du statut d'invention à celui d'innovation peut être capté par la performance des inventions en termes de qualité de la connaissance¹⁵. Suivant les travaux de Popp et al. (2013), les performances sont analysées de deux manières : (1) les performances moyennes d'une technologie, mesurées par la qualité

¹⁵ Une vaste littérature empirique met en exergue le lien entre les métriques de brevet et la valeur économique des inventions (e.g. Schankerman et Pakes, 1986 ; Harhoff et Wagner, 2009 ; Lerner et al., 2004 ; Hall et al., 2005). L'indice de qualité étant construit à l'aide de l'information que contiennent les métriques, il est lui-même relié à la valeur économique de l'invention. Par ailleurs, Lanjouw et Schankerman (2004) valide le lien entre l'indice de qualité et la valeur boursière des entreprises innovantes.

moyenne des inventions ; (2) la distribution des performances d'une technologie, mesurée par la distribution des inventions en termes de qualité pour une technologie donnée.

Les évolutions temporelles de ces deux dimensions de la performance révèlent des différences marquées entre les technologies. On se limitera à quelques technologies majeures en ce qu'elles représentent les plus fortes parts du stock de connaissance accumulé à l'année 2010. La performance moyenne des inventions en termes de connaissance a augmenté dans le temps pour le solaire PV, le stockage d'énergie et l'éolien. Conjointement, la distribution de la qualité des inventions s'est progressivement étalée vers des niveaux plus grands de l'indice de qualité, indiquant que le cumul de connaissance s'est accompagné d'un accroissement des découvertes d'innovations plus performantes.

Les technologies de l'énergie nucléaire et de l'énergie solaire thermique présentent des résultats opposés. D'une part, la performance moyenne des inventions brevetées dans le nucléaire a diminué dans le temps. D'autre part, la distribution des inventions a eu tendance à se concentrer autour de valeurs plus faibles de la qualité. La technologie de l'énergie solaire thermique voit également le nombre de découvertes d'innovations performantes décroître dans le temps. Toutefois la qualité moyenne de l'ensemble des inventions tend à rester stable. Ces résultats plaident en faveur d'un soutien se limitant à la recherche fondamentale dans ces deux technologies, visant à provoquer des innovations de ruptures. Celles incrémentales, c'est-à-dire bâties sur la technologie telle qu'existante, ont de plus faibles chances d'être performantes.

Des technologies encore immatures peuvent révéler sur le long terme un fort potentiel et ainsi contribuer à fortement réduire le coût de la transition énergétique (Popp et al., 2013). L'augmentation dans le temps de leurs performances suggère que ces technologies devraient faire l'attention d'un soutien renforcé de la part des pouvoirs publics. C'est le cas des bio-carburants, de l'énergie des mers, de l'hydro-énergie et de l'hydrogène. Au contraire, la performance moyenne des inventions dans des champs technologiques pourtant clés comme le CCS et les réseaux intelligents a stagné au fil du temps.

La spécificité de l'innovation environnementale

L'analyse empirique fondée sur la mesure de la connaissance développée dans le chapitre 3 pose la question des instruments dont dispose le régulateur pour stimuler la création de connaissance. De plus, l'étude du soutien à la diffusion a démontré l'intérêt de construire le déploiement d'une technologie sur l'existence d'un socle de connaissance technique. Or les pouvoirs publics disposent de deux moyens d'actions pour orienter les investissements du secteur privé vers la création de connaissance : (1) accroître l'appropriation d'une invention pour permettre à l'inventeur de convertir une part de la connaissance créée en une rente d'innovation, sous condition que cette dernière rencontre une demande ; (2) à niveau d'appropriation donné, accroître le profit de l'inventeur en diminuant le coût de la R&D ou en augmentant le revenu de la vente de l'innovation.

Le contrôle par un régulateur du degré d'appropriation d'une invention par son inventeur à l'aide d'un système de brevet permet de réduire les coûts sociaux de la dissimulation de la connaissance et du manque d'incitation à innover (Nordhaus, 1967). Le chapitre 4 de cette thèse traite la question du système de brevet quand celui-ci s'adresse aux technologies environnementales. Il fait ainsi écho à la discussion amorcée dans le chapitre 1 portant sur le rôle de la double externalité.

Les différents modèles théoriques pouvant servir de guides aux politiques de soutien à l'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone, présentés dans le chapitre 1, se distinguent par leurs traitements des externalités sur l'environnement et sur la connaissance. Le modèle du 'price fundamentalism' repose sur deux hypothèses centrales pour déduire que les politiques de soutien à l'innovation ne doivent pas traiter différemment les technologies environnementales des autres types de technologies. Deux modèles alternatifs dérivent du relâchement de l'une et l'autre de ces hypothèses. Pour autant, le modèle du 'price fundamentalism' n'a pas été testé dans le cadre d'un système de brevet, qui pour les raisons détaillées ci-dessus constitue une pierre angulaire des politiques d'innovation. Ainsi, un quatrième modèle alternatif, celui de 'strong double externality', est étudié et propose un système de brevet dédié à l'innovation environnementale.

L'interaction entre l'appropriation de la connaissance et la tarification des dommages environnementaux

Il fait consensus dans la littérature que garantir l'appropriation partiel d'une invention via un système de brevet constitue un arbitrage pour le régulateur entre l'impact positif de long terme qu'aura l'invention sur le bien-être social et le coût social de restreindre temporairement l'accès à cette nouvelle invention pour garantir une rente technologique à l'inventeur, supposée l'inciter à investir (e.g. Nordhaus, 1967 ; Klemperer, 1990 ; Gallini, 1992 ; Denicolo, 1996).

L'intuition économique sur laquelle se fonde la double externalité dans sa version forte est la suivante. Considérons deux inventions ayant, à niveau égal d'appropriation, le même impact sur la société, l'une nommée régulière et l'autre environnementale. La première constitue par exemple une technique de production dont l'avantage sera rétribué via des marchés, et donc un système de prix, préexistant. La seconde, au contraire, est une technique de production dont le rendement se fait uniquement via l'existence d'une tarification des externalités environnementales, que l'invention permet de réduire toutes choses égales par ailleurs. Le régulateur implémente : (1) un système de brevet qui garantit une appropriation plus ou moins forte de l'invention en vue de garantir une rémunération incitative à l'inventeur, (2) une tarification environnementale pour internaliser les externalités sur l'environnement.

L'invention régulière présente deux dimensions. La première est sa dimension sociale et la seconde sa dimension privée. Le rendement social de l'invention régulière correspond à la création de bien-être social provenant de l'avantage technique que permet l'invention. Le rendement privé de l'invention est celui qui sera internalisé sous forme de profit par l'inventeur. Chacun dépend de deux éléments communs définis ci-dessous.

- *La magnitude de l'avantage technique* qui jouera positivement sur le rendement social et le rendement privé de l'invention. L'analyse proposée portant sur deux inventions ayant à niveaux d'appropriation égaux le même rendement social, les magnitudes des avantages que confèrent ces inventions sont fixes et équivalentes en termes de bien-être social.

- *L'appropriation de l'invention.* Si elle est nulle, l'invention est en accès totalement libre et son rendement social atteint une borne supérieure théorique¹⁶ tandis que son rendement privé tombe à zéro puisque l'inventeur ne profitera d'aucun avantage technologique sur ses concurrents. Inversement, si l'appropriation est parfaite, l'invention n'est accessible à personne d'autre que l'inventeur et son rendement social est minimisé, tandis que son rendement privé est maximisé. Les variations des rendements social et privé de l'invention régulière en fonction de son appropriation sont représentées respectivement par la courbe décroissante en trait plein et la courbe croissante en pointillés sur le cadran de gauche de la Figure 5. Pour une appropriation totale (i.e. 100%) les deux rendements se confondent puisque seul l'inventeur bénéficie de l'invention.

L'arbitrage auquel fait face le régulateur en mettant en place un système de brevet est de choisir le niveau d'appropriation de manière à garantir à l'inventeur un rendement privé incitatif considéré connu et noté \bar{R} sur la Figure 5. Il en résulte le niveau d'appropriation nécessaire A_r .

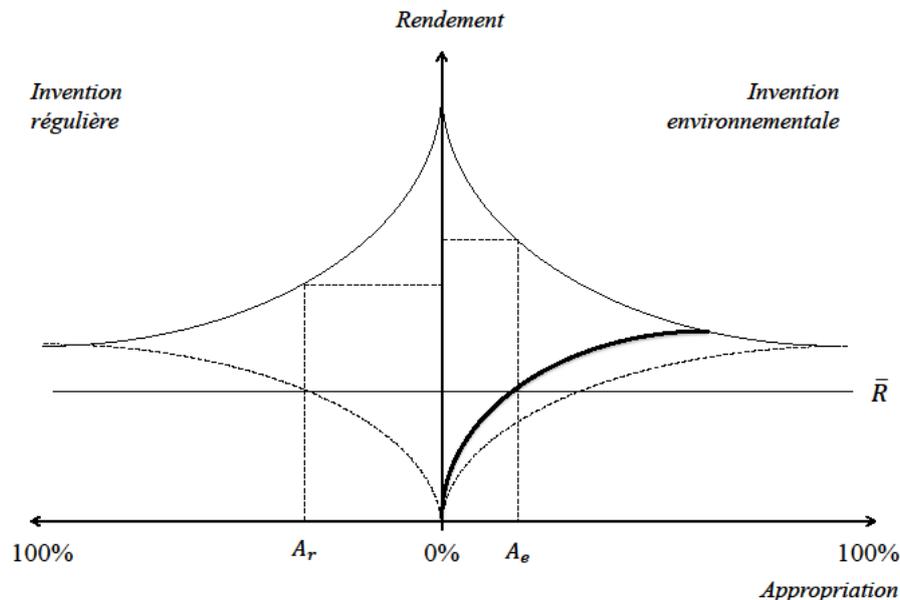


Figure 5: Illustration de l'interaction entre la taxation environnementale et l'appropriation d'une invention.

L'invention environnementale a également deux dimensions: privée et sociale. Chacune de ces deux dimensions est également impactée par l'appropriation de l'invention de manière similaire au cas de l'invention régulière. Le rendement social de l'invention environnementale est représenté par la courbe pleine sur le cadran de droite de la Figure 5.

Cependant, la conversion du gain environnemental d'une technique moins polluante en des bénéfices privés se fait par l'intermédiaire de la politique environnementale. Ainsi pour un

¹⁶ La borne supérieure est dite théorique car une partie de l'invention, même en l'absence de système de brevet, demeure toujours internalisable par l'inventeur via par exemple des stratégies de secret industriel.

niveau donné d'appropriation de l'invention le régulateur peut ajuster le rendement privé à l'aide de la taxe environnementale.

Si la taxe environnementale payée par l'inventeur internalise parfaitement les dommages environnementaux, le rendement privé d'une invention environnementale et d'une invention régulière évolueront de la même façon avec l'appropriation de l'invention. Dans ce cas de taxation Pigouvienne (Pigou, 1932), le rendement privé d'une invention environnementale est décrit par la courbe en pointillé sur le cadran de droite de la figure. Qu'en est-il si le régulateur fixe une tarification des dommages environnementaux plus faible pour l'inventeur ? La courbe de rendement privé de l'invention environnementale se déplace vers le haut, comme l'illustre la courbe en trait gras dans le cadran droit de la Figure 5. Pour garantir le rendement privé \bar{R} , le régulateur réduit l'appropriation de l'invention via un brevet moins protecteur, comme l'indique le fait que A_e soit plus faible que A_r , et ainsi accroître le rendement social de l'invention.

Cette illustration se fonde sur un raisonnement toutes choses égales par ailleurs et n'a pas valeur de démonstration. Par exemple, faire payer une taxe environnementale plus faible au détenteur du brevet l'incite à produire d'avantage et les répercussions sur l'environnement peuvent, in fine, alourdir le coût du système de brevet. Les analyses développées dans le chapitre 4 formalisent l'idée de l'interaction entre le système de brevet et la taxation environnementale.

Le design optimal de brevet sur des technologies environnementales

La première étape consiste à poser le problème du système de brevet. Comment minimiser la perte temporaire de bien-être social imputable à l'appropriation partielle d'une invention environnementale sous condition d'induire l'investissement souhaité en R&D¹⁷ de la part des agents privés ? Pour répondre à cette question le régulateur dispose de quatre instruments : la longueur du brevet, sa largeur, la taxe payée par l'inventeur et la taxe payée par ses concurrents. La première étape de notre analyse limite le degré de précision de la structure du modèle en vue de mettre en avant ses principes généraux. Deux hypothèses réalistes permettent de conclure à l'interaction entre le système de brevet et la taxe environnementale : (1) le profit de l'inventeur est plus fort pendant le brevet qu'après son expiration; (2) le profit de l'inventeur décroît avec le taux de taxe environnementale qu'il doit payer. Deux types d'interactions sont déduits. Dans un premier cas, le coût social temporaire du brevet est supprimé via la taxe environnementale. Dans un second cas, le coût social temporaire du brevet demeure mais la taxe optimale payée par l'inventeur est plus faible que celle maximisant le bien-être social durant la validité du brevet. En ce sens, le couplage avec un système de brevet réduit le niveau optimal de taxe environnementale. Si les questions du système de brevet et de la taxation environnementale étaient traitées indépendamment, les solutions ne seraient pas les mêmes. Par conséquent, la politique de brevet interagit avec la taxation environnementale quand elle s'adresse à l'innovation environnementale. Deux illustrations des principes généraux sont proposées le chapitre 4.

La première application considère le marché d'un bien de consommation polluant. Le détenteur du brevet dispose d'une technique permettant de réduire le dommage environnemental associé à la production du bien. Sa découverte lui confère de surcroît une position de leader à la Stackelberg. Les firmes qui lui font concurrence peuvent copier la

¹⁷ Nous suivons Denicolò (1996) en considérant que le niveau de R&D que le régulateur souhaite induire est connu.

méthode de production en payant un coût fixe. En choisissant la largeur du brevet, le régulateur définit dans quelle mesure la copie peut être proche ou non de l'original. La résolution du problème du régulateur conclut qu'il est optimal d'imposer une taxation qui exclut la frange concurrentielle, et confère de fait l'entière production au détenteur du brevet qui vendra au coût marginal social en raison d'une taxe environnementale plus favorable que celle de ses concurrents. La longueur du brevet est ajustée en fonction de la taxe environnementale tandis que la largeur, elle, ne joue plus de rôle dans l'arbitrage du régulateur. En effet, elle est nulle puisque réduisant inutilement l'accès à la technologie nouvelle, quand le différentiel de profit entre l'inventeur et ses concurrents peut être généré efficacement par une taxation discriminante.

La seconde application considère ex ante le cas d'une largeur maximale du brevet. Son détenteur est donc en situation de monopole sur le marché. Nous concluons à l'optimalité d'une taxe environnementale plus faible que la taxe Pigouvienne. En retour, la longueur du brevet est réduite en comparaison d'une innovation régulière de même incidence sur le bien-être social. Nous concluons à l'efficacité de mettre en œuvre un système de brevet dédié aux technologies environnementales. Si les applications proposées démontrent l'interaction entre la taxation environnementale et le système de brevet, elles illustrent aussi les limites de la mise en œuvre de la politique optimale de soutien à l'innovation environnementale. La plupart de ces limites sont communes au système de brevet en général, certaines sont propres à nos résultats et appellent des recherches supplémentaires.

4. Conclusion

L'objectif de cette thèse est d'établir les conditions d'un soutien efficace à l'innovation dans les technologies de l'énergie bas-carbone. Les travaux présentés se focalisent sur les instruments de soutien à l'innovation tout en reconnaissant l'importance de la mise en place d'une taxation incitative des émissions de GES. Les modalités du soutien à l'innovation sont donc analysées comme étant complémentaires aux politiques environnementales de tarification des émissions de GES.

Pour répondre à cette question l'approche suivie couple des évaluations empiriques et des analyses théoriques. Sur le plan empirique, il est proposé une modélisation ayant pour objectif l'évaluation des effets des politiques de soutien demand-pull mises en place en Europe sur la diffusion d'une technologie bas-carbone représentative. Dans la continuité de ce travail, un modèle à facteur latent commun est utilisé pour améliorer les outils de suivi de l'innovation en estimant la qualité des inventions brevetées. Le but de cette démarche est de quantifier la connaissance accumulée entre 1980 et 2010 dans les technologies des énergies bas-carbone. Sur la base d'analyses théoriques, cette thèse propose une lecture nouvelle du concept de double externalité en étudiant les interactions entre un système de brevet et une tarification environnementale.

L'évaluation empirique proposée dans le chapitre 2 identifie certaines des limites des instruments de soutien demand-pull. Sur le plan méthodologique, son principal apport est de proposer une modélisation qui évalue l'effet des instruments de soutien sur la diffusion d'une technologie en intégrant au sein de la dynamique de diffusion l'hypothèse de learning-by-doing (Wright, 1936 ; Arrow, 1962). Les résultats indiquent que, selon les pays, les

dynamiques de diffusion de la technologie analysée s'expliquent de manière plus ou moins forte par les mécanismes de soutien demand-pull. De fait, la présence d'une filière industrielle nationale, en garantissant l'existence d'un socle de connaissance sur lequel fonder la diffusion de la technologie, permet à certains pays de disposer d'un avantage de first-mover qui implique qu'une part de la diffusion puisse se faire en l'absence de politique de soutien demand-pull. Ces résultats sont importants car ils s'inscrivent dans le contexte d'un déséquilibre majeur de la répartition du soutien de la part des pouvoirs publics entre un soutien supply-push et un soutien demand-pull. Les résultats suggèrent qu'une réorientation des ressources publiques vers un soutien supply-push pourrait également contribuer à assurer la diffusion d'une technologie bas-carbone.

La principale limite de ce travail se situe dans la modélisation de l'apprentissage. Si le learning-by-doing est largement utilisé dans la littérature (e.g. Messner et Schrattenholzer, 2000 ; Loulou et al., 2004, 2005), un courant de modélisation plus récent introduit un second vecteur d'apprentissage, celui du learning-by-searching (Kouvaritakis et al., 2000 ; Criqui et al., 2014). L'implémentation d'une courbe d'apprentissage à deux facteurs dans un modèle de diffusion est un moyen de rendre compte des effets respectifs de la R&D dédiée à une technologie et de son déploiement sur le niveau d'innovation. Elle offrirait ainsi une méthode d'évaluation du mix optimal entre le soutien par l'offre et le soutien par la demande.

Le chapitre 3 présente une méthode d'estimation de la connaissance technique accumulée dans les technologies des énergies bas-carbone. Dans la mesure où nous souhaitons disposer d'une mesure de la connaissance créée, des données de brevets sont utilisées. Or ce type de données présente des risques susceptibles de biaiser la validité de mesures de la connaissance quand elles se fondent sur le compte du nombre de brevets, ou l'utilisation d'une métrique unique (Griliches, 1990 ; Harhoff et al., 2009). L'avantage de la méthode développée est d'introduire la notion de qualité des inventions pour disposer d'une mesure robuste de la connaissance. C'est un exercice de réduction de l'information qui extrait de chaque invention brevetée la valeur de sa qualité; cette dernière étant explicative de ses métriques observées. Plusieurs résultats ressortent de ces estimations. Premièrement, la qualité moyenne des inventions a évolué différemment selon les technologies. Les exemples les plus frappants sont ceux des technologies du nucléaire, de l'éolien et du solaire photovoltaïque ; trois technologies qui se composent d'un grand nombre d'inventions brevetées sur la période étudiée. Si la qualité moyenne des inventions dans la technologie du nucléaire a chuté dans le temps, celles des inventions dans le solaire photovoltaïque et dans l'éolien ont fortement augmenté. Deuxièmement, nous analysons les spécificités de chaque pays. Les principaux innovateurs de notre échantillon de pays sont les USA, l'Allemagne et la France qui présentent les niveaux de production de connaissance les plus élevés. Les pays à niveaux de production plus bas ont tendance à concentrer leurs activités d'innovations sur un nombre plus restreint de technologies.

L'article proposé dans le chapitre 3 se fixe pour objectif central de mesurer l'innovation. Toutefois, les interprétations déduites de nos résultats gagneraient en qualité et en robustesse à être testées dans une modélisation économétrique de l'influence des facteurs explicatifs du niveau de connaissance accumulée dans une technologie (e.g. taille de marché, dépenses de R&D, existence d'une taxation environnementale, prix de l'énergie).

Le dernier chapitre de cette thèse revisite la question de la politique optimale de brevet en l'appliquant au cas d'une innovation environnementale de procédé. Dans un cadre simple, inspiré de l'article de Denicolò (Denicolò, 1996), nous explorons l'interaction entre une politique de brevet et une politique de taxation environnementale. Les résultats se rapprochent

de ceux de la littérature sur la taxation environnementale des monopoles (Buchanan, 1969 ; Lee, 1975 ; Barnett, 1980) mais l'interaction avec la politique de brevet constitue, à notre connaissance, une nouveauté. Les principes généraux du modèle soulèvent l'intérêt d'ajuster la taxation de l'innovateur en fonction du degré d'appropriation de l'invention. Deux applications illustrent cette interaction et permettent de montrer que la largeur du brevet, qui induit le différentiel de profit de l'innovateur vis-à-vis de ses concurrents, est plus efficacement remplacée par une taxation discriminante plus avantageuse à l'innovateur. Une première limite de ce travail est commune à la littérature sur les politiques optimales de brevet qui met en évidence sa très forte sensibilité aux structures de marché qui prévalent durant la validité du brevet. Les autres limites sont propres à notre article. Premièrement, nous raisonnons dans un cadre où le régulateur ne dispose que d'un seul instrument pour inciter le secteur privé à innover. Or les subventions à la R&D, par exemple, constituent un autre élément important des politiques d'innovations. Deuxièmement, nos résultats concluent à l'optimalité d'une politique difficile à implémenter pour plusieurs raisons : (1) la politique optimale implique que le régulateur puisse librement adapter la politique de taxation environnementale; (2) le régulateur est unique quand, dans les faits, les offices de brevets agissent indépendamment de la politique environnementale, et réciproquement.

Perspectives de recherches

La première piste de poursuite des recherches consiste à exploiter les résultats des estimations menées dans le chapitre 3. Dans un premier temps, il conviendra d'évaluer les déterminants de la création de connaissance. Une approche similaire à celle de Johnstone et al. (2010) peut être mise en place pour tester la valeur-ajoutée de l'indice de qualité. En effet, leur étude se restreint à un compte des brevets, ce qui pour les raisons détaillées dans le chapitre 3, accroît considérablement le risque d'erreur de mesure. Dans un second temps, l'estimation des courbes d'apprentissage à facteurs multiples pour le solaire photovoltaïque et l'éolien¹⁸ permettra de mieux apprécier les influences respectives sur la baisse des coûts du stock de connaissance et de l'expérience accumulée via le déploiement de la technologie. Finalement, les résultats permettront de calibrer des modèles de diffusion des technologies bas-carbone dans le secteur électrique. Plus précisément, le calibrage portera sur les taux de learning-by-searching et de learning-by-doing en vue de tester l'efficacité d'une politique de soutien supply-push plus forte.

La seconde piste de recherche porte sur le travail effectué dans le chapitre 4. Trois directions doivent être explorées. Premièrement, le design optimal des politiques de brevets étant fortement sensible à la structure de marché, de nouvelles structures doivent être étudiées. Deuxièmement, la double externalité doit être analysée dans le cadre des politiques de subventions à la R&D dans le but d'identifier si elle se limite au seul cas des politiques de brevets. Finalement, une analyse plus poussée nécessite de se départir de la dichotomie entre des innovations purement environnementales et des innovations que nous avons appelé régulières. Pour cela, le cas d'une innovation qui présente à la fois des avantages environnementaux et des avantages rétribués via des marchés préexistants doit être étudié.

¹⁸ A notre connaissance, des données fiables de coût d'investissement ne sont pas disponibles pour d'autres technologies de l'énergie bas-carbone.